

Hydrogeologische Analyse und großräumige Modellierung des weiteren Vorerzgebirgssenkensraumes

Von der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik, und Bergbau
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum naturalium

Dr. rer. nat.

vorgelegt

von Dipl.- Geologe Sebastian Kolitsch

geboren am 2. Oktober 1969 in Berlin

Gutachter: Prof. Dr. Broder Merkel, Freiberg
Prof. Dr. Klaus Stanek, Freiberg
Dr. Manfred Felix, Freiberg

Tag der Verleihung: 14. Februar 2008

Danksagung

Mein besonders herzlicher Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Merkel, der mir, auch in Zeiten großer räumlicher Entfernung, jederzeit mit hilfreichen Ratschlägen zur Seite stand. Ich danke weiterhin meinen Gutachtern, den Herren Prof. Dr. Stanek und Dr. Felix für die Durchsicht meiner Arbeit.

Zahlreiche Mitarbeiter der TU Bergakademie Freiberg haben in den vergangenen Jahren meine Arbeiten unterstützt. Dazu gehören neben meinen ehemaligen Kollegen am Lehrstuhl für Hydrogeologie und den Mitarbeitern des Rechenzentrums, Herr Prof. Dr. Schneider mit seinen Hinweisen zum Stand von geologischen Untersuchungen in der Vorerzgebirgssenke und Herr Dr. Stumm von der Universitätsbibliothek, der mir wertvolle Hinweise zur meiner umfangreichen Literaturrecherche gab.

Den Mitarbeitern des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie in Freiberg und Dresden gilt mein ganz besonderer Dank. Sie haben mich bei meinen Arbeiten durch zahlreiche Gespräche, Korrespondenz und die Überlassung einer Vielzahl von Daten unterstützt. Insbesondere danke ich an dieser Stelle Frau Zweig, Frau Schubert, Herrn Duteloff und Herrn Hübschmann.

Gleichermaßen stellte mir die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, namentlich Frau Peters, auch kurzfristig wichtige Projektdaten zur Verfügung wofür ich mich sehr bedanken möchte.

Ein Dank gilt den Mitarbeitern der WISMUT GmbH, insbesondere Herrn Möckel, die mich durch Hinweise und Daten unterstützten.

Herzlich danken möchte ich den Mitarbeitern von EMS-I und den Programmentwicklern von GMS und FEMWATER. Auch wenn naturgemäß zur Programmsoftware GMS/FEMWATER noch viele Wünsche offen blieben, gaben sie mir so manchen Rat zu programmtechnischen Defiziten und möglichen Alternativen. Nennen möchte ich insbesondere Herrn Jeffrey Davis der mich bei der Anpassung des GMS-FEMWATER Programmcodes unterstützte.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Freunden Jörn Wichert und Torsten Lange die mir, ob auf Wanderungen durchs böhmische Land oder - alle elektronischen Barrieren überwindend - übers Internet, mit Diskussionen, Rat und Tat so sehr halfen.

Zu guter Letzt geht ein großer Dank an meine Familie, im besonderen an meine Frau, die den Glauben an die Vollendung des Vorhabens wach hielten und mir mutmachend zur Seite standen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielstellung	7
2	Methodik und Datenaufbereitung	10
2.1	Definitionen wichtiger verwendeter Begriffe	10
2.2	Arbeitsablauf	11
2.3	Feldarbeiten	13
2.4	Schwerpunktrecherche: Literaturstudie zu Hydraulik und Charakter tiefer Grundwässer in sedimentären Senken	13
2.5	Erfassung und Abgleich geologischer und hydrogeologischer Daten	14
2.5.1	Datenquellen (vgl. Tabelle 2)	16
2.5.2	Synchronisierung (Durchführung Herr Göttelmann)	19
2.5.3	Plausibilitätsprüfungen und Datenkonvertierungen	19
2.5.4	Überblick, Schlussfolgerungen und Ausblick	20
2.6	Schwerpunktthemen zur Hydrogeologie und Hydrochemie	20
2.7	Unterirdischer Wasserhaushalt	21
2.7.1	Grundgleichungen zur Beschreibung des unterirdischen Wasserhaushaltes	22
2.7.2	Vorgehensweise bei der Abgrenzung unterirdischer Einzugsgebiete	23
2.7.3	Grundwasserneubildung und Wasserhaushaltsdaten	24
2.7.4	Fehlerbetrachtung und Störgrößen bei Anwendung der vereinfachten Grundwasserhaushaltsgleichung	30
2.8	GIS-Themen und Datenbanken	32
2.9	Strukturmodellierung in GOCAD	33
2.9.1	Das Modellierungsprogramm GOCAD, Kenntnisstand	33
2.9.2	Arbeitsablauf zur Erstellung des GOCAD-Modells	34
2.9.3	Import von Dateien in GOCAD: Filter und Konverter	36
2.9.4	Die Verwendung von GOCAD Objekten im Modell	37
2.9.5	Das GOCAD-Modell als Grundlage für die Modellierung in GMS	38
2.10	Struktur-, Parameter- und Strömungsmodellierung in GMS	39
2.10.1	Das Modellierungsprogramm GMS	39
2.10.2	Arbeitsablauf zur Erstellung des GMS - Modells	40
2.10.3	Import von Daten in GMS	41
2.10.4	Das hydrogeologische Strukturmodell in GMS	42
2.10.5	Initiales hydrogeologisches Parametermodell	43

2.10.6	Hydraulisches Modell – Modellgeometrie _____	44
2.10.7	Modellrechnung, Randbedingungen und Anpassung von hydraulischen Parametern _____	45
2.10.8	Ergebnisse der hydraulischen Modellierung _____	47
3	Einführung in das Untersuchungsgebiet, Kenntnisstand _____	48
3.1	Lage, Ausdehnung und Morphologie _____	48
3.2	Geologische Entwicklung _____	51
3.3	Tektonische Entwicklung _____	54
3.4	Hydrogeologie _____	58
4	Ergebnisse _____	61
4.1	Literaturstudie: Hydraulik und Charakter tiefer Grundwässer in sedimentären Senken _____	61
4.1.1	Einführung, Zielstellung und Systematik _____	61
4.1.2	Bildung tiefer Grundwässer in sedimentären Senken _____	63
4.1.3	Grundwasserfluss in sedimentären Senken _____	64
4.1.3.1	Konzepte zu Grundwasser- und Fluidbewegungen in sedimentären Senken	64
4.1.3.2	Antriebskräfte von Grundwasser-/ Fluidabewegungen und ihre Wechselwirkungen _____	70
4.1.4	Geochemie von Grundwässern in sedimentären Senken: Charakteristik, Prozesse, Untersuchungsansätze _____	80
4.1.4.1	Herkunft von Salinität in Grundwässern sedimentärer Senken _____	80
4.1.4.2	Einfluss der Diagenese auf das Grundwasser und Gestein; Zeitfaktor _____	83
4.1.4.3	Ansätze zur Untersuchung von Grundwässern in sedimentären Senken _____	86
4.1.5	Schlussfolgerungen für die Verhältnisse in der VES _____	89
4.2	Hydrogeologischer Bau und Hydrodynamik in der Vorerzgebirgssenke _____	92
4.2.1	Hydrogeologische Charakteristik und hydrogeologischer Bau _____	92
4.2.2	Hydrodynamik _____	96
4.2.3	Hydraulische Abgrenzung der Vorerzgebirgssenke vom Umland _____	102
4.2.4	Spezielle hydrogeologische Verhältnisse in den Teilgebieten _____	105
4.2.4.1	Westlicher Teil der Vorerzgebirgssenke _____	106
4.2.4.2	Zentraler Teil der Vorerzgebirgssenke _____	116
4.2.4.3	Östlicher Teil der Vorerzgebirgssenke _____	124

4.2.4.4	Schlussfolgerungen zu den hydrogeologischen Verhältnissen in den Teilgebieten	133
4.2.5	Einfluss der Grubenflutungen im Raum Zwickau-Oelsnitz auf die Grundwasserdynamik	134
4.3	Hydrogeologische Bedeutung von Störungs- und Kluftzonen	139
4.3.1	Seismisch-tektonische und lithologisch-phenomenologische Ansätze zur Einschätzung der hydraulischen Wirksamkeit von Störungen und Klüften	139
4.3.2	Hydraulische Wirksamkeit von Störungs- und Kluftzonen in der Vorerzgebirgssenke	147
4.3.3	Grundwasserfluss auf Störungszonen – Modellrechnungen	155
4.4	Grundwasserhaushalt	160
4.4.1	Probleme bei der Abgrenzung unterirdischer Einzugsgebiete	160
4.4.2	Diskussion unterirdischer Einzugsgebiete	163
4.4.3	Grundwasserneubildung und Bilanzierung	166
4.4.3.1	Grundwasserneubildung in den Teileinzugsgebieten und Abgrenzung der Bilanzgebiete	166
4.4.3.2	Bilanzgebiete im zentralen Teil der Vorerzgebirgssenke	170
4.4.3.3	Bilanzgebiete im westlichen und östlichen Teil der Vorerzgebirgssenke	175
4.5	Grundwasserbeschaffenheit und Typisierung	178
4.5.1	Rotliegendgrundwässer in der Vorerzgebirgssenke	179
4.5.2	Grundwasserfaziestypen	181
4.5.3	Einfluss höher mineralisierter Grubenwässer auf das Grundwasser	187
4.6	Höher mineralisierte Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke	189
4.6.1	Problemstellung, Definition, Vorkommen	189
4.6.2	Herkunft höher mineralisierter Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke	190
4.6.3	Hydraulik und Positionierung höher mineralisierter Grundwässer	197
4.6.4	Fazit	201
4.7	Das konzeptionelle Modell der Vorerzgebirgssenke für die Umsetzung in der numerischen Modellierung	201
4.8	Das hydrogeologische Strukturmodell der Vorerzgebirgssenke	203
4.8.1	Einführung und Zielstellung	203
4.8.2	Das Digitale Geländemodell	204
4.8.3	Modelle Aufschluss- und Schichtdaten	206

4.8.4	Die hydrogeologischen Einheiten	213
4.8.5	Das strukturelle Inventar	222
4.8.6	Informationsebenen zur Hydrogeologie, Hydrologie und Geologie	225
4.8.7	Kartengrundlagen	225
4.9	Das Grundwasserströmungsmodell der Vorerzgebirgssenke	226
4.9.1	Einführung, Berechnungsverfahren und Zielstellung	226
4.9.2	Der Programmcode FEMWATER	226
4.9.3	Modellgeometrie	228
4.9.4	Modellparameter und Randbedingungen	229
4.9.4.1	Hydrogeologisches Parametermodell	229
4.9.4.2	Randbedingungen	236
4.9.4.3	Modelleinstellungen und Modellrechnung	238
4.9.5	Modellkalibrierung, Validierung und Sensitivitätsanalyse	241
4.9.5.1	Modellkalibrierung	241
4.9.5.2	Modellverifizierung und Validierung	251
4.9.5.3	Sensitivitätsanalyse	252
4.9.6	Fehlerbetrachtung und Programmgrenzen	253
4.9.7	Ergebnisse und Anwendungen der hydraulischen Modellierung	255
4.9.7.1	Grundwasserfluss im Modellraum	255
4.9.7.2	Fließgeschwindigkeiten und präferentielle Fließwege	258
4.9.7.3	Identifikation von Fließbahnen und Fließdauer/ Particle Tracking	259
4.9.7.4	Weitere Fallstudien und Szenarien	263
4.9.8	Abschlussdiskussion	267
5	Fazit und Ausblick	269
6	Zusammenfassung	270
7	Verzeichnisse	272
7.1	Literatur	272
7.2	Abkürzungen und Formelzeichen	303
7.3	Begriffe	304
7.4	Tabellen	306
7.5	Abbildungen	308
7.6	Anlagen	310

1 Einleitung und Zielstellung

Die Erkundung und Interpretation der hydrogeologischen Verhältnisse im weiteren Vorerzgebirgssenkensraum (im folgenden auch als VES bezeichnet, zur Abgrenzung vgl. Abschnitt 3.1) ist seit langem von besonderem Interesse für Praxis und Forschung. Dies ergibt sich einerseits aus der wachsenden Bedeutung der Gewinnung von Trink- und Brauchwasser in dieser gewerblich und landwirtschaftlich gut entwickelten, bevölkerungsreichen Region. Andererseits verlangen die noch heute nachwirkenden Folgeerscheinungen (z.B. Grundwasseranstieg und Beeinflussung von Grundwasserwegsamkeiten und Grundwasserqualität) des bis Ende der 60er Jahre betriebenen Steinkohlenbergbaus in den Revieren Zwickau und Lugau-Oelsnitz ein wichtiges Untersuchungsfeld. Darüber hinaus sind verschiedene hydrogeologische Themen auch von akademischem Interesse. Dazu gehören Fragestellungen wie die zu den hydraulischen Mechanismen in den tieferen Bereichen der Vorerzgebirgssenke, zur hydraulischen Anbindung der grundwasserführenden Schichten und Strukturen der VES an die umgebenen hydrogeologischen Einheiten und zur Bedeutung von Störungszonen für den Grundwasserfluss. In diesem Zusammenhang sei hingewiesen auf die viel diskutierte Frage der Herkunft chloridreicher hoch mineralisierter Wässer im Vorerzgebirgssenkensraum und die dabei besprochene Hypothese der Migration dieser Wässer aus dem thüringischen Raum in den Bereich der VES (BSA 1981, SCHRÄBER 1968, ARNOLD 1900, BLÜHER 1960, PIETZSCH 1962, BRINSCHWITZ 1992, UFZ 1996) sowie auf die Frage eines möglichen "Grundwasseraustrags" aus dem Raum Zwickau nach N/NW entlang von Störungszonen (BRAUSE 1999, KOLITSCH 1999).

Die oben genannten sehr unterschiedlichen Interessen führten zu zahlreichen Untersuchungen der Grundwasserverhältnisse im Bereich der VES. Diese konzentrieren sich jedoch auf das oberste Grundwasserstockwerk bzw. die bergbaulich beeinflussten Gebiete von Zwickau und Oelsnitz. Insgesamt betrachtet zeigt sich der Wissensstand zu den hydraulischen Verhältnissen im weiteren Vorerzgebirgssenkensraum also als lückenhaft, wobei regional große Unterschiede auftreten.

In den Jahren 1977 bis 1982 wurden vom VEB Hydrogeologie Nordhausen hydrogeologische Übersichtsgutachten erarbeitet, die den gesamten Modellraum einschließen und den damaligen Kenntnisstand zu den hydrogeologischen Verhältnissen zusammenfassend betrachten (VEB HYDRO 1977-1982). Da bis heute für viele Regionen nur punktuell neue Informationen vorliegen, stellen diese Gutachten für die größer maßstäbliche Betrachtung des Untersuchungsgebietes noch immer eine wichtige Arbeitsgrundlage dar. Wesentliche hydrogeologische Informationen aus diesen Untersuchungen wurden in den Hydrogeologischen Karten der DDR 1:50.000 dargestellt (ZGI 1984). Die Übersichtsgutachten verdeutlichen den sehr unterschiedlichen Kenntnisstand in den einzelnen Teilgebieten des Modellgebietes. Weiteren Erkenntniszuwachs erzielten die landesamtlichen Arbeiten zur Hydrogeologischen Kartierung im Maßstab 1:200.000 sowie die Kartierungen zur Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung im Maßstab 1:25.000 (Darstellung 1:50.000) (HÜBSCHMANN 2006, HYK50 2006, HÜK200 2006). Hier wurde der bisherige Kenntnisstand u.a. für weite Teile der Vorerzgebirgssenke zusammengefasst und dargestellt. Die Beschreibung der größeräumigen Grundwassersituation wird durch landesamtliche Berichte bzw. Datensammlungen

ergänzt (z.B. LFUG 2002b und 2003, PÄLCHEN et al. 2005, TLUG 2006 und 2007).

Bestimmte Gebiete des Untersuchungsraumes sind hydrogeologisch verhältnismäßig gut untersucht. Dazu gehören die Bereiche Lungwitzbach, der Rödlitzbach im Bereich Lichtenstein-Heinrichsort, das Gebiet Mülsengrund (ZWEIG 2006d und 2007, ENMOTEC 1992, VEB HYDRO 1972-82, BEIER et al. 1986 u.a.) und mit Einschränkung auch der Bereich der ehemaligen Steinkohlenreviere von Zwickau und Lugau-Oelsnitz (siehe unten). Die Kenntnisse zur speziellen hydrogeologischen Situation in anderen Regionen sind dagegen oft lückenhaft. Dazu gehören z.B. die Gebiete Erlbach-Gersdorf und Ursprung-Leukersdorf-Jahnsdorf-Niederdorf sowie Bereiche östlich von Zwickau.

Gut dokumentiert sind die geologisch-strukturellen Verhältnisse des Karbons im Bereich der alten Steinkohlenreviere von Zwickau (KAULFUß et al. 1996, GFE 1985, BSA 1981, BLÜHER 1956 und 1968, STEINKOHLN-A-V 1912 u. v. a.) und Lugau-Oelsnitz (BSA 1974, BLÜHER 1956 und 1968 u.a.). Der Kenntnisstand wurde hier, auch bzgl. des Rotliegenden, seit den 90er Jahren durch neue Untersuchungen und Neubewertungen (BERGER 2004, HGC 2005, VOIGT 2004) und neue Datenmanagement- und Darstellungsformen (z.B. räumliche Modellierungen) und Interpretationsansätze verdichtet (LANGE 1998, RENNER 1998, KATER 1999, ZIMMERMANN 1998, MELZER 2005, ECKART et al. 2005, DUTELOFF 2006, FELIX et al. 2006 und 2007).

Im den ehemaligen Steinkohlentiefbauen stellten Grundwasserzuläufe in Schächte und Grubenbaue die wichtigste Quelle qualitativer und quantitativer Informationen zu permokarbenen Grundwässern dar (BSA 1981). Problematisch ist hier jedoch, dass die natürlichen hydraulischen und hydrochemischen Verhältnisse durch eben diesen Bergbau stark gestört waren. Zudem ist die Lage und Verfüllung/Verbruch vor allem älterer Grubenbaue oft nur ungenau oder nicht bekannt. Dies verkompliziert die Klärung der hydrogeologischen Verhältnisse in diesen Gebieten. Es erschwert darüber hinaus die Verallgemeinerung gewonnener Informationen, z.B. zur Grundwasserführung/ hydraulischen Leitfähigkeit und Grundwasserchemie bestimmter hydrogeologischer Einheiten, zur Nutzung in anderen stratigraphisch und strukturell vergleichbaren Folgen der VES. Mit Fragen zur Grundwassersituation in den Gebieten Zwickau und Oelsnitz beschäftigten sich deshalb bis heute zahlreiche Untersuchungen (z.B. BRAUSE et al. 1996 und 1997, BRAUSE 1999, C&E 1997, CWH 1994, GFE 1985, HGC 1999, 2002 und 2005, GUB 2003, ABRAHAM 2004, VOIGT 2004, BERRIOS 2004, LFUG 2006 und siehe oben).

Dazu gehören auch Arbeiten im Rahmen der 1999 abgeschlossenen "Komplexuntersuchung zu den Auswirkungen des Steinkohlenbergbaus Zwickau-Oelsnitz" (BRAUSE 1999, GÖTTELMANN et al. 1998, HGN 1996b-1998, LfUG 1995, LfUG 1996, SCHNEIDER (Ed.). 1999, WASY 1998 u.a.) im folgenden auch kurz als „Komplexuntersuchung“ bezeichnet, sowie thematisch angelehnte bzw. darauf aufbauende Bearbeitungen (GÖTTELMANN 1999a und 1999b, KOLITSCH et al. 2000, BRAUSE 2000 u.a.).

In den vergangenen 2 Jahrzehnten wurden im Rahmen von Brunnenerschließungen, Bau- und Sanierungsvorhaben und Forschungsarbeiten zahlreiche weitere – meist räumlich eng begrenzte - Informationen zu den hydrogeologischen Verhältnissen in Teilbereichen der

VES gewonnen, die das Bild in einigen Regionen vervollständigen (BEAK 1997, BEIER & SZYMCZAK 1986, ENMOTEC 1992, GEOS 1992, GUB 1998a, GUB 1998b, HGC & HGN 1999, ZIMMERMANN 1998, KRÄMER 2000, STORCH 2001 u.a.). Von besonderer Bedeutung ist dabei auch der Raum Helmsdorf-Crossen nördlich von Zwickau. Dort wurden im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen der WISMUT umfangreiche Untersuchungen zu den hydrogeologischen Verhältnissen im oberen Rotliegenden, im Tertiär und auf Störungszonen durchgeführt (G.E.O.S. 1996, HOFMANN et al. 1998, MÖCKEL 1998 und 2007, MÜLLER 1994, PAUL et al. 1998a, PAUL 1998b und 1998c, SPERLICH et. al. 1999, TRISCHLER & PARTNER CONS. GMBH 1995, ZWEIG 1999 u.a.).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist zunächst einer Recherche von Daten und Informationen zur Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnissen im Modellraum. Es folgt eine Analyse, Auswertung und Interpretation der speziellen hydrogeologischen Verhältnissen in den einzelnen Teilgebieten. Die hydrogeologische Analyse schließt Grundwasserhaushaltsbetrachtungen insbesondere zur Grundwasserneubildung (GWN) ein. Darauf aufbauend erfolgt eine zusammenfassende Charakterisierung der verschiedenen hydrogeologischen Einheiten. Ziel dieser Verallgemeinerung ist die großmaßstäbliche aber hinreichend genaue Abbildung der hydrogeologischen Gebirgseigenschaften als geometrische und parametrische Grundlage der dreidimensionalen hydrogeologischen Modellierung.

Aus einer umfangreichen Studie und Auswertung hydrogeologischer Prozesse in sedimentären Senken weltweit und der Anwendung dieser Erkenntnisse auf die Verhältnisse im Vorerzgebirgsraum werden in Verbindung mit der hydrogeologischen Analyse des Modellraumes hypothetische Ansätze zur Genese und Hydraulik tiefer Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke abgeleitet.

Ergebnisse werden in hydrogeologischen Schwerpunktthemen zusammengefasst. So wird es möglich komplexe Zusammenhänge übergreifend zu diskutieren und einzuschätzen. Zu den Schwerpunktthemen gehören u.a. die hydraulische Wirkung von Störungszonen, die Diskussion von möglichen hydraulischen Szenarien in den tieferen Bereichen der Vorerzgebirgssenke und die Erörterung von Vorkommen und Herkunft höher mineralisierter Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke.

Im Ergebnis entsteht eine umfassende hydrogeologische Modellvorstellung des weiteren Vorerzgebirgssenkenraumes. Sie bildet die Grundlage einer hydrogeologischen Struktur- und Strömungsmodellierung, die großräumige hydrogeologische Strukturen und hydraulische Szenarien abbildet und die Aussagen der hydrogeologischen Analyse qualitativ und quantitativ untersetzt.

2 Methodik und Datenaufbereitung

2.1 Definitionen wichtiger verwendeter Begriffe

Die Verwendung geologischer und hydrogeologischer Termini folgt, wenn nicht anders angegeben, den Empfehlungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und der Staatlichen Geologischen Dienste der BRD (GEOL. JAHRB. 1997) sowie den in HÖLTING (1992) und HÖLTING et al. (2005) verwendeten Begriffsdefinitionen. Auflistungen verwendeter Abkürzungen und Begriffe befinden sich Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis in den Abschnitten 7.2 und 7.3.

Grundwasserstockwerk (GWS)

Ein *Grundwasserstockwerk (GWS)* besteht aus einer oder mehreren hydrogeologischen Einheiten, von denen zumindest eine Grundwasserleiter-Eigenschaften besitzen sollte. Grundwasserleiter innerhalb eines *GWS* stehen miteinander in hydraulischer Verbindung. Treten mehrere *GWS* auf, so sind diese "durch schwer- oder nahezu undurchlässige Schichten voneinander getrennt. Sie verhalten sich vielfach hydraulisch unterschiedlich zueinander" (HÖLTING 1992).

Aquifer, Aquitard, Aquifuge, Aquiclude

Diese Begriffe sind in internationalen Publikationen zur Grundwasserführung in Sedimentgesteinen weit verbreitet. Ihre Verwendung und Gleichsetzung mit deutschen Bezeichnungen ist jedoch nicht eindeutig. So beziehen sie sich häufig (aber nicht immer) nur auf den grundwassergesättigten Bereich der jeweiligen Gesteinseinheit. Die Gleichsetzung der Begriffe „Grundwasserleiter“ und „Aquifer“ wäre dann also nur bei vollständig gesättigten bzw. gespannten GWL gegeben. In der vorliegenden Arbeit werden in der Regel die deutschen Bezeichnungen verwendet. Werden auch englische Bezeichnungen benutzt (z.B. in der Studie zu sedimentären Senkenstrukturen weltweit), beziehen sie sich i.d.R. auf den gesättigten Bereich der hydrogeologischen Einheit, können aber im allgemeinen bzgl. deren hydrogeologischer Eigenschaften auf die gesamte Einheit übertragen werden.

Die Abgrenzung der deutschen Bezeichnungen folgt im wesentlichen der Gliederung von SCHLIMM (1996) (vgl. GEOL. JAHRB. 1997). Sie werden in der vorliegenden Arbeit, wenn dort nicht anders erläutert, in folgendem Sinne verwendet.

Tabelle 1 Bezeichnung hydrogeologischer Einheiten in Anlehnung an SCHLIMM (1996)

Deutscher Begriff	Abkürzung	k_f bzw. T/H – Wertbereich [m/s], ca.	Internationale Entsprechung
Grundwasserleiter	GWL	$> 1 \cdot 10^{-5}$	Aquifer ^{*)}
Grundwassergeringleiter	GWGL	$1 \cdot 10^{-5}$ bis 10^{-8}	Aquitard ^{*)}
Grundwasserhemmer	GWH	$< 10^{-8}$	Aquifuge, Aquiclude ^{*)}

^{*)} nur gesättigter Bereich

Höher mineralisierte Wässer, salinare Wässer, Solen, Salzwässer, Brackwässer

Höher mineralisierte Wässer verstehen sich in dieser Arbeit als Wässer mit einer Gesamtkonzentration des Lösungsinhaltes von mehr als 2 g/l. Dies entspricht nach der in DAVIS & DE WIEST (1966) und CARPENTER (1978) vorgeschlagenen Einteilung den Brackwässern über 2 g/kg (1-10 g/kg), Salzwässern (10-100 g/kg) und Solen (>100 g/kg Lösungsinhalt). Die Begriffe Brackwässer, Salzwässer und Solen werden in dieser Arbeit vereinzelt in vorgenanntem Sinne verwendet. Der Begriff „salinare Wässer“ wird in dieser Arbeit, wenn nicht in Literaturangaben so bezeichnet, zugunsten der Formulierung höher mineralisierte Wässer vermieden.

Hydrogeologische Einheit

"Gesteinskörper, der aufgrund seiner Petrographie, Textur oder Struktur im Rahmen einer festgelegten Bandbreite einheitliche hydrogeologische Eigenschaften aufweist und durch Schichtgrenzen, Faziesgrenzen, Erosionsränder oder Störungen begrenzt ist." (GEOL. JAHRB. 1997). Bei Lockergesteinen kann eine hydrogeologische Einheit aus einem Teil, einer gesamten oder mehreren geologischen Einheiten bestehen, "bei Festgesteinen aus einer einzelnen Schicht oder einer Abfolge von Schichten ähnlicher Gesteinsausbildung und ähnlichen Durchtrennungsgrades." (GEOL. JAHRB. 1997).

Triple Junction, Failed Rift

Tripple Junction ist eine Grabenstruktur die den Treffpunkt dreier aneinander grenzender Lithosphärenplatten oder den Aufbruchpunkt einer Lithosphärenplatte unter Herausbildung dreier Grabenstrukturen bezeichnet. Kommt in einem dieser Riftgräben der Riftprozess im Verlaufe der tektonischen Entwicklung zeitweise oder dauerhaft zum Erliegen entsteht ein *Failed Rift*.

2.2 Arbeitsablauf

Die methodischen Ansätze zur Datenaufbereitung für die Modellierung und zur hydrogeologischen Analyse sind ein wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Arbeit und deshalb entsprechend ausführlich dargestellt.

Die Arbeiten gliederten sich im wesentlichen in die folgenden Schritte. In den angegebenen Abschnitten sind diese näher erläutert. Aufgrund der Komplexität der Problemstellungen erfolgte die Abarbeitung nicht immer chronologisch. Hauptziel der Datenrecherche war eine selektive Erfassung von Daten zur Ableitung repräsentativer hydrogeologischer Eigenschaften hydrogeologischer Einheiten, zur Bearbeitung der hydrogeologischen Schwerpunktthemen und als Grundlage der räumlichen Modellierung.

- Literatur- und Material- und Datenbankrecherche und -sichtung und ihre Auswertung
- Feldarbeiten (Abschnitt 2.3)
- Schwerpunktrecherche: Literaturstudie zu Hydraulik und Charakter tiefer Grundwässer in sedimentären Senken (Abschnitt 2.4)

- Erfassung und Abgleich repräsentativer hydrogeologischer Daten im Bereich der VES (Abschnitt 2.5) mit dem Schwerpunkt hydraulische Verhältnisse
- Zusammenfassung des Kenntnisstand Hydrogeologie in der VES mit dem Schwerpunkt tiefe Festgesteinsgrundwasserleiter
- Darstellung und komplexe Interpretation der hydrogeologischen Schwerpunktthemen (Abschnitt 2.6)
 - hydraulische Wirksamkeit von Störungs- und Kluftzonen
 - hydraulischer Zusammenhang zwischen den hydrogeologischen Einheiten in der VES und ihrem Umland
 - Herkunft höher mineralisierter Wässer in der VES
 - Einfluss der Grubenflutungen in Zwickau und Lugau-Oelsnitz auf die Grundwasserdynamik und Grundwasserqualität
 - Grundwasserbeschaffenheit
- Wasserhaushalt in der VES und Bilanzierung in Teilgebieten (Abschnitt 2.7)
- Schwerpunkt Modellierung mit folgenden Aufgaben (Abschnitte 2.9 und 2.10):
 - Erstellung des konzeptionellen hydrogeologisch- hydraulischen Modells der VES
 - Ableitung hydrogeologischer Modelldaten
 - Aufbau des räumlichen hydrogeologischen Modells (GOCAD/GMS)
 - Aufbau des hydraulischen Modells (GMS/FEMWATER)
- Verbindung von Erkenntnissen aus den Schwerpunktthemen (Abschnitt 2.6) und der Modellierung und Ableitung von Aussagen (u.a. Abschnitte 2.9 und 2.10).
- Darstellung der Ergebnisse in Form von Text, Abbildungen, Tabellen und digitalen Modellen

Abbildung 1 zeigt die Beziehungen der einzelnen Arbeitsschritte bzw. Ergebnisse zueinander. Ein Schwerpunkt der Arbeiten war die Entwicklung des konzeptionellen hydrogeologischen Modells im Sinne einer Modellvorstellung hydrogeologisch-hydraulischer Prozesse in der VES. In diesen Zusammenhang ist die Bearbeitung der oben aufgeführten hydrogeologischen Schwerpunktthemen einzuordnen. Aufbauend auf diese Ergebnisse erfolgt auf Grundlage des digitalen hydrogeologischen Modells die Erstellung des digitalen hydraulischen Modells. Die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung tragen ihrerseits rückwirkend zur Weiterentwicklung des konzeptionellen Modells bei.

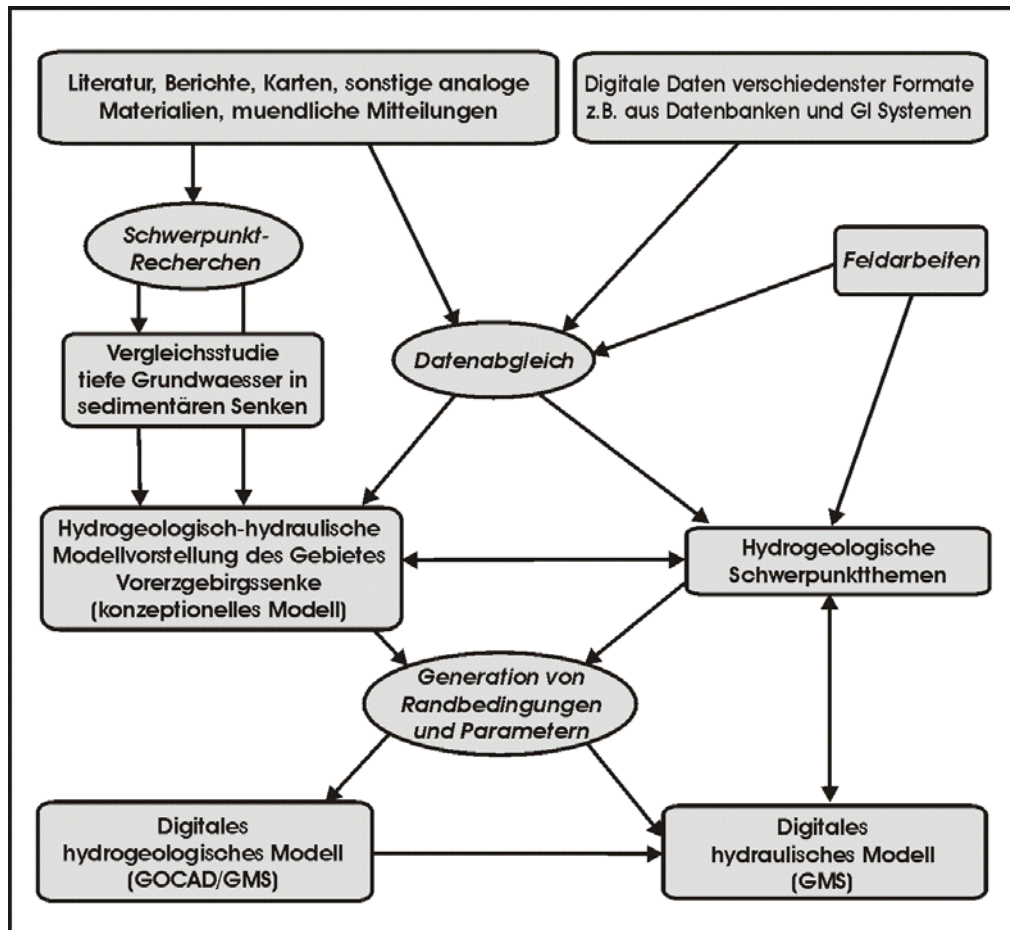


Abbildung 1 Arbeitsablauf Hydrogeologische Analyse und Modellierung der VES

2.3 Feldarbeiten

Feldarbeiten beschränkten sich im wesentlichen auf:

- 5 Probennahmen in der Baugrube am Kornmarkt in Zwickau zur Bestimmung der Grundwasserchemie und des Tritiumgehaltes (Altersbestimmung)
- Aufnahmen geologischer und hydrogeologischer Sachverhalte insbesondere in Zwickau und im Raum Oelsnitz/Lugau
- Aufnahmen bzw. Auswertung von Aufnahmen von Aufschlüssen/Bohrkernen und von ingenieurgeologischen Anlagen (z.B. Absetzanlage Helmsdorf)

2.4 Schwerpunkt-recherche: Literaturstudie zu Hydraulik und Charakter tiefer Grundwässer in sedimentären Senken

Inhalt der Studie war die Recherche und Auswertung von internationaler Literatur insbesondere zur hydrogeologischen Situation und zu hydraulischen Vorgängen in sedimentären Sen-

kenstrukturen weltweit. Dazu wurden ausgewählte hydraulische Mechanismen, Untersuchungsmethoden und Parameter erfasst und ihre Übertragbarkeit auf die Verhältnisse in der VES geprüft. Ziel ist die Nutzung von Forschungsergebnissen aus anderen Senkenstrukturen für die Analyse der hydrogeologischen Verhältnisse im Vorerzgebirgssenkensraum.

Dies ist sinnvoll, da der insgesamt geringe Aufschlussgrad tieferer Schichten der VES und die daraus resultierende geringe Dichte verfügbarer hydrogeologischer Daten eine zufriedenstellende Interpretation der hydrogeologischen Verhältnisse erschwert.

Auswahlkriterium für die Vergleichsobjekte war dementsprechend eine mögliche Übertragbarkeit von Erkenntnissen in den untersuchten Senkenstrukturen auf die Verhältnisse in der VES. Es wurden auch Senkenstrukturen betrachtet, die einen von der VES verschiedenen geologisch-hydrogeologischen Bau aufweisen. Diese Erkenntnisse können für die Diskussion von methodischen Ansätzen, hydraulischen Szenarien und „worst case“ Situationen dennoch von Bedeutung sein.

Die Studie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie basiert fast ausschließlich auf Angaben in englischsprachigen Veröffentlichungen. Die Recherche wurde im Frühjahr 2007 beendet. Eine Kurzdokumentation der Fallstudien ist in Anlage 1 enthalten.

2.5 Erfassung und Abgleich geologischer und hydrogeologischer Daten

Grundlage für die Bearbeitung der hydrogeologischen Schwerpunktthemen und die Erstellung des hydrogeologischen Modells war die Erfassung und der Abgleich hydrogeologischer, geologischer und weiterer Daten im Bereich der VES und den angrenzenden Gebieten. Ausgangspunkt waren die in Zusammenarbeit mit dem Büro für Hydrologie, Ulrich Göttelmann durchgeführten Arbeiten, die in KOLITSCH et al. (2000), GÖTTELMANN (1998), GÖTTELMANN (1999a) und GÖTTELMANN (1999b) (alle unveröffentlicht) detailliert dargelegt sind. Dazu gehören:

1. Zusammenführung der geologischen und hydrogeologischen Informationen aus den unterschiedlichen im Untersuchungsgebiet geführten Datenquellen bzw. -banken
2. Plausibilitätsprüfung der vorhandenen Informationen und Vermeidung von Redundanzen
3. Teilweise Neuerfassung von geologischen/hydrogeologischen Punktdaten
4. Ergänzende Digitalisierung von analogem Kartenmaterial
5. Erstellung von Übersetzungsschlüsseln zwischen der Umweltdatenbank der Wismut GmbH und dem FIS Hydrogeologie des LfUG
6. Synchronisierung der geologischen und wasserwirtschaftlichen Datenbestände im Untersuchungsgebiet
7. Konvertierung des relevanten Datenmaterials in die Formate "shp" (ArcView), "rv" (TNTmips) und Well-object-files (GOCAD), in MS-EXCEL und ACCESS-Dateien und in diverse GMS-Formate.

Darauf aufbauend erfolgte eine Aktualisierung und Vervollständigung der Datengrundlagen für den erweiterten Untersuchungsraum, soweit sie für die vorliegende Arbeit relevant waren.

Die Vielzahl der im Untersuchungsraum durchgeführten hydrogeologischen u.a. Untersuchungen erzeugten eine schwer zu überschauende Menge an Datenmaterial. Die Weiterverarbeitung dieses Datenmaterials und seine Verwendung insbesondere für die räumliche Modellierung stellte hohe datentechnische und auch organisatorische Anforderungen, da in Abhängigkeit von der jeweiligen Zielsetzung die Informationen in unterschiedlicher Genauigkeit und Fokussierung erhoben wurden. Die Ausführungen in den Abschnitten 2.5.1 bis 2.5.4 erläutern zusammenfassend die Bearbeitung der verwendeten Datenbanken und weiterer wichtiger Daten. Die aus externen Quellen stammenden Datenbanken bzw. digitalen Daten sind in Tabelle 2 zusammenfassend aufgelistet.

Tabelle 2 Externe Datenbanken und weitere wichtige Datenquellen

Nr.	Thema	Datenherkunft	Format, z.T. spezifiziert
1	Grund-, Stamm- und Schichtdaten geologischer Aufschlüsse, Sachsen	LfUG, FIS Hydrogeologie	dBase, MS Access, Akten
2	GW-Stands- und Beschaffenheitsdaten	LfUG, FIS Grundwasser	MS Access, Excel
3	Grundmessnetz/ Quellen	LfUG, FIS Grundwasser	MS Access
4	Verdichtungsmessnetz	LfUG, FIS Grundwasser	MS Access
5	Lokale Grundwasserbeschaffenheits und sonstige hydrogeologische Daten	LfUG	MS Excel, Word, analog
6	Grund- und Schichtdaten geologischer Aufschlüsse, Thüringen	TLUG, Aufschlussdaten, GW-Stands- und Beschaffenheitsdatenbanken	MS Excel
7	Schichtdaten-Informationen	TLUG, Aufschlussdatenbanken	MS Excel
8	GW-Stands- und Beschaffenheitsdaten	TLUG	MS Access, Excel
9	Sondermessnetz Zwickau Oelsnitz	Büro für Hydrologie, IS Hydrochem.	MS Access
10	Aufschlussdaten Umweltdatenbank Wismut	Wismut /LfUG Abt. Strahlenschutz	MS Excel
11	GW-Messstellen Umweltdatenbank Wismut	Wismut /LfUG Abt. Strahlenschutz	MS Excel
12	Kartengrundlage TK 25	Landesvermessungsamt/LfUG	analog, TIFF
13	Digitale geographische Karten M 1:50.000	Top 50, Fa. Daimler Benz Aerospace	GEOGRID, Fa. Dornier
14	Digitales Geländemodell, DGM 500	Landesvermessungsamt	ASCII
15	Digitales Höhenmodell, DHM M745	Landesvermessungsamt	ASCII
16	Schächte im Revier Oelsnitz	Fa. C&E	MS Access
17	Schächte im Revier Zwickau	BAF, Schneider	txt, GOCAD
18	Grenzen Bergbau, Zwickau	BAF, Kater	rcv, TNTmips
19	Geologische Schichtinformationen	GFE	analog
20	GWN nach GEOFEM 2000, 2003, 2004	LfUG	digital, analog
21	GWN, natürlich, Raum Zwickau-Oelsnitz	Fa. WASY	gwn_nat.e00
22	GWN, urban, Raum Zwickau-Oelsnitz	Fa. WASY	gwn_urb.e00
23	Teileinzugsgebiete Raum Zwickau-Oelsnitz	Fa. WASY	fgw.e00, teg.e00
24	Oberirdische Einzugsgebiete LfUG	LfUG	ArcView
25	Daten zu Wasserentnahmen und Einleitungen Oberflächenwasser, Grundwasser	LfUG	MS Excel, Word, ArcView
26	Daten zu Pegeln und Vorflutern, Gebietskennzahlen, Gewässerkundliche Werte	LfUG	MS Excel, pdf, ArcView
27	Hydroisohypsen, weitere GW-Standsdaten	HK50 und LfUG Sachsen	analog, txt
28	Informationen Grundwasserdynamik	HK50, diverse Gutachten	analog
29	Daten zur Schutzfunktion der GW-Überdeckung 1:50.000, Sachsen	LfUG	ArcView, dBase
30	Hydrogeol. Kartierung 1:200.000, Sachsen	LfUG	ArcView, dBase
31	Hydrogeol. Kartierung und Schutzfunktion der GW-Überdeckung 1:200.000, Thüringen	TLUG	ArcView, dBase

2.5.1 Datenquellen (vgl. Tabelle 2)

Hydrogeologische und geologische Datenbanken

Ein großer Teil der Aufschlussdaten stammt aus den Datenbanken des FIS Hydrogeologie und Grundwasser des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (LfUG). In diese Datenbanken fließen unmittelbar auch die Ergebnisse aus vielen anderen Untersuchungen im sächsischen Bereich der VES ein. Für den Bereich der zentralen Vorerzgebirgssenke wurden zahlreiche Datensätze (z.B. Schachtdaten) durch den Autor in die landesamtliche Datenbank eingearbeitet.

Weiterhin fanden Teile der von der Wismut GmbH geführten Umweltdatenbank und die im Rahmen eines Projekts der Bundesstiftung Umwelt erhobenen Schachtdaten aus dem Raum Oelsnitz (C&E 1997) sowie Aufschlussdaten der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) Verwendung. Diese Datenbanken wurden durch Daten, die bei anderen Projekten der TU Bergakademie Freiberg erfasst wurden ergänzt. 60 Datensätze zu Schachtaufschlüssen im Lugau-Oelsnitzer Steinkohlenrevier wurden für das FIS Hydrogeologie neu erfasst (Tabelle 3).

Da die Datenbanken in unterschiedlichen Formaten geführt werden, mussten sie in einheitliche geeignete Formate zur Nutzung im GOCAD- bzw. GMS-Modell überführt werden.

Vor ihrer Übernahme und Bearbeitung wurden die Datenbanken einer Plausibilitätsprüfung und gegebenenfalls auch Korrektur unterzogen.

Abfrage 2006 aus dem FIS-Hydrogeologie Sachsen

Im August 2006 wurde auf Anfrage des Autors, durch das LfUG Freiberg (DUTELOFF 2006) eine Abfrage aus dem FIS-Hydrogeologie für den weiteren Vorerzgebirgssenkensraum und Umland bereitgestellt. Dabei wurden zu rund 28.000 Aufschlüssen Grund- und Schichtdaten, Grundwasserinformationen sowie hydrogeologische Untersuchungsergebnisse in Form von dbase-Dateien generiert. Diese Datensätze wurden vom Autor zunächst in Access-Datenbanken und Excel-Tabellen überführt und aufbereitet. Auskopplungen aus den aufbereiteten und evaluierten Datensätzen bzw. Datenbanken wurden dann für die Modellierung in GMS verwendet (Abschnitt 2.10).

Abfrage 2007 aus Datenbanken der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie

Auf Anfrage des Autors wurden für den nordwestlichen Teil des Modellgebietes Aufschlussdaten durch das TLUG zur Verfügung gestellt (TLUG 2006, 2007). Dabei handelt es sich um Aufschlussdaten aus Grundwasserstands- und Beschaffenheitsdatenbanken sowie um Angaben zur Lage des Rotliegenden, Zechsteins und Buntsandsteins im Bereich der Zeitz-Schmöllner Mulde.

Daten aus der sogenannten „Komplexuntersuchung“

Die Ergebnisse der Komplexuntersuchung zu den Auswirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus im Raum Oelsnitz-Zwickau sind in Brause (1999) zusammengefasst.

Wasserhaushaltsuntersuchungen im Raum Zwickau-Oelsnitz (WASY 1998)

Die Arbeiten der Fa. WASY GmbH (WASY 1998) erbrachten bereits digitalisierte raumbe-

zogene Daten zu den Themenbereichen natürliche und urbane GWN, Gewässernetz und oberirdische Einzugsgebiete, die teilweise in die Struktur der verwendeten geographischen Informationssysteme und weiter in die GIS-Modellierungsprojekte übernommen wurden.

Sondermessnetz Zwickau-Oelsnitz (SMN ZO)

Im Rahmen der Aufarbeitung des SMN ZO mussten einige Aufschlüsse bzw. Bohrungsdaten korrigiert oder neu erfasst werden. Hierbei handelte es sich überwiegend um Aufschlüsse aus dem Grundwassermonitoring Bockwaer Senke der Erzgebirgischen Steinkohlen-Energie-Gesellschaft mbH, Betriebsteil Kraftwirtschaft (ESTEG mbH) und Brunnen des Regionalen Zweckverbandes Wasserversorgung Lugau Glauchau. Insgesamt sind 183 Datensätze für das FIS Hydrogeologie in UHYDRO neu erfasst bzw. ergänzt worden (Tabelle 3).

Tabelle 3 In UHYDRO neuerfasste oder korrigierte Datensätze

Datensatz FIS Hydrogeologie	Daten	
	neu erfasst	korrigiert
Grunddaten geologischer Aufschlüsse (GA_)	31	
Stammdaten geologischer Aufschlüsse (HST)	31	28
Schichtdaten (HSH)	57	
Bohrlochausbau (HAB)	28	1
Ringraumhinterfüllung (HRI)	15	1
Grundwasser-Information beim Bohrvorgang (HGW)	2	

Grundwasserstandsdaten

Grundwasserstandsdaten bzw. aus diesen erstellte Grundwassergleichenpläne wurden im Rahmen dieser Arbeit wie folgt verwendet.

Grundwasserstandsdatenbank

Für die Kalibrierung des numerischen Grundwasserströmungsmodells (Abschnitt 4.9.5) wurden Daten großräumiger Stichtagsmessungen (weiterer Vorerzgebirgssenkraum) benötigt. Dazu wurde beim LfUG Dresden und dem TLUG Jena ein Auszug der gebietsbezogenen Grundwasserstandsdatenbank angefordert und bereitgestellt (ERNST 2006, TLUG 2007). Diese beinhalten für das Modellgebiet rund 112 Grundwassermessstellen mit i.d.R. wöchentlich ermittelten Grundwasserständen.

Dabei handelt es sich jedoch um Messstellen in verschiedenen hydrogeologischen Einheiten, und mit unterschiedlicher Zuverlässigkeit der Messstellenparameter (z.B. in Bezug auf die Filterlage) was eine entsprechende Evaluierung und datenbankmäßige Aufbereitung für die Nutzung im numerischen Modell erforderte.

Grundwassergleichenpläne und Informationen zur Grundwasserdynamik

Zur Abgrenzung und Diskussion der unterirdischen Einzugsgebietsgrenzen (Abschnitte 2.7.2 und 4.4.2) wurde i.d.R. auf bereits vorhandene Hydroisohypsenkarten zurückgegriffen. Die im Rahmen der hydrogeologischen Kartierung der DDR (ZGI 1984) im Maßstab 1:50.000 erstellten Hydroisohypsenpläne waren für den Bereich der Vorerzgebirgssenke jedoch nur

lückenhaft vorhanden. Es wurden neben Erkenntnissen aus neueren landesamtlichen Kartierungen (HÜBSCHMANN 2006, HYK50 2006, HÜK200 2006) auf weitere Unterlagen einschließlich kleinräumigerer Bearbeitungen zurückgegriffen (z.B. VEB HYDRO 1972-1982 und Arbeiten im Bereich Zwickau und Mülsengrund). Es verblieben dennoch Gebiete in denen keine zuverlässigen und in das Gesamtbild einordbaren Grundwassergleichen ermittelt werden konnten. Hier stellten in Bezug auf den Verlauf der unterirdischen Einzugsgebiete die oberirdischen Einzugsgebietsgrenzen sowie geologische andere Informationen eine Interpretationsgrundlage dar (Abschnitt 2.7.2).

Grundwasserbeschaffenhheitsdaten

Neben Daten aus verschiedenen unveröffentlichten Gutachten und Berichten fanden insbesondere Beschaffenhheitsdaten aus den Grundwasserbeschaffenhheitsdatenbanken des LfUG Sachsen (ERNST 2006) und der Thüringer LUG (TLUG 2006, 2007) Verwendung.

Hydrologische Daten

Verzeichnis und Wasserstände der Pegel von Fließgewässern sowie Daten zu den Einzugsgebieten der Vorfluter wurden vom LfUG Sachsen über deren öffentliches Internetportal bereitgestellt (HHB 2002). Ein Teil der Daten wurde darüber hinaus in digitaler Form zur Verfügung gestellt (WALTHER 2006).

Grundwasserneubildungsdaten

Grundwasserneubildungshöhen wurden mit der landesamtlichen Programmsoftware GEOFEM teilweise vom Autor berechnet (Version 2000) bzw. als Ergebnisse vom LfUG Dresden zur Verfügung gestellt (Versionen 2003 und 2004) (vgl. Abschnitt 4.4.3).

Digitales Geländemodell und topographische Karten

Arbeitsgrundlage für die Interpretation von Punkt- und Flächendaten und die Modellierung wurden die entsprechenden Topographischen Karten TK 25 der Sächsischen und Thüringischen Landesvermessungsämter verwendet (TK 25 (N) 1998, TTK 25 (N) 1998). Weiterhin wurden Punktdaten des digitalen Höhenmodells DHM_745 und des digitalen Geländemodells DGM_500 (LVA 1999) zur dreidimensionalen Modellierung der Geländeoberfläche verwendet. Zur Modellvisualisierung fand das digitale geographische Kartenwerk Top50 (TOP50 1999) mit Karten der deutschen Landesvermessung Verwendung.

Analoge Materialien und Kartengrundlagen

Geologische, tektonische, hydrogeologische und hydrologische Informationen wurden als analoge Karten in die Auswertungen einbezogen, interpretiert und in Einzelfällen auszugsweise digitalisiert und im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet.

Es fanden zahlreiche veröffentlichte und unveröffentlichte Arbeiten, Bücher, Gutachten und Berichte zum Untersuchungsgebiet Verwendung.

2.5.2 Synchronisierung (Durchführung Herr Göttelmann)

Die Synchronisierung der Altdatenbestände (vor 2000) wurde im Rahmen eines gemeinsamen Projektes durch Herrn Göttelmann, Konstanz realisiert (vgl. GÖTTELMANN 1999b). Während der Datenerfassung zeigte sich eine große Diskrepanz zwischen den Angaben im FIS Hydrogeologie und im FIS Grundwasser. Um diese zu beheben wurde ein Abgleich der Grunddaten geologischer Aufschlüsse (GDA) mit dem Datenspeicher FIS Grundwasser (DSPGW), eine sogenannte Synchronisierung durchgeführt. Hierzu wurden zunächst die Messstellen des DSPGW nach Messnetzen (Grund-, Quellen-, Verdichtungs- und Beschaffenheitsmessnetz) getrennt und in verschiedenen Themen abgelegt. Danach wurde untersucht, welche Aufschlüsse der GDA identische Koordinaten mit dem DSPGW besitzen. Um identische Aufschlüsse mit Abweichungen in den Koordinaten ermitteln zu können, wurden alle GDA, die in einem 50m Puffer (100m bei Quellen) um die Messstellen des DSPGW liegen selektiert. Soweit sinnvoll wurden die als identisch identifizierten Aufschlüsse bzw. Messstellen miteinander verknüpft und ein entsprechender „Korrekturdatensatz“ erzeugt.

2.5.3 Plausibilitätsprüfungen und Datenkonvertierungen

Plausibilitätsprüfungen fanden auf mehreren Ebenen der Datenübernahme und im Rahmen der Datenaufbereitung und –selektion statt und werden an entsprechender Stelle genannt bzw. durch Literaturangaben belegt. So wurden z.B. im Rahmen der Datenkonvertierungen in GOCAD (Abschnitt 2.9) und GMS (Abschnitt 2.10) anhand diverser Filter-, Aufbereitungs- und Konvertierungsarbeiten Plausibilitätsprüfungen durchgeführt. Treten bei diesen Operationen Inkonsistenzen im Datenmaterial wie z.B. Namens- oder Lagedoppelungen, fehlende (Schicht-) daten oder Teufenfehler auf, werden sie anhand programmierter Fehlerabfragen ausgewiesen. Letztlich erfolgte die Überprüfung der Plausibilität auch interpretativ in den Modellen selbst.

Die Konvertierung diverser Ausgangsdaten unterschiedlicher Qualität und Relevanz für die Verwendung in den Modellierungsprogrammen GOCAD und GMS sind in Abschnitten 2.9 (GOCAD) und 2.10 (GMS) beschrieben.

Für die Übernahme der geologisch und hydrogeologisch relevanten Daten aus der Umweltdatenbank der Wismut GmbH in das FIS Hydrogeologie des LfUG für die Verwendung GOCAD mussten noch deren verschlüsselten Referenztabelle übersetzt, in die Prüftabelle des Erfassungsprogramms UHYDRO umgesetzt und digital zur Verfügung gestellt werden (GÖTTELMANN 1999b).

Die Übernahme von Datenmaterial in die GI Systeme TNTmips und ArcView als Grundlage für die weitere Aufbereitung, Interpretation und Überführung in GOCAD und GMS konnte teilweise mit den in den Programmen implementierten Standardschnittstellen erfolgen. Häufig waren jedoch vorherige Formatierungen und Anpassungen in Editoren notwendig.

2.5.4 Überblick, Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Herkunft und Weiterverarbeitung der verwandten digitalen Daten zeigt Tabelle 2. Obwohl versucht wurde alle relevanten Daten in die Auswertung einzubeziehen sind einige Einschränkungen zu nennen aus denen Vorschläge abgeleitet werden können:

- Der Zeitpunkt der Bereitstellung, Aufnahme und/oder Erstellung der Informationsinhalte ist nicht für alle Datenquellen gleich. Es werden also Daten von unterschiedlichem Aktualitätsgrad miteinander verschnitten und interpretiert.
- Die Qualität des Informationsinhaltes ist bei den verschiedenen Datenquellen sehr unterschiedlich (z.B. die Angaben zu den Filterlagen).
- Zahlreiche Daten sind selbst Interpretationen unterschiedlicher Qualität. Für die in ihnen enthaltenen Experteninformationen liegen häufig keine vollständigen Datengrundlagen vor.
- Datentransformationen führen häufig zwangsläufig zu einem Verlust von Informationen (Ausdünnung der Daten, Zusammenfassungen). Hier sind insbesondere bei Datenbankabfragen Weiterentwicklungen notwendig. Das betrifft z.B. Abfragen bzw. Auswertungen der Aufschlussdatenbanken (vgl. Abschnitt 2.9).

Eine Schaffung bzw. Weiterentwicklung von Schnittstellen zwischen FIS, (GOCAD), GMS ist zu empfehlen, um die Modelle effektiv und in hoher Qualität an aktualisierte Datenbestände anzupassen. Auch die Erstellung neuer Struktur- und Parametermodelle als Grundlage numerischer Grundwassermodellierungen in GMS z.B. auf Grundlage von FIS Bohrlochdaten kann so erheblich vereinfacht werden.

- Übertragung von in FIS erfassten Primärdaten in GMS, z.B. Schichtdaten aus FIS in Bohrlochdaten in GMS
- Weiterentwicklung der Schnittstelle FIS - GOCAD – GI-Systeme, insbesondere zur Rückführung von in GOCAD generierter sekundärer Daten in GI-Systeme, z.B. durch datenbankgestützte Kopplung geologischer Raummodelle mit 3D-GI-Systemen (z.B. Apel 2005)
- Erstellung einer kombinierten Import/Export-Schnittstelle zur Generierung eines separaten Datensatzes in FIS-Hydrogeologie auf Grundlage in GOCAD oder GMS gewonnener interpretativer Ergebnisse, die als solche auszuweisen sind.

In diesem Sinne bildet die datenbankgestützte Verarbeitung geologischer Informationen und ihre Kopplung an GI-Systeme und/oder die Kopplung an komplexe geologische Modelle Schwerpunkte oder Teile diverser (Forschungs-)arbeiten, wie z.B. KAISER (2003), APEL (2004), SCHENDEL (2005), MELZER (2005) und FELIX et al. (2006).

2.6 Schwerpunktthemen zur Hydrogeologie und Hydrochemie

Neben der Einarbeitung der eigenen Ergebnisse aus Feldbeobachtungen und Probennahmen wurden umfangreiche Literaturrecherchen zu folgenden Schwerpunktthemen durchgeführt:

- hydraulische Wirksamkeit von Störungs- und Kluftzonen
- hydraulischer Zusammenhang zwischen den hydrogeologischen Einheiten in der VES und ihrem Umland
- Herkunft höher mineralisierter Wässer in der VES
- Einfluss der Grubenflutungen in Zwickau und Lugau-Oelsnitz auf die Grundwasserdynamik und Grundwasserqualität
- Grundwasserbeschaffenheit

Die Ergebnisse wurden zusammenhängend dargestellt und ausgewertet, mit den Erfahrungen aus anderen Senkenstrukturen weltweit verglichen, systematisiert und interpretiert. Die Interpretationsergebnisse wurden anschließend in die konzeptionellen Modellvorstellungen (Abschnitt 4.7) und die digitalen Modelle der Vorerzgebirgssenke (Abschnitte 4.8 und 4.9) integriert. Die Ergebnisse der digitalen Modellierung gingen rückwirkend als Annahmen und Interpretationsmöglichkeiten in die Ergebnisse zu den Schwerpunktthemen ein.

2.7 Unterirdischer Wasserhaushalt

Ein Anliegen dieser Arbeit war die Analyse des unterirdischen Wasserhaushaltes in der Vorerzgebirgssenke im Regionalmaßstab. Dazu sollten der Einfluss verschiedener Faktoren auf den Grundwasserhaushalt abgeschätzt werden. Es erfolgte die Ermittlung langjähriger mittlerer Wasserhaushaltsdaten sowie eine vergleichende Bilanzierung für exemplarische Einzugsgebiete, im folgenden auch Bilanzgebiete genannt.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten flossen in die Bearbeitung der Schwerpunktthemen und in die Erstellung des konzeptionellen und des hydraulischen Modells der Vorerzgebirgssenke ein. Die Arbeiten gliederten sich wie folgt:

- Aufstellung der Grundwasser-Haushaltsgleichung
- Abschätzung von Einfluss- und Störgrößen auf die unterirdischen Einzugsgebiete und den unterirdischen Wasserhaushalt
- Diskussion der unterirdischen Einzugsgebiete
- Ermittlung der Grundwasserneubildung u.a. mit GEOFEM in den Programmversionen 2000, 2003 und 2004 für Einzugsgebiete 5. Ordnung in der VES
- Abgrenzung von Bilanzgebieten anhand geeigneter Messstellen
- Ermittlung des langjährigen mittleren Niedrigwasserabflusses (Basisabfluss, MNQ) und der Grundwasserneubildung für die Bilanzgebiete mit GEOFEM 2000, 2003 und 2004 und nach weiteren Verfahren (NASIM, GEOFEMLAW, experimentell (Lysimeter), GWD)
- Vergleich der Grundwasserneubildung in den Bilanzgebieten mit dem entsprechenden Basisabfluss
- Interpretation und Schlussfolgerungen

2.7.1 Grundgleichungen zur Beschreibung des unterirdischen Wasserhaushaltes

Bei der Berechnung des unterirdischen Wasserhaushaltes der Vorerzgebirgssenke und ihrer Bilanzgebiete kann für lange Zeiträume zunächst von der hydrologischen Grundgleichung (1) ausgegangen werden, wobei N dem Niederschlag, V der Verdunstung und A dem Abfluss entspricht.

$$(1) \quad N = A + V$$

Für kürzere Zeiträume ist eine Untergliederung der hydrologischen Grundgleichung notwendig. Der Abfluss A unterteilt sich dabei in den oberirdischen (A_o) und unterirdischen (A_u) Abfluss. Des weiteren werden der oberirdische (Z_o) und unterirdische (Z_u) Zufluss berücksichtigt. Eingang finden auch die realen Evapotranspiration (RET) sowie die Speicheränderung im Sickerwasser (ΔS) und Grundwasser (ΔGW). Diese Wasserhaushaltsgleichung kann wie folgt aufgestellt werden (2).

$$(2) \quad N + Z_o + Z_u = A_o + A_u + RET + \Delta S + \Delta GW$$

In anthropogen beeinflussten Gebieten sind dabei ggf. künstliche Entnahmen bzw. Infiltrationen zu berücksichtigen.

Zentrales Problem sind einige in der Regel nicht direkt messbaren Teilglieder der Gleichung, wie z.B. Zu- und Abströme und Speicheränderungen sowie der begrenzte Kenntnisstand zu den hydrologischen Größen. Für die in der vorliegenden Arbeit durchgeführte indirekte Abschätzung der Grundwasserneubildung für einzelne Einzugsgebiete aus dem Basisabfluss (Abschnitt 2.7.3) soll die Wasserhaushaltsgleichung (2) daher vereinfacht werden. Dazu werden folgende Festlegungen/Annahmen getroffen:

- Es werden nur vollständige unterirdische Einzugsgebiete betrachtet. Der unterirdische Zufluss (Z_u) und Abfluss (A_u) ist daher vernachlässigbar ($Z_u=0$, $A_u=0$).
- Es werden lange Zeiträume betrachtet. Die Speicheränderung im Grund- (ΔGW) und Sickerwasser (ΔS) ist daher vernachlässigbar ($\Delta GW=0$, $\Delta S=0$).
- anthropogene Entnahmen bzw. Infiltrationen aus dem Grund- und Oberflächenwasser werden zunächst nicht betrachtet (ungestörte Grundwasserverhältnisse)

Es ergibt sich so eine vereinfachte Wasserhaushaltsgleichung (3) die nach Gleichung (4) umgestellt werden kann. $N - RET$ entspricht dabei der Grundwasserneubildung (GWN) (5)

$$(3) \quad N + Z_o = A_o + RET$$

$$(4) \quad N - RET = A_o - Z_o$$

$$(5) \quad GWN = N - RET$$

Die Grundwasserneubildung kann danach vereinfacht als Differenz zwischen oberirdischem Abfluss und oberirdischem Zufluss beschrieben werden (6).

$$(6) \quad \text{GWN} = A_o - Z_o$$

$$(7) \quad A_o - Z_o = Q_0$$

$$(8) \quad \text{GWN} = Q_0$$

Unter Berücksichtigung der oben genannten vereinfachenden Annahmen entspricht die natürliche Grundwasserneubildung also in etwa dem langjährigen mittleren Niedrigwasserabfluss, auch Basisabfluss (Q_0) (7) (8) genannt. Die Bestimmung des Basisabflusses wird in der vorliegenden Arbeit für ausgewählte Bilanzgebiete durchgeführt. Die so ermittelte Grundwasserneubildung wird dann mit jener nach anderen Berechnungsvarianten verglichen (Abschnitt 2.7.3).

2.7.2 Vorgehensweise bei der Abgrenzung unterirdischer Einzugsgebiete

Die Ausweisung der unterirdischen Einzugsgebiete ist Voraussetzung für die Bestimmung der Teilmglieder der Grundwasser-Haushaltsgleichung. Es wurde deshalb versucht, bestmögliche Anhaltspunkte für eine genau Abgrenzung zu finden, Defizite zu formulieren und die Ergebnisse zusammenfassend darzustellen.

Die Diskussion der Einzugsgebietsgrenzen erfolgte auf Grundlage einer Daten- und Literaturrecherche. Eigenständige Untersuchungen oder Datenerhebungen waren nicht vorgesehen. Wichtigste Informationsquellen waren die Hydrogeologischen Übersichtsgutachten der Kreise Zwickau, Stollberg, Hohenstein-Ernstthal, Chemnitz, Werdau und Glauchau (VEB HYDRO 1977-1982), der Hydrogeologische Bericht Stangendorf (VEB HYDRO 1972) für den Mülsengrund, die Berichte und Materialien zur Hydrogeologischen Kartierung 1:50 000 des LfUG (GEOS & HGC 2000, HÜBSCHMANN 2006, HYK50 2006, HÜK200 2006) sowie unveröffentlichte Gutachten und Berichte zu Kleinprojekten (Brunnenplanungen, Bau- und Sanierungsvorhaben usw.) im Raum Zwickau-Ost, Lichtenstein, Rödlitz, Hohndorf, Gersdorf, Glauchau, Hohenstein-Ernstthal und Ost-Oelsnitz. Die folgende Vorgehensweise wurde angestrebt:

1. Soweit plausibel wurde der Verlauf der unterirdischen Wasserscheiden aus der Literatur übernommen, bzw. aus vorhandenen Grundwasser-Gleichenplänen abgeleitet. Dies betraf im wesentlichen Angaben in den Hydrogeologischen Übersichtsgutachten der Kreise und Projektberichte zum Gebiet Lungwitz- und Mülsenbach und neuere landesamtliche Unterlagen
2. Lagen keine verlässlichen Angaben zum Verlauf der Grundwasserscheiden vor, stellten zunächst die oberirdischen Einzugsgebiete aus WASY (1998), WALTHER (1999) und KRAUSE (2003) eine Arbeitsgrundlage dar. Nach Auswertung der hydrogeologisch-strukturellen Verhältnisse und Berücksichtigung vorhandener Hinweise und Indizien aus der hydrogeologischen Analyse wurden dann, ggf. von den oberirdischen Einzugsgebieten abweichende, unterirdische Einzugsgebiete abgegrenzt.
3. Von der Annahme: Oberirdisches Einzugsgebiet = Unterirdisches Einzugsgebiet ($A_{Eu}=A_{Eo}$) wurde ausgegangen wenn keine weiteren Anhaltspunkte zur Verfügung standen und dies plausibel schien. Dies betrifft insbesondere Gebiete flacher geologischer Lagerung, häufig im Bereich der Gera-/ Mülsen-Folge.

2.7.3 Grundwasserneubildung und Wasserhaushaltsdaten

Die Berechnung der GWN wurde für alle oberirdischen Einzugsgebiete (EZG) 5. Ordnung (Umrissdaten aus WALTHER 1999, KRAUSE 2003) sowie für ausgewählte Bilanzgebiete (siehe unten) im Bereich der VES durchgeführt. Im Raum Zwickau-Oelsnitz wurden auch von WASY (1998) bzw. HGN (1996a) erarbeitete Einzugsgebietsgrenzen verschiedener Größenordnung in die Betrachtungen einbezogen. Wesentliche Abweichungen zwischen den Grenzverläufen der EZG aus verschiedenen Quellen gibt es nur in den urbanen Bereichen, vor allem in Zwickau (Einzugsgebiet Zwickauer Mulde i.e.S.). Ursachen der Abweichungen sind die unterschiedlichen Ableitungen des Verlaufes der EZG aus den Bebauungs- und Kanalisationsverhältnissen im Stadtbereich. Für den in dieser Arbeit betrachteten regionalen und überregionalen Wasserhaushalt sind diese Abweichungen nicht von Bedeutung.

Die für die Diskussion und Auswertung verwendeten Angaben zur Grundwasserneubildung beruhen auf verschiedenen Berechnungsverfahren und stammen von unterschiedlichen Bearbeitern. Um in der vorliegenden Arbeit den Bezug auf das jeweilige Verfahren / den jeweiligen Bearbeiter zu erleichtern werden sie als zusammenfassend als Verfahren 1 bis 4 zitiert, die im folgenden eingehender erläutert werden.

Grundwasserneubildung nach GEOFEM 2000, 2003 und 2004 (Verfahren 1)

Für alle oberirdischen Einzugsgebiete 5. Ordnung im Bereich der Vorerzgebirgssenke sowie für die abgegrenzten Bilanzgebiete (siehe unten) wurde die Grundwasserneubildung und weitere hydrologische und hydrogeologische Parameter mit dem Programm GEOFEM in den Versionen 2000, 2003 und 2004 ermittelt (GEOFEM 1994, 2000, 2003, 2004, ZWEIG 2006a).

Bei Angaben der GWN nach GEOFEM handelt es sich, wenn nicht anders angegeben, um Berechnungen mit der neuesten Version GEOFEM 2004. Die Berechnungen erfolgten am Standort des Programminhabers, des Landesamtes für Umwelt und Geologie in Dresden. Die Berechnungen mit GEOFEM 2000 wurden größtenteils vom Autor selbst, die späteren Berechnungen mit GEOFEM 2003 und 2004 von Mitarbeitern des LfUG durchgeführt. Die entsprechenden Zu- und Nacharbeiten sowie weiterführende Auswertungen und Interpretationen leistete der Autor. Die vollständigen Berechnungsergebnisse mit GEOFEM 2000 sind in KOLITSCH et al. (2000) aufgeführt.

GEOFEM ist ein raumbezogenes Informations- und Datenbanksystem auf WINDOWS Oberfläche unter ArcView mit Zugriff auf eine ORACLE-Datenbank. Es beruht auf wasserhaushaltlichen Daten (Bezugsreihen 1951/75 bzw. 1961/90) sowie auf Feld- und Forschungsarbeiten vom Ende der 70er und Anfang der 80er Jahre zu den speziellen wasserhaushaltlichen Zusammenhängen in den Festgesteinsbereichen der ehemaligen DDR. Seit Ende der 90er Jahre wird GEOFEM kontinuierlich weiterentwickelt, optimiert und aktualisiert. Mit der Untersuchung des Systemverhaltens der Teileinzugsgebiete ging eine Überarbeitung des grundlegenden N-A-U Kartenwerkes M 1 : 200 000 (GEOFEM 2000) und die Einführung einer auf Gauss-Krueger Koordinaten basierenden räumlichen Datenverwaltung (ab Version 2003) einher (GEOFEM 2003).

Ziel der Programmentwicklung war die Berechnung des mittleren langjährigen Abflusses für

weitgehend anthropogen ungestörte Verhältnisse unter Berücksichtigung des Wasser- und Wärmehaushaltes von Standorten und Gebieten. Auf Grundlage vorhandener Programme zur Wasserhaushaltsberechnung für den Lockergesteinsbereich wurde zwischen 1981 und 1985 insbesondere für Festgesteinsbereiche das Modellsystem GEOFEM^{LAW} entwickelt (GABRIEL et al. 1984, 1986). 1993/94 wurden zunächst für das Land Thüringen alle Einzelprogramme in das Gesamtmodell GEOFEM integriert. 1994/95 wurde GEOFEM^{LAW} auf den Freistaat Sachsen erweitert. Ab 2000 ist es als Windows-Variante (GEOFEM 2000) verfügbar. Eine verbesserte Version (GEOFEM 2003) ist seit 2003 in Anwendung. Sie umfasst Änderungen und Erweiterungen der Berechnungsalgorithmen, weitgehend digitale Datengrundlagen sowie ein deutlich erhöhtes verwertbares Datenvolumen (Tabelle 4). Darüber hinaus sollen die gleich strukturierten Raster der Berechnungseinheiten (BE) und gleiche Berechnungsalgorithmen mit einheitlichen Datenbeständen in den Randbereichen eine vergleichbare übergreifende Berechnung der Grundwasserhaushaltsdaten für Sachsen und Thüringen ermöglichen.

Seit 2004 ist die nunmehr aktuelle Version GEOFEM (2004) in Testbetrieb. Sie greift im Gegensatz zu den bisherigen Versionen (GEOFEM 2000 – 2003) auf veränderte Berechnungsalgorithmen sowie auf vollständig digitale Datengrundlagen zurück.

GEOFEM ermittelt die mittleren wasserhaushaltlichen Daten für beliebige Flächen. Die zugrunde liegenden Berechnungsalgorithmen beziehen sich jedoch auf die einzelnen Einzugsgebiete des Festgesteinsbereiches. Die Berechnungen erfolgen für sogenannte Berechnungseinheiten (BE, vgl. Tabelle 4), was die Berücksichtigung spezieller Gebietseigenschaften (z.B. Hangneigung oder Bodennutzung) für die jeweilige Berechnungseinheit ermöglicht. Eingangsdaten sind rasterbezogene Gebietsparameter wie Geländehöhe, Hangneigung, Azimut, Bodennutzung, Gewässerzahl und langjährige mittlere Niederschläge. Die Signifikanz der mit GEOFEM ermittelten wasserhaushaltlichen Daten, insbesondere der Versionen 2000 und 2003 wird durch die z.T. relativ alte Datenbasis (Bezugsreihe 1951/75) gemindert. In GEOFEM 2004 werden neben digitalen Grunddatensätzen für Geländemodell, Flächendaten, hydrogeologische und bodenkundliche Daten auch aktuellere Niederschlagsreihen (1961/1990) verwendet (ZWEIG 2006a). Neben dem korrigierten Gebietsniederschlag, der potenziellen und realen Verdunstung, und dem potenziellen Gesamtabfluss wird die **Grundwasserneubildung** ermittelt. GEOFEM 2000 und 2003 berechnen primär sowohl die schnelle (Zwischenabfluss) als auch langsame Komponente der Grundwasserneubildung. In GEOFEM 2004 wird aufgrund von verbleibenden Problemen bei der Abgrenzung beider Komponenten und der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auf die direkte Berechnung des Zwischenabflusses verzichtet. Dieser kann hier überschlägig als Summe aus Menge Gesamtabfluss und Sickerwasser minus Direktabfluss ermittelt werden (ZWEIG 2006a).

Die Berechnungsmethodik von GEOFEM 2004 wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (HECKEL 2005) einer Validierung unterzogen. Dabei wurden zahlreiche Defizite festgestellt, die eine weitere Optimierung des Programms erfordern. Dennoch erwiesen sich die letztlich berechneten Werte für die Grundwasserneubildung im wesentlichen als plausibel.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die nach den GEOFEM-Versionen 2000, 2003 und 2004 ermittelten Ergebnisse für die GWN für unterschiedliche Einzugs- bzw. Bilanzgebiete miteinander sowie mit weiteren Varianten der GWN-Berechnung (Verfahren 2 bis 4)

verglichen. Neben Aussagen zur unterschiedlichen Wirkungsweise der einzelnen GEOFEM-Versionen, dient dies einerseits der Festlegung der Schwankungsbreite des Parameters GWN als Randbedingung für das hydraulische Modell (Abschnitt 4.9.4.2). Andererseits liefern diese Vergleiche variierende Anhaltspunkte für die Beurteilung möglicher Grundwasserbewegungen entlang von Störungs- oder Kluftzonen aus bzw. in die betrachteten Bilanzgebiete (Abschnitt 4.4.3).

Tabelle 4 Vergleich ausgewählter Parameter in GEOFEM 2000, 2003 und 2004

Parameter	GEOFEM 2000	GEOFEM 2003	GEOFEM 2004
Datengrundlagen allg.	weitgehend manuell erhoben		digital
Zwischenabfluss (RH)	GWN mit ausgewiesenem Anteil des RH		GWN ohne RH
Niederschlag (Reihe)	1951/75, GEOFEM korrig.	1951/75, DWD korrig.	1961/90, DWD korrig.
Berechnungseinheiten BE	707 x 707m, Raute	500 x 500m, Rechteck	
Bezugssystem	NAU-Blattschnitt	Gauss-Krueger Koordinaten	
Geländemodell	nur z.T. Höhenwerte vorhanden	DGM25, 20 x 20m Raster (Thüringen: 25 x 25m)	
Gewässer, Quellen, Sümpfe (Gewässerzahl)	Ermittlung der Fluss- und Quellendichte	Ermittlung der Gewässerfläche auf Grundlage des ATKIS DLM25	
Bodennutzung	eine Bodennutzungsart je BE	mehrere mögl., erweitert, ATKIS DLM25/CORINE	

(Quellen: GEOFEM 1994, 2000, 2003, 2004, ZWEIG 2006a)

Grundwasserneubildung nach NASIM (Verfahren 2)

Für den zentralen Bereich der Vorerzgebirgssenke (Bilanzgebiete Zwickauer Mulde i.e.S., Mülsenbach, Lungwitzbach) wurden zum Vergleich die von WASY (1998) ermittelte anthropogene und natürliche Grundwasserneubildung für die einzelnen Teileinzugsgebiete miteinbezogen. Die Berechnungen von WASY beruhen auf drei Methoden.

Der weitaus wichtigste Ansatz war die Langzeitsimulation des Wasserhaushaltes mit NASIM, einem Niederschlags-Abfluss-Modell (Wasserhaushaltsmodell), dass aufgrund der folgenden besonderen Programmeigenschaften für diesen Bereich besonders geeignet schien (WASY 1998).

- die Versickerung von Oberflächenwasser aus dem Flussbett kann über die Eingabe einer potentiellen Gerinneversickerung direkt im Modell berücksichtigt werden. Dies ermöglicht das Einbeziehen vermuteter Versinkungen von Wasser, insbesondere aus der Zwickauer Mulde
- Inkorporation von Modulen zur Modellierung urbaner Einzugsgebiete (HYDROTEC 1998). Hiermit können Abflussvorgänge innerhalb städtischer Einzugsgebiete sowie die Wechselwirkungen zwischen urbanen und natürlichen Faktoren detailliert beschrieben werden. Das ist insbesondere für den Stadtbereich Zwickau von Bedeutung.
- Option zur zeitlich hochauflösenden Kurzfristsimulation unter Berücksichtigung von Starkniederschlägen

Lösungsansatz für die Berechnung der GWN mit dem Wasserhaushaltsmodell NASIM ist die reduzierte Wasserhaushaltsgleichung (Abschnitt 2.7.1). Die Grundwasserneubildung wird danach aus der Summe von Niederschlag (N) und Speicheränderung ($\Delta S + \Delta GW$) ab-

züglich realer Evatranspiration (RET) und schneller Abflusskomponenten (R_S) berechnet (9).

$$(9) \quad GWN = N - RET - R_S + (\Delta S + \Delta GW)$$

Damit werden im Einzelnen die folgenden Teilprozesse berücksichtigt (HYDROTEC 1998).

- Evatranspiration einschließlich Interzeption
- Infiltration
- Exfiltration und Kapillaraufstieg
- Oberflächenabfluss
- Interflow (Zwischenabfluss)
- Abflusskonzentration
- Gerinneabfluß

Diese Teilprozesse des hydrologischen Kreislaufes werden in überwiegend konzeptionellen Modellbausteinen beschreiben und quantifiziert. Die dazu benötigten Parameter werden dabei teilweise aus physikalisch messbaren Größen abgeleitet. Die Modellstruktur und die verwendeten Algorithmen stellen nach WIDMOSER et al. (1996) einen Kompromiss zwischen maximaler Modellkomplexität und erforderlichem Daten- und Berechnungsaufwand dar.

Zur Unterscheidung zwischen Infiltrations- und Exfiltrationsabschnitten der Zwickauer Mulde wurden Wasserspiegellagemessungen für verschiedene Abflussverhältnisse durchgeführt und diese mit Grundwasserstandsmessungen verglichen.

Für die Modellierung in NASIM wurden zwei verschiedene Raumaufösungen verwendet.

- für homogene Elementarflächen wurde der standortbezogene Wasserhaushalt (Verdunstung, Abfluss und GWN) modelliert
- die Abflusskonzentrationen unter Nutzung eines digitalen DGM wurden auf Grundlage von vorgegebenen Teileinzugsgebieten modelliert.

Die Aufgliederung des Modellraums erfolgte in bergbaubeeinflussten Bereichen von Zwickau und Oelsnitz in höherer Diskretisierung als in den übrigen Gebieten.

Die Zeitschrittweite während der Simulation betrug i. d. R. einen Tag für einen 30 jährigen Simulationszeitraum vom 1.11.1966 bis zum 31.10. 1996. Das Wasserhaushaltsmodell wurde an langjährigen Durchflussbeobachtungen an gewässerkundlichen Pegeln geeicht und getestet.

Ergebnis der Modellierung waren Zeitreihen von Tageswerten für die Verdunstung, des Abflusses, und der GWN für insgesamt 52 Teilgebiete/Simulationsgebiete. Sie wurden für die Bilanzierung in 4 Bilanzgebiete zusammengefasst (Zwickauer Mulde, Mülsenbach, Lungwitzbach, Würschnitz). Diese entsprechen im wesentlichen den gleichnamigen u.a. auch in Verfahren 4 betrachteten Gebieten.

Die Ergebnisse aus NASIM wurden mit vorhandenen Berechnungen nach Bargow/Glugla (Programm GWD) (HGN 1996a) und dem Programm GEOFEMLAW sowie mit experimen-

tell bestimmten GWN-Werten verglichen und z.T. lokal präzisiert (WASY 1998 u.a., vgl. Verfahren 3).

Ermittlung der GWN mit GEOFEMLAW, GWD und experimentell (Verfahren 3)

In HGN (1996a) wurde die GWN für den MOST-Bereich Zwickau (Modellstandort Zwickau) mit Programm GWD nach dem Verfahren von BAGROV/GLUGLA (GLUGLA et al. 1976) berechnet (HGN 1996a, 1996b). Die GWN im dem über den MOST-Bereich hinausreichenden Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde i.w.S. wurde zunächst mit dem Programm GEOFEMLAW (GABRIEL et al. 1984, 1986) berechnet. Dabei wurde festgestellt, dass die Grundwasserneubildung für die Bereiche mit Quartärüberdeckung (Tal der Zwickauer Mulde) unrealistisch niedrig ausfiel. Hier wurden deshalb auch das Programm GWD sowie die KdT-Empfehlungen zur Ermittlung der Grundwasserneubildung (KRAFT et al. 1981) verwendet. Für das Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde i.w.S. wurde die GWN so als gewichtetes Mittel aus den Ergebnissen mit GWD und GEOFEMLAW bestimmt (HGN 1996a, 1996b).

Grundlage der Ermittlung der GWN mit dem Programm GWD ist die Beschreibung der wesentlichen Zusammenhänge zwischen Wasser- und Wärmehaushalt basierend auf langjährigen Mittelwerten klimatischer, hydrologischer und bodenkundlicher Parameter nach der sogenannten BARGOV-Beziehung, die stetig weiterentwickelt wurde (BFG 2003). Die wesentlichen Eingangsdaten sind:

- Bodenart und trockene Rohdichte des Bodens
- Grundwasserstandsdaten
- Art der Landnutzung
- korrigierter mittlerer Jahresniederschlag
- korrigierter mittlerer Niederschlag des Sommerhalbjahres
- mittlere jährliche potentielle Evapotranspiration

Auf dieser Grundlage wird im BARGOV-Diagramm der Quotient aus aktueller zu maximaler Evatranspiration dargestellt. Der Graph variiert dabei in Abhängigkeit vom Effektivitätsparameter n der den Einfluss der Standortbedingungen quantifiziert (BGR 2003). Aus dem BARGOV-Diagramm kann die mittlere aktuelle Evatranspiration abgeleitet werden. Über die Wasserhaushaltsgleichung (Abschnitt 2.7.1) lassen sich dann auch der mittlere jährliche Gesamtabfluss und die GWN berechnen.

Die Methodik GEOFEMLAW (GABRIEL et al. 1984, 1986) wurde zwischen 1981 und 1985 auf Grundlage vorhandener Programme zur Wasserhaushaltsberechnung für den Lockergesteinsgebiete insbesondere für Festgesteinsbereiche entwickelt.

Die Ergebnisse aus GEOFEMLAW gingen in die Ermittlung des Gesamtabflusses für das N-A-U-Kartenwerk (GLUGLA 1985) ein. Die aus dem N-A-U-Kartenwerk berechneten GWN wurden von WASY (1998) zur Überprüfung der mit NASIM (vgl. Verfahren 2) ermittelten Ergebnisse verwendet. Die Ergebnisse mit NASIM wurden weiterhin mit der GWN nach der von GABRIEL et al. (1989) aufgestellten Schlüsselkurven verglichen. Einem Teil dieser Schlüsselkurven liegt ebenfalls die Methodik GEOFEMLAW zugrunde. Eingangsgrößen sind hierbei:

- der mittlere Niederschlag
- die mittlere potentielle Verdunstung
- die Gewässerzahl

Die Gewässerzahl wird in Abhängigkeit von den speziellen lithofaziellen Bedingungen ermittelt. Niedrige Gewässerzahlen repräsentieren dabei höher durchlässige, aufgelockerte und/oder gut geklüftete Gesteine. Mittlere Gewässerzahlen bezeichnen Gesteine mit mittlerer, hohe Gewässerzahlen Gesteine mit geringer Durchlässigkeit. Im Bereich der VES wurden dementsprechend den Molassen des Rotliegenden Gewässerzahlen um 1,5, den Ton-schiefern aber Werte um 3,5 zugewiesen (WASY 1998).

Die experimentell ermittelte Grundwasserneubildung ist in den Schlüsselkurven nach GABRIEL et. al. (1989) visualisiert. Die Schlüsselkurven wurden u.a. durch die Auswertung von Gebietslysimeteruntersuchungen, Quellschüttungen und/oder Wasserwerksstatistiken experimentell definiert. Eingangsparmeter ist hier der mittlere Gebietsniederschlag. Dieses Verfahren war nur im Bereich der Sandsteine und Molassen des oberen Rotliegenden verwendbar, da nur hier entsprechende Felddaten vorlagen (WASY 1998).

Ermittlung der GWN aus dem Basisabfluss (Verfahren 4)

Nach HÖLTING (1992) und HÖLTING et al. (2005) entspricht das arithmetische Mittel der Niedrigstabflusswerte verschiedener Abflussjahre eines Vorfluters (MNQ) bzw. der monatlicher Niedrigstabfluss (MoMNQ) erfahrungsgemäß der effektiven GWN über dem zugehörigen Einzugsgebiet. Diese Größe wird im folgenden als GWN-MNQ oder Basisabfluss Q_0 bezeichnet. Die Herleitung dieses Zusammenhanges aus der allgemeinen Wasserhaushaltsgleichung wird im Abschnitt 2.7.1 dargestellt und erläutert.

Diese Beziehung war Grundlage für die Ermittlung der GWN für zusammenhängende Einzugsgebietsgruppen, im folgenden auch als Bilanzgebiete bezeichnet.

Für die erfolgreiche Anwendung des Verfahrens „Basisabfluss“ waren die folgenden Voraussetzungen gegeben.

- Die Bilanzgebiete umfassen nur vollständige Einzugsgebiete
- Der Abfluss aus dem Bilanzgebiet wird über Abflussmessstationen vollständig erfasst
- Es standen mehr- bis langjährige Messwerte des MNQ zur Verfügung, die eine gute Mittlung und so die Abminderung des Einflusses von „Störjahren“ gewährleisten
- Die Betrachtung des unterirdischen Wasserhaushaltes erfolgt für Bilanzgebiete die sich aus mindestens einem, meist aber mehreren Einzugsgebieten 5. Ordnung zusammensetzen. Die Flächengröße dieser Bilanzgebiete beträgt zwischen $61,5 \text{ km}^2$ (Bilanzgebiet Mülsenbach) und $291,3 \text{ km}^2$ (Bilanzgebiet Chemnitz i.w.S.)
- In diesem Sinne wird der Wasserhaushalt in der vorliegenden Arbeit „**großräumig**“ oder „**regional**“ betrachtet und diese Begriffe im folgenden entsprechend verwendet
- Die einzige Ausnahme bildet das $16,25 \text{ km}^2$ große Bilanzgebiet Koberbach, das den nördlichen Teil des Einzugsgebietes 56662 darstellt
- diese großräumige Betrachtungsweise mindert die Relevanz/den Einfluss lokaler Störgrößen

Die oben genannten Verfahren 1 bis 3 beziehen den tatsächlichen Grundwasserabfluss aus

einem Einzugsgebiet zwar teilweise kalibrierend für die Ermittlung der Grundwasserneubildung in einzelnen Teileinzugsgebieten mit ein. Sie berechnen die Grundwasserneubildung letztlich jedoch aus Eingangsgrößen wie Niederschlag, Evapotranspiration, oberirdischer Abfluss usw. unter Berücksichtigung von Parametern wie z.B. Bodenbeschaffenheit, Gewässerszahl und Hangneigung. Für viele Teileinzugsgebiete liegen darüber hinaus keine Abflussmessungen vor. Es wurden deshalb für dieses Verfahren verschiedene Teileinzugsgebiete so kombiniert, dass größere Bilanzgebiete entstehen für die kontinuierliche Messungen des langjährigen mittleren Niedrigwasserabflusses (= Basisabfluss) an Messpegeln des Landesmessnetzes in den zugehörigen Vorflutern vorliegen. Basieren die Verfahren 1 bis 3 also im wesentlichen auf Input-Parametern in die „Black Box“ Untergrund, berücksichtigt der Basisabfluss ausschließlich den Grundwasserabfluss (Output) aus dem System.

2.7.4 Fehlerbetrachtung und Störgrößen bei Anwendung der vereinfachten Grundwasserhaushaltsgleichung

Fehlerbetrachtung

Vergleicht man die nach den verschiedenen Verfahren ermittelte Grundwasserneubildung über einem Bilanzgebiet sollten diese, im Rahmen eines angemessenen Fehlers, übereinstimmen. WASY (1998) geht bei seinen Berechnungen und Vergleichen von einem Fehlerbereich der verwendeten Verfahren von 20 mm/a aus. In den folgenden Betrachtungen wird ein etwas höherer, prozentual definierter Fehlerbereich von 25% gewählt.

- der prozentuale Ansatz berücksichtigt die in den verschiedenen Einzugsgebieten sehr unterschiedlichen Grundwasserneubildungsmengen
- die den verschiedenen Verfahren anhaftenden Fehlergrößen – z.B. bei der Ausweisung der unterirdischen Einzugsgebiete (Abschnitt 2.7.2) - werden damit notwendigerweise relativ großzügig berücksichtigt. Dies trägt der Erkenntnis Rechnung dass nur bei größeren Abweichungen in der berechneten GWN für gleiche Gebiete und gleiche Zeiträume mit einiger Wahrscheinlichkeit von verfahrensunabhängigen Ursachen ausgegangen werden kann.

Treten höhere Abweichungen zwischen den nach verschiedenen Verfahren berechneten Grundwasserneubildungen für identische Bilanzgebiete auf können diese entweder auf beträchtliche Störgrößen innerhalb des Bilanzgebietes zurückgeführt werden (Abschnitt 2.7.4). Können diese als Ursache jedoch ausgeschlossen werden, liegt der Verdacht nahe, dass das den Berechnungen zugrunde gelegte unterirdische Einzugsgebiet nicht dem tatsächlichen unterirdischen Einzugsgebiet entspricht (Abschnitt 4.4.1). Ist der Basisabfluss deutlich höher als die zugehörige nach den Verfahren 1 bis 3 berechnete Grundwasserneubildung ist ein größeres Einzugsgebiet zu vermuten, ist er kleiner wird das Einzugsgebiet eingeschränkt.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass der Vergleich der Grundwasserneubildung nach verschiedenen Varianten mit dem Basisabfluss keine quantitativ exakte Bestimmung von Fehlgrößen in der Grundwasserbilanz ermöglicht. Darüber hinaus sind i.d.R. immer mehrere „Störgrößen“ für die ermittelte Differenz verantwortlich (vgl. folgendes Kapitel). Eine siche-

re Zuordnung der einzelnen Anteil ist meist nicht möglich.

Ziel dieser Betrachtung ist es, über Wasserhaushaltsbetrachtungen, Anhaltspunkte für mögliche Einflüsse auf den unterirdischen Wasserhaushalt zu erhalten und daraus Interpretationsmöglichkeiten für die großräumige Grundwasserdynamik abzuleiten. Hierbei wird insbesondere die mögliche Wirkung hydraulisch aktiver Störungen geprüft.

Störgrößen bei Anwendung der vereinfachten Grundwasserhaushaltsgleichung

Zur Ermittlung der GWN findet die stark vereinfachte Grundwasserhaushaltsgleichung im Sinne von $GWN = Q_0$ Anwendung (Grundwasserneubildung entspricht Basisabfluss, vgl. Abschnitt 2.7.1). Dies ist aufgrund der großräumigen, regionalen Betrachtung (Definition vgl. Abschnitt 2.7.3, Verfahren 4) gerechtfertigt, wodurch insbesondere lokale Störgrößen vernachlässigt werden können. Verbleibende wesentliche Störgrößen können sein:

1. In verschiedenen Gebieten der VES ist mit einem wesentlichen Anteil urbaner (anthropogener) Grundwasserneubildung bzw. Grundwasserentnahme zu rechnen. Für den Raum Zwickau liegen dazu Angaben vor. So haben die Untersuchungen in (HGN 1996a) und (WASY 1998) gezeigt, dass die Bilanzgleichung im Zwickauer und Oelsnitzer Raum um die Teiglieder urbane GWN (z.B. Infiltration aus defekten Leitungsnetzen Wasser in das GW) und anthropogene Entnahmen (Hebung von GW in den Zwickauer Pumpwerken infolge von bergbaubedingten Absenkungsvorgängen der Oberfläche) erweitert werden muss. WASY (1998) hat deshalb für die betrachteten Bilanzgebiete eine Quantifizierung der urbanen GWN vorgelegt. Interessanterweise sind die Abweichungen zwischen dem Basisabfluss (Verfahren 4), der als „Output“ im Sinne eines „Black-Box“-Ansatzes anthropogene Infiltrationen bzw. Entnahmen bereits beinhaltet, und der GWN nach anderen Verfahren häufig gering. Dies gilt selbst für einige Einzugsgebiete mit intensiver Grundwassernutzung bzw. –Beeinflussung, wie den Bilanzgebieten Zwickau, Mülsenbach und Lungwitzbach. Hier ist ein gewisser Ausgleich entgegengesetzt wirkender anthropogener Einflussgrößen (Menge der Entnahmen = Menge der Infiltrationen) möglich.

2. Die direkte Entnahme bzw. Einleitung von Wasser aus den bzw. in die Vorfluter, insbesondere im Bereich von Städten und Gemeinden kann, sofern in den Pegeldaten nicht berücksichtigt, die Höhe des berechneten Basisabflusses beeinflussen.

3. Häufig lässt sich die Gesamtmenge bzw. Differenz der Entnahmen aus bzw. Infiltrationen in die GWL oder Vorfluter für die betrachteten großen Bilanzgebiete nicht ermitteln. Es wird von der Annahme ausgegangen, dass der verbleibende Fehler, sofern sich die Einflussgrößen nicht gegenseitig aufheben, im Bereich des zulässigen Fehlers liegt (vgl. oben).

4. Ein weitere Besonderheit tritt im ehemaligen Lugau-Oelsnitzer Steinkohlenrevier auf. Hier steht der noch im Flutungsprozess befindliche Grubenkörper in engem hydraulischem Kontakt mit dem Rotliegend-GWL. Eine Speicheränderung im „Grundwasserleiter Grubenbaue“ durch Auffüllungsprozesse ist deshalb nicht zu vernachlässigen. Zum Auffüllungsprozess könnten auch lokale influente Strömungsverhältnisse, entlang der örtlichen Vorfluter beitragen. Der in die Grubenbaue abfließende Anteil an der GWN aus den betroffenen Bi-

lanzgebieten wird jedoch nur sehr gering sein. Legt man den maximalen gemessenen Grubenwasserzulauf zu den Grubenbauen in Lugau-Oelsnitz zugrunde (1959 = 1,314 Mio. m³/Jahr) und nimmt an, dass dieser ausschließlich aus der Grundwasserneubildung der anliegenden Bilanzgebiete Lungwitzbach und Würschnitz gespeist wird, so entspräche dieses einem Anteil an der gesamten GWN dieser Gebiete von rund 5 mm ($\leq 5\%$). Der tatsächliche Zulauf in die Gruben dürfte zudem aufgrund des inzwischen deutlich gestiegenen Grubenwasserspiegels wesentlich darunter liegen.

5. Gleichmaßen stellt der mögliche Grundwasserzustrom aus der Zwickauer Mulde in den GWL bei influenten Strömungsverhältnissen einen Störfaktor, im Sinne einer Speicheränderung im GWL dar. Nachweis und die Quantifizierung sind jedoch schwierig. So wurde durch WASY (1998) festgestellt, dass die auf den Ergebnissen der Durchflussmessungen basierenden Annahmen zur Versickerung von Muldewasser Wassermengen ergeben, die durch die oben erwähnten anthropogenen Entnahmen in den Zwickauer Pumpwerken nicht ausgeglichen werden. Es ergeben sich somit rechnerisch lokal Bilanzüberschüsse, die auf eine unterirdische Abflusskomponente hinweisen. Diese Bilanzüberschüsse sind experimentell jedoch nicht abgesichert (WASY 1998). Die Unsicherheit in der Bilanzierung, selbst eines relativ kleinen Untersuchungsbereiches zeigt der Vergleich mit den Arbeiten von HGC et al. (1999). Für das Teilgebiet Schedewitz gehen diese bei influenten Strömungsverhältnissen von einem wesentlich geringeren Grundwasserzufluss aus der Mulde aus als WASY (1998).

2.8 GIS-Themen und Datenbanken

Ein Großteil der in der Arbeit verwendeten analogen und digitalen Daten und Informationen wurden zur Erfassung, Auswertung, Interpretation und Darstellung in geeigneter Form digital erfasst werden. Dies führte einerseits zur Speicherung, Bearbeitung und Visualisierung von Ergebnissen in Dateien/Datenbanken und GIS-Themen. Neu erfasste Aufschlusssdaten bzw. Korrekturen vorhandener wurden in die Ausgangsdatenbanken des LfUG zurückgeführt (Abschnitt 2.5). Andererseits stellte die GIS-Erfassung von Informationen einen Zwischenschritt bei der Überführung digitaler Daten in die digitalen geologischen und hydrogeologischen Modelle dar (GOCAD/GMS).

Daten wurden in zwei verschiedenen GIS-Anwendungen erfasst, aufbereitet und zu verschiedenen veränderbaren Layouts zusammengestellt. Durch die kombinierte Anwendung von ArcView und TNTmips war es möglich, sowohl den erforderlichen Programmumfang als auch die notwendige Kompatibilität (für Nutzern anderer GI-Systeme) zu gewährleisten. Die GI-Systeme dienten der Erfassung und Aufbereitung von Informationsebenen. Die im Rahmen dieser Arbeit genutzten Daten wurden in aus den GIS-Anwendungen in das shp-Format exportiert und in GOCAD und GMS weiterverwendet. So konnten die recherchierten Informationen in geeigneter Form, z.B. als Datenbanken, Tabellen oder GIS-Ebenen, für die spezifischen Fragestellungen genutzt werden. Weitere Kartendrucke und Layouts sind in KOLITSCH (2000), einer Grundlage der vorliegenden Arbeit, enthalten. Die Auflistung aller für die GIS-Verarbeitung genutzten Datenquellen und ihre methodische Aufbereitung erfolgt zusammen mit den Erläuterungen zur Erfassung und Abgleich verfügbarer hydrogeologischer Daten in Abschnitt 2.5.

2.9 Strukturmodellierung in GOCAD

2.9.1 Das Modellierungsprogramm GOCAD, Kenntnisstand

Die Abkürzung GOCAD steht für „Geological Objects Computer Aided Design“. GOCAD ist ein seit 1989 an der Ecole Nationale Supérieure de Géologie in Nancy (Frankreich) unter Leitung von Prof. Jean-Laurent Mallet entwickeltes Programm zur räumlichen Modellierung und Interpretation von geologischen Strukturen, Reservoirs und von Fazies- und petrophysikalischen Objekten. Das GOCAD-Projekt wird heute durch die ASGA (Association Scientifique pour la Géologie et ses Applications) geleitet und mit Unterstützung des GOCAD-Konsortiums durch umfangreiche internationale Forschungsprogramme in Zusammenarbeit mit zahlreichen Industrieunternehmen und Universitäten ständig erweitert und optimiert.

GOCAD ist ein Finite Elemente Modell in dem geometrische Objekte durch eine begrenzte Anzahl von Raumpunkten definiert werden, denen verschiedene Eigenschaften zugewiesen werden können. Die Verbindung dieser Raumpunkte definiert dabei die Topologie des Objektes. GOCAD nutzt also das Grundkonzept der diskreten Modellierung. Ursprünglich für Anwendungen in der Erdöl/Erdgasprospektion entwickelt, ermöglicht es heute die maßstabsgerechte räumliche Darstellung und Interpretation beliebiger (z.B. geologischer) Objekte und von mit diesen verknüpften Eigenschaften.

GOCAD wird seit 1997 an der TU Bergakademie Freiberg am Institut für Geologie verwendet. Die TU Bergakademie ist heute Mitglied des Entwicklungskonsortiums von GOCAD und arbeitet u.a. an der Weiterentwicklung von Schnittstellen und Tools (z.B. APEL 2005). GOCAD kam bisher im Rahmen von zahlreichen Institutsprojekten, Diplom- und Forschungsarbeiten zur Anwendung (z.B. SPOTTKE 2001, PFEIFER 2003, KIRSCHKE 2004, APEL 2004). Dazu gehören auch Arbeiten im Bereich der Vorerzgebirgssenke, z.B. im Raum Zwickau und Chemnitz (LANGE 1998, RENNER 1998, KATER 1999, ZIMMERMANN 1998, FELIX et al. 2006, 2007) und im Saxothuringikum (APEL 1999, MELZER 2005). Unter Leitung des Lehrstuhl für mathematische Geologie und Geoinformatik ist GOCAD in das Ausbildungsprogramm der Geowissenschaften integriert.

GOCAD wurde für diese Arbeit als eine Vorstufe für die Erstellung des großräumigen hydrogeologischen Strukturmodells verwendet. Die Entscheidung für die Anwendung von GOCAD in vorliegender Arbeit sind dabei in folgenden Punkten zusammenzufassen:

- Es handelt sich um ein ursprünglich für geologische Problemstellungen entwickeltes Modellierungstool und trägt deshalb den Besonderheiten geologischer/hydrogeologischer Probleme Rechnung
- Somit enthält GOCAD zahlreiche Bearbeitungsverfahren die speziell für die Konstruktion geologischer Flächen und Körper aus typischen geologischen Primärdaten (z.B. Bohrungen, Profilen, Störungsspuren und seismischen Profilen) entwickelt wurden.
- Die „Discrete Smooth Interpolation“ (DSI) Funktion ist ein international anerkanntes Interpolationswerkzeug, das speziell für die Konstruktion und Anpassung geologischer Flächen entwickelt wurde.
- Deshalb ist GOCAD zur Konstruktion komplizierter geologischer Strukturen und zur

bestmöglichen Interpolation in Gebieten mit geringer Datendichte gut geeignet. Natürlich kann aber auch DSI fehlende Informationen nicht ersetzen.

- Die Verwendung dreidimensionaler Modellierungswerkzeuge ist noch relativ neu und sehr speicherintensiv. Die zunehmende Entwicklung von Soft- und Hardware macht solche Anwendungen jedoch zunehmend einfacher bedienbar und schneller, was Nutzerzahl und Einsatzgebiete zunehmend erweitert.
- Die fortschreitende Anbindung von GOCAD z.B. an Datenbank- und GI-Systeme (siehe oben), sowie die Entwicklung von Schnittstellen und Export/Importfunktionen erhöht die Verfügbarkeit von in GOCAD erstellten Modellen und Modellteilen für die Verwendung in anderen Anwendungen.

2.9.2 Arbeitsablauf zur Erstellung des GOCAD-Modells

GOCAD wurde u.a. für die Modellierung der Ausgangsobjekte der Basisflächen und Raumkörper der hydrogeologischen Einheiten und wichtiger Störungsbereiche verwandt. Die Anpassung und Weiterverarbeitung der Modellkörper erfolgte in GMS. Voraussetzung für die Erstellung eines räumlichen hydrogeologischen Modells war die Vorauswahl zur Verfügung stehender und in GOCAD sinnvoll verwendbarer Daten. Dazu wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Datenmanagement (Selektion, Aufbereitung und Konvertierung nutzbarer Daten) diverser bereits vorhandener Datenquellen (Abschnitt 2.5)
- GIS-Erfassung (TNTmips und ArcView) weiterer benötigter Daten und Export in GOCAD-lesbare Formate (Abschnitt 2.8)

Eine wichtige Rolle bei der Erstellung des hydrogeologischen Modells kam der Datenaufbereitung zur Nutzung in GOCAD, sowie der Anwendung geeigneter Import- und Konvertierungsprogramme zu. GOCAD erstellt und arbeitet mit programmspezifischen Dateiformaten die primär außerhalb von GOCAD i.d.R. so nicht anzutreffen sind, es sei denn, es werden Daten aus anderen GOCAD-Anwendungen genutzt, was im Rahmen dieses Projektes kaum möglich war. Deshalb wurden die teilweise auch manuell präparierten geologischen und hydrogeologischen Daten (Abschnitt 2.5) mit Hilfe von Filtern bzw. Konvertieren in GOCAD importiert (Abschnitt 2.9.3).

Nach erfolgreichem Import der benötigten Datensätze erfolgte die schrittweise kritische Aufbereitung dieser Daten zu den einzelnen Komponenten des Modells. Dabei wurden zahlreiche Änderungen und Korrekturen des Datenbestandes durchgeführt. Dies geschah entweder weil sich einzelne Daten als fehlerhaft erwiesen und eliminiert werden mussten. In verschiedenen Bereichen der VES gibt es zudem nur wenige oder keine Angaben zur Tiefenlage einzelner geologischer bzw. hydrogeologischer Einheiten. Deshalb wurden hier zur Schließung dieser Kenntnislücken die Primärdatensätze logisch um Sekundärdaten ergänzt. Der resultierende Datensatz war dann Ausgangspunkt für die Interpolation und Generation der einzelnen Horizonte.

Die einzelnen Komponenten (GOCAD-Objekte, vgl. Abschnitt 2.10 und Anlage 5) wurden schließlich zu einem Gesamtmodell vereint. Zu diesem gehören neben den Schichtenfolgen des Rotliegenden, des Tertiärs und des Quartärs, auch die, z.T. hydraulisch aktiven, großen Störungszonen im Bereich der VES.

Entsprechend ihrer hydrostratigraphischen Charakteristik wurden hydrogeologische Einheiten abgegrenzt. Den Einheiten und Störungszonen wurden primäre hydraulische Kennwerte zugeordnet.

Dieses primäre großräumige hydrogeologische Strukturmodell stellte den Ausgangspunkt für die strukturelle Modellanpassung, Parametrisierung und Strömungsmodellierung in GMS dar (Abschnitte 2.9.5 und 2.10).

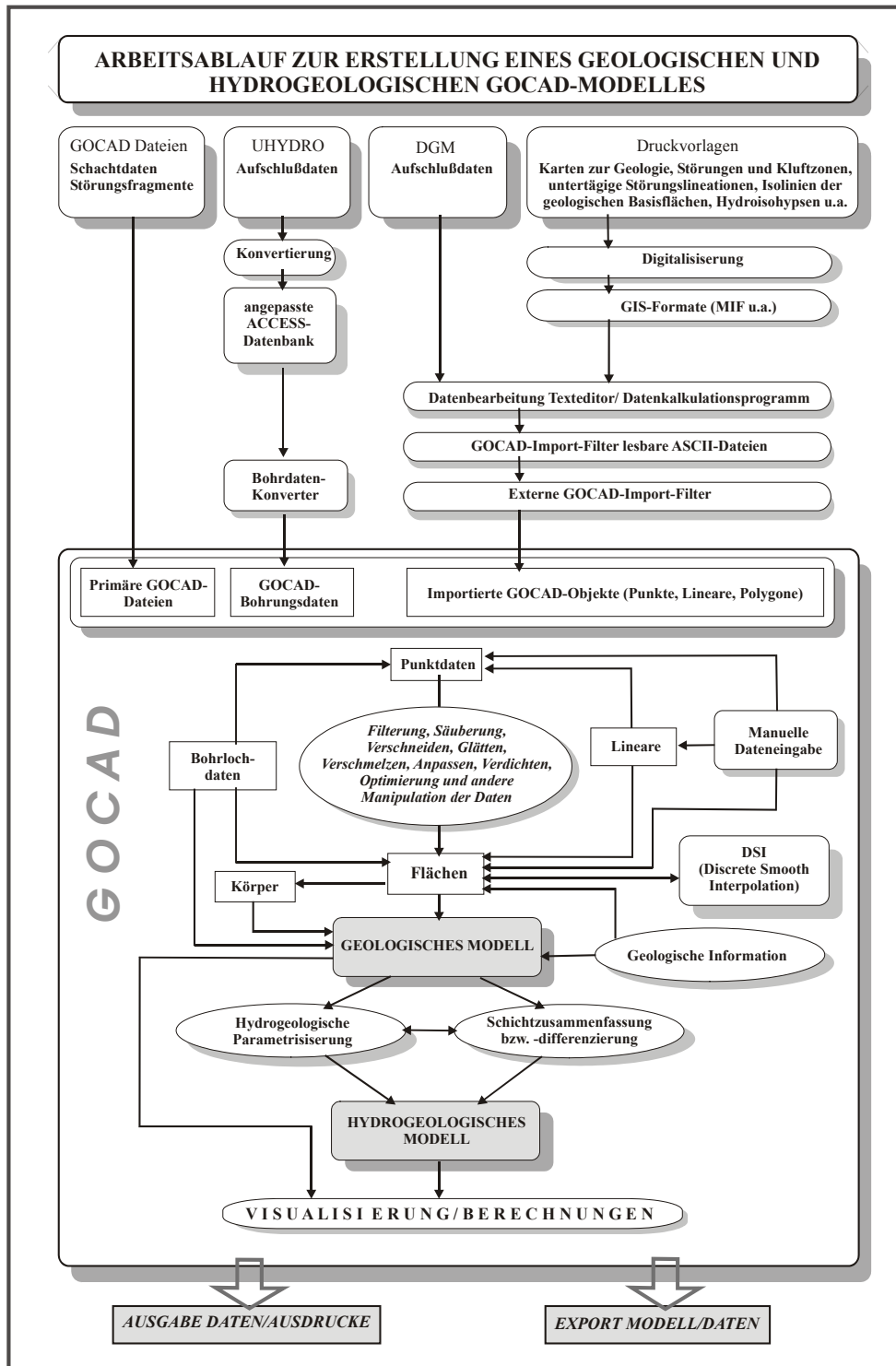


Abbildung 2 Bearbeitungsabläufe in GOCAD

Einen Überblick über die komplexen Bearbeitungsabläufe - Import, Manipulation, Synthese und Abgleich der Ausgangsdaten sowie Erstellung und Bearbeitung der einzelnen GOCAD-Objekte zum Gesamtmodell - gibt Abbildung 2.

Diese Arbeiten gliederten sich also in zahlreiche Schritte, die zum Teil sukzessive, zu einem großen Teil jedoch nur parallel durchzuführen waren. Daraus ergab sich einerseits eine ständige Plausibilitätsprüfung der erhobenen Daten, andererseits jedoch auch ein erheblich vergrößerter Arbeits-/Zeitaufwand. Insgesamt kann festgestellt werden, dass dem Bestreben alle verfügbaren Daten vollständig zu berücksichtigen oftmals zeitliche und technische Grenzen gesetzt waren. Dies betrifft auch die Aktualisierung der sich kontinuierlich verändernden Ausgangsdaten, insbesondere der Aufschlussdatenbanken.

2.9.3 Import von Dateien in GOCAD: Filter und Konverter

Zur Modellierung der geologischen und hydrogeologischen Einheiten wurden einerseits analog vorliegende Daten wie z.B. Karten der Verbreitungen und Teufenlagen von Schichten verwendet. Diese wurden digitalisiert und im „mif“-Format gespeichert und aufbereitet.

Die so vorbereiteten Daten wurden unter Verwendung externer und GOCAD-programminterner Scripts oder Filter in Textdatei-Formate der entsprechenden GOCAD-Objekte (Abschnitt 2.9.4) konvertiert. Entscheidend für die Art des verwendeten Filters war das Ausgangsformat der Daten und das GOCAD Zielformat. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Konvertierungen für einzelne geologische Objekte.

Tabelle 5 Übersicht: Import von Vektor- und Bohrlochdaten in GOCAD

Ausgangsformat ^{*)}	Filter/Script/Konverter	GOCAD-Format	Verwendung
<i>X_Y_ID# (Text)</i>	zmap2curve (intern)	2D-Curve	Lineare tekton. Strukturen, Ausstriche Geologie
<i>X_Y_Z (Text)</i>	XYZ2Vset.awk (extern)	3D-Pointsset	Digit. Geländemodell, Grundwasser-Stände, Lagepunkte v. Störung.
<i>X_Y_SegID#_Z (Text)</i>	XYSidZ2Pline.awk (extern)	3D-Curve	Basislinien geologischer Horizonte, Hydroisohypsen, räumliche Störungsumrisse
<i>X_Y_Z (Text)</i>	XYZ2PLine	3D-Curve	Hydroisohypsen
<i>Access-Datenbank</i>	DBase-Wellkonverter (KATER 1999)	Well-Object	Bohrungen, Schürfe, sonstige Aufschlüsse

^{*)} „#“ steht für „Nummer“, „_“ bedeutet Leerzeichen

Aufgrund der großen Datenmenge und der Datenstruktur war die Überführung der Aufschlussdaten aus den Fachinformationssystemen (FIS) Hydrogeologie/Geologie des UIS Sachsen (DUTELOFF 1998-2006) in GOCAD Bohrlochdaten (well objects) von besonderer Bedeutung.

Für den Import der Datenbanken in ein GOCAD-lesbares Format wurde ein VBA-Konverterprogramm genutzt (KATER 1999). Dabei werden die Grund- und Schichtdaten

aus dem FIS Hydrogeologie in sogenannte well-object-files (Bohrlochdaten) im ASCII Format konvertiert. Im Ergebnis zahlreicher der Konvertierung vorausgehender Tests konnte das Programm in Zusammenarbeit mit dem Urheber korrigiert und optimiert werden.

Für die Überführung der Fis-Aufschlussdaten in das GOCAD-Modell wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Auskopplung von Grund- und Schichtdaten im Modellraum aus dem FIS-Hydrogeologie im dbase-Format (DUTELOFF 1998-2006)
- Konvertierung aller Daten nach MS ACCESS bzw. EXCEL
- Eliminierung aller Aufschlüsse ohne Angaben zur Stratigraphie
- Prüfung auf diverse Fehleinträge (z.B. Koordinaten)
- Umrechnung aller Höhenangaben in m HN
- Gesonderte Markierung des Liegenden in den Schichtenverzeichnissen
- Belegung des GOCAD-spezifischen Datenfeldes „Zusammengefasste Eigenschaft“ zur Definition der stratigraphischen Zuordnung der Schichtansprache
- Umformung und Zusammenführung der Datentabellen in eine Grunddatentabelle und eine Stammdatentabelle
- Teilung des Gesamtdatensatzes kleinere Datensätze mit rund 1000 Datensätzen
- Einlesen und Konvertierung der Daten in ein GOCAD lesbares "Well-object"-Format
- Import in GOCAD

2.9.4 Die Verwendung von GOCAD Objekten im Modell

Das räumliche hydrogeologische Modell in GOCAD besteht aus diversen geometrischen Objekten mit zugeordneten Eigenschaften. Die eingegangenen Daten sind so entsprechend ihres Charakters als selbständige Geometrieelemente, GOCAD Objekte genannt, in das Modell inkorporiert. Solche GOCAD Objekte (Beispiele in Klammern) sind:

- Punkte (Wasserstände in GWBR)
- Lineare 1 (Störungsausstriche und geologische Grenzen)
- Lineare 2 (Bohrdaten und andere Aufschlüsse)
- Flächen (3D geologische Horizonte, Störungsflächen)
- Raumkörper/Solids (3D-Körper, z.B. von Störungen oder geologischen Einheiten)

Aufgrund der Zuordnung eindeutiger Koordinaten ist die exakte Lage des jeweiligen Objektes im Raum definiert. Die größte Genauigkeit der geometrischen Modelle wurde durch die Modellierung der geologischen und hydrogeologischen Trennflächen erzielt. Eine Berechnung von Raumkörpern erfolgte in GOCAD nur in Einzelfällen, in GMS für das Gesamtmodell (Abschnitt 2.10).

Die für diese Arbeit verwandten GOCAD-Objekte sind in objektspezifischen einfach strukturierten Textformaten abgelegt. Eine Beschreibung, bildliche Darstellung und Angaben zur verwendeten Dateistruktur der in dieser Arbeit verwendeten GOCAD-Objekte befindet sich in Anlage 5.

Weitere Angaben zu GOCAD-Textformaten, Filtern, programmtechnischen Fragen und GOCAD allgemein befinden sich in den Tutorials (CHENG 1998 und Aktualisierungen),

Handbüchern und im Internet auf den Seiten der GOCAD Research Group unter <http://www.gocad.org> und der Earth Decision Sciences unter <http://www.earthdecision.com>.

2.9.5 Das GOCAD-Modell als Grundlage für die Modellierung in GMS

Das großräumige hydrogeologische Strukturmodell in GOCAD stellte lediglich den Ausgangspunkt bzw. den Importdatensatz für die weitere strukturelle Bearbeitung (Aktualisierung und Anpassung), Parametrisierung, hydraulische Modellierung und Darstellung/Interpretation mit dem Programmpaket GMS (Abschnitt 2.10) dar.

Ein Schwierigkeit, insbesondere bei der Strukturmodellierung großer Modellräume mit GOCAD und GMS (Abschnitt 2.10), stellt die zügige Verarbeitung großer Primärdatenmengen dar. Speicher- bzw. Prozessorkapazitäten sowie die Notwendigkeit zeitlich akzeptabler Rechenzeiten setzten hier Grenzen. Frühzeitig sind deshalb sinnvolle Eingrenzungen der Datenmengen bzw. Umwandlung in optimierte Sekundärdaten notwendig, so z.B. bei den aus dem FIS Hydrogeologie generierten Bohrlochinformation oder bei der Umsetzung des hochauflösenden digitalen Höhenmodells (Abschnitt 4.8.2).

Das Programmpaket GMS bietet prinzipiell die Möglichkeit das gesamte Arbeitsspektrum von der Datenerfassung und Datenoptimierung über die Strukturmodellierung bis hin zur hydraulischen Modellierung programmintern durchzuführen. Die Modellierung der primären hydrogeologischen Strukturen wurde dennoch in GOCAD realisiert, die Ergebnisse als Trennflächen bzw. Solids in GMS importiert (Abschnitt 2.10.3). Es wurde GOCAD verwendet, da es als ein auf die Strukturmodellierung spezialisiertes Modellierungswerkzeug verschiedene Vorteile gegenüber GMS aufweist. So verläuft die Verschneidung komplexer Raumkörper deutlich stabiler, die Rechenzeiten sind gleichzeitig geringer als bei vergleichbaren Berechnungen in GMS. Es bietet weiterhin umfangreiche Möglichkeiten zur Manipulation der Modellgeometrie, die in GMS nicht oder nur mit erheblich größerem Aufwand zu realisieren sind (Abschnitt 2.9.1). Das betrifft auch anspruchsvolle Werkzeuge zur Verarbeitung und Eingrenzung auch großer Datenmengen auf hohem Niveau. Wenngleich dabei auch mit GOCAD ein gewisser Informationsverlust unvermeidbar ist, kann durch Verwendung geeigneter mathematischer Ausdünnungsmethoden die erforderliche Genauigkeit bewahrt werden. Solche Vereinfachungen bzw. Optimierungen beinhalteten insbesondere:

- eine angemessene Verringerung der Maschenweite und Optimierung der die hydrogeologischen Einheiten definierenden Finite Elemente Gitter durch Anpassung geringer diskretisierter Gitter an die hoch diskretisierten in GOCAD modellierten Schichten
- die Generalisierung der Geologie in Bereichen sehr geringer Schichtmächtigkeiten, z.B. in den Ausstrichbereichen der geologischen Einheiten am Beckenrand

Die Optimierungsoperationen in GOCAD wurden bereits in Hinblick auf die Anforderungen des Grundwasserströmungsmodells durchgeführt. Ziel war es letztlich, die Komplexität und Größe des Modells auf das notwendige Maß zu beschränken, um die erforderliche Stabilität und Zeitdauer des Rechenganges bei der numerischen Modellierung in GMS zu gewährleisten.

Letztlich konnten durch die Verwendung zweier sich in Randbereichen in ihren Funktionen überschneidenden Programmen auch methodische Erkenntnisse gewonnen werden. Beide Programme stellen erfolgreiche Anwendungen mit einer wachsenden Nutzergemeinschaft dar. Vorhandene Schnittstellen zur Übertragung von Daten zwischen den Anwendungen konnten getestet, geeignete Export/Importvarianten für die Übertragung von Modellobjekten aus GOCAD in GMS entwickelt und anhand einer komplexen Modellierungsaufgabe getestet werden.

2.10 Struktur-, Parameter- und Strömungsmodellierung in GMS

2.10.1 Das Modellierungsprogramm GMS

Die Abkürzung GMS steht für „Groundwater Modeling System“. Es ist eines der fortschrittensten und umfangreichsten Programmpakete im Bereich der Grundwassermodellierung mit umfassenden Möglichkeiten für das Pre- und Postprocessing.

GMS dient zur Erstellung kompletter Grundwassermodelle von der Konzeptbildung über die Struktur- und Parametermodellierung, Strömungs- und Transportmodellierung, 2D & 3D Geostatistik, stochastische Modellierung sowie Kalibrierung inklusive inverse Modellierung bis hin zur Visualisierung. So bietet es die Möglichkeit räumliche geologische, hydrogeologische und geochemische Daten vom Import der Ausgangsdatenbanken bzw. von der Generation der Daten direkt in GMS, zu dreidimensionalen Struktur- Parameter- und Strömungsmodellen zu entwickeln. GMS beinhaltet Algorithmen für Finite-Differenzen und Finite-Elemente Berechnungen in 2D und 3D wie MODPATH, MODFLOW, FEMWATER, MT3DMS/RT3D, SEAM3D, ART3D, UTCHEM und SEEP2D die als Module integriert sind und über das GMS Interface bedient werden können.

GMS wurde am Environmental Modeling Research Laboratory (EMRL) an der Brigham Young University in Utah (USA) entwickelt. Hauptsponsor des EMRL ist das US Army Engineer Research and Development Center. GMS wird in über 60 Ländern in Tausenden von Unternehmen, sowie in Behörden, Forschungseinrichtungen und Universitäten verwendet.

Wichtige in GMS dreidimensional geführte Objekttypen sind neben Raster und Vektordaten, die (z.B. aus GI-Systemen) importiert oder aber direkt in GMS generiert werden können, die folgenden:

- 2D und 3D Raumpunkte
- Bohrungen (borholes)
- Flächen (Tins)
- Raumkörper (Solids)
- Profilschnitte aus Aufschlüssen oder Raumkörpern
- 2D und 3D Gitter (Grid)
- 2D und 3D Vermaschungen (mesh, „Netze“)

Weitere umfangreiche Informationen zum Programm GMS finden im Internet auf den Seiten des Entwicklers EMRL unter <http://www.emrl.byu.edu/gms> und beim Vertreiber EMS-I (Environmental Modeling Systems) unter <http://www.ems-i.com/GMS/gms>.

2.10.2 Arbeitsablauf zur Erstellung des GMS - Modells

Ausgangspunkt für die strukturelle Modellanpassung, Parametrisierung und Strömungsmodellierung in GMS bildete das primäre großräumige hydrogeologische Strukturmodell in GOCAD (Abschnitt 2.9).

Abbildung 3 fasst die Bearbeitungsabläufe zur Struktur- und Strömungsmodellierung mit GMS zusammen. So wurden zunächst die GOCAD Modelldaten in GMS importiert. Unter Verwendung neuer Erkenntnisse und Daten, wie z.B. einer aktualisierten Aufschlussdatenbank (Abschnitt 2.5.1), erfolgte zunächst die Modellierung eines optimierten/angepassten hydrogeologischen Strukturmodells mit GMS.

In einem zweiten Schritt wurden die hydrostratigraphischen Einheiten entsprechend ihrer hydrogeologischen Charakteristik vorparametrisiert. Dann wurden Geometrie und Parametrisierung durch dreidimensionale Vermaschung in ein 3D-„Modellnetz“ (3D mesh, im folgenden als „Gitter“ oder „Modellgitter“ bezeichnet) als Grundlage des numerischen Strömungsmodells übertragen.

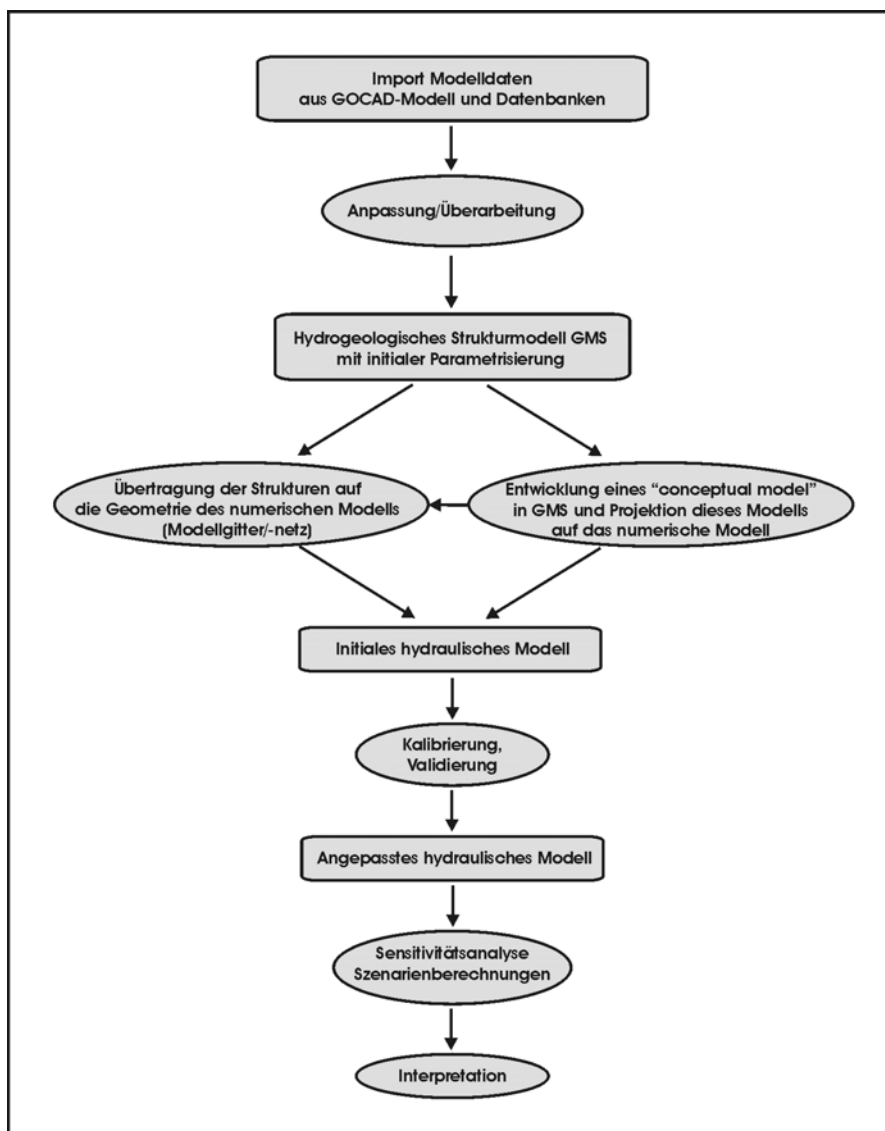


Abbildung 3 Bearbeitungsabläufe Struktur- und Strömungsmodellierung mit GMS

Jetzt erfolgte die weitere Anpassung der Parametrisierung und die Zuweisung diverser Randbedingungen. Dazu wurde neben der manuellen Zuweisung von Parametern in GMS ein sogenanntes „GMS-conceptual model“ entwickelt und die dort definierten Parameter auf das 2 und 3D-Modellgitter übertragen (Abschnitt 2.10.5).

Anschließend wurden erste Modellrechnungen durchgeführt (initiales hydraulisches Modell). Die Kalibrierung, und Validierung des Modells erfolgte durch die stufenweise Anpassung und Projektion des GMS conceptual model auf die Modellgeometrie sowie durch manuelle Anpassungen.

Aus dem angepassten hydraulischen Modell wurden Ergebnisse u.a. zu Fließszenarien und preferentiellen Fließwegen ausgekoppelt, Parametersensitivitäten geprüft und Szenarien berechnet. Die Ergebnisse der Modellierung wurden mit den Erkenntnissen der hydrogeologischen Analyse abgeglichen und diskutiert.

2.10.3 Import von Daten in GMS

Die Überführung des Strukturmodells aus GOCAD in GMS

Die Erstellung des initialen hydrogeologischen Strukturmodells der VES erfolgte in GOCAD (Abschnitt 2.9). Bereits in GOCAD erfolgten Anpassungen der Modellgeometrie (Abschnitt 2.9.5) um eine optimale Weiterverarbeitung in GMS zu gewährleisten.

Zum Import in GMS wurde zunächst im Rahmen von Forschungsarbeiten mit der Programmiersprache FORTRAN durch HADRYANTO (2000) ein FORTRAN 77 Code erstellt der GOCAD Textdateien kompletter hydrogeologischer Einheiten (3D Solids) in GMS 3D Mesh Formate überführte. Diese Variante erwies sich jedoch als nicht geeignet, da selbst die vereinfachten GOCAD Solids aufgrund ihrer Größe und Komplexität in GMS nicht verarbeitbar waren (Programmabstürze). Deshalb wurde der ursprüngliche FORTRAN 77 Code vom Autor so umgeschrieben, dass nun Flächenobjekte aus GOCAD (surfaces) in GMS (TIN) konvertiert werden konnten (Anlage 6). Mit diesem Code wurden die Trennflächen der hydrogeologischen Einheiten, Störungen und das DGM als Flächenobjekte in GMS importiert und dort weiterbearbeitet.

Import von Daten aus GI-Systemen und Datenbanken

Die in TNTmips oder ARCVIEW erstellten GIS-Informationsebenen (z.B. Einzugs- und Bilanzgebiete, Störungsmuster, Hydroisohypsen und Geologie) wurden als dxf- oder shp-Dateien (ARC-GIS) direkt in GMS geladen. Rasterdaten wie z.B. topographische Karten wurden im tiff- oder jpeg-Format importiert.

Neben den für die Erstellung des GOCAD-Modells ausgekoppelten und angepassten Datenbanken (Abschnitt 2.9) wurden aktuelle Abfragen aus dem FIS-Hydrogeologie Sachsen (DUTELOFF 2006) und aus Datenbanken der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG 2007) für die Aktualisierung des hydrogeologischen Modells in GMS verwendet (Abschnitt 2.5.1). Ziel war einerseits die Darstellung des aktuellen Kenntnisstandes bezüglich Anzahl und Art der im Untersuchungsgebiet erfassten Aufschlüsse. Andererseits

wurden die enthaltenen räumlichen Aussagen zur Lithologie und Stratigraphie, sowie – soweit vorhanden – Grundwasserinformationen beim Bohrfortschritt und hydrogeologische Untersuchungsergebnisse für die Anpassung von Geometrie und Parametrisierung des hydrogeologischen Modells verwendet.

Die Ergebnisse dieser Abfrage sind in Form von Aufschlussdatenbanken in Anlage 6 enthalten. Die Aufschlussdatenbank Sachsen enthält 27.957 Aufschlüsse im Bereich der Vorerzgebirgssenke und ihrem Umland. Die Datenbank zu den im Land Thüringen liegenden kleinen Teil des Modellgebietes enthält 33 Einträge. Die Begrenzung des abgefragten Gebietes kann im Gauß-Krüger-Koordinatensystem wie folgt angegeben werden: NW-Ecke RW 4511700, HW 5652500; SE-Ecke RW 4576200, HW 5610900. Auskopplungen aus der Aufschlussdatenbank dienten zum Aufbau und zur Anpassung des hydrogeologischen Struktur- und Parametermodells.

2.10.4 Das hydrogeologische Strukturmodell in GMS

Ausgangspunkt für die Erstellung des Strukturmodells waren zunächst die aus GOCAD importierten Trennflächen der hydrogeologischen Einheiten und Störungszonen sowie die Aufschlussdatenbank.

Der Charakter des dreidimensionalen hydrogeologischen Strukturmodells ist sowohl in GOCAD als auch in GMS schichtorientiert. Das bedeutet das einzelne hydrogeologische Einheiten definiert und mehr oder weniger separat modelliert werden. Dadurch entstehen verschiedene von einander unabhängige geometrische Objekte die in ihrer Gesamtheit das hydrogeologische Modell bilden. Vorteile dieser „modularen“ Vorgehensweise gegenüber einem „Kompaktmodell“ sind:

- Die Objekte sind unabhängig voneinander manipulierbar. So können z.B. Auflösung und Genauigkeit der die Geometrie bestimmenden Strukturen (Modellgitter) für jedes Objekt unterschiedlich definiert werden. Das Arbeiten gestalten sich wesentlich einfacher und übersichtlicher.
- Die Visualisierung und Interpretation von hydrogeologischen Strukturen und Zusammenhängen zwischen hydrogeologischen Einheiten ist so optimal möglich.
- Hydrogeologische Einheiten zeichnen sich i.d.R. – so auch in der VES – durch unterschiedliche hydraulische Eigenschaften (z.B. Durchlässigkeit, Porosität) aus. Durch den schichtorientierten Ansatz besteht die Möglichkeit schon im Strukturmodell eine differenzierte Parametrisierung der einzelnen Schichtkörper durchzuführen, die dann z.B. als initiale Parameterbelegung für das hydraulischen Modells dienen kann.
- Die Verarbeitung großer Datenmengen verursacht häufig numerische Instabilitäten und einen hohen Zeitaufwand. Durch die Bearbeitung einzelner Modellobjekte kann dies trotz hoher Auflösung/ Genauigkeit vermieden werden
- Die Verwendung „modularer“ hydrogeologischer Raummodelle bietet eine große Variantenvielfalt und Flexibilität, gleich ob bei der direkten Generation dreidimensionaler Modellgitter des hydraulischen Modells aus dem Strukturmodell oder bei der Übertragung der Parameterbelegung aus dem Strukturmodell auf das Raumgitter des hydraulischen Modells.

Die Arbeitsschritte zum Aufbau des 3D-Finite Elemente Modells mit GMS gliedern sich wie folgt:

1. GMS-Projekt

Erstellung eines initialen GMS-Projektes mit den aus GOCAD und GIS importierten Daten (Abschnitt 2.10.3)

2. Bohrlochdaten-Modell

Erstellung eines Bohrlochdatenmodells auf Grundlage der aktuellen Aufschlussdatenbanken. Dazu gehören 2D-Punktdatensätze aller Aufschlüsse mit Angabe des erreichten stratigraphischen Endhorizontes und 3D-Bohrstächendatensätze aller Aufschlüsse mit Teufenbezug und Zuweisung (Material und Horizont) des erreichten stratigraphischen Niveaus. Diese Gms-Projekte (Anlage 6) waren zusammen mit den zugrunde liegenden Datenbankabfragen und -bearbeitungen Grundlage und Werkzeug für die Erstellung sowie eigenständiger Teil des digitalen hydrogeologischen Struktur- und Parametermodells.

3. Flächen-Modell

Anpassung der Modellflächen auf Grundlage der aktuellen Aufschlussdatenbanken und Erstellung von Flächen der Oberkanten der einzelnen hydrogeologischen Einheiten

4. Erstellung des 3D-Raummodells (Solid-Modell) nach 2 Varianten

Variante 1 (Verschneidung)

- Extrusion der Trennflächen nach oben zur Erzeugung von Raumkörpern mit der Basisfläche der jeweiligen hydrogeologischen Einheit
- Subtraktion der hangenden von den liegenden Einheiten zur Erzeugung der Einzel-Raumkörper als Bestandteile des Raumkörper-Modells
- Zuordnung einer Material ID für jeden Raumkörper; die Material ID definiert die hydraulischen Parameter die dann auf das 3D-Gitter übertragen werden
- Definition der Schichtanzahl für die Erzeugung des 3-D Gitter

Variante 2 (Horizont-Methode)

- Berechnung der Raumkörper direkt aus Horizontkennungen der Bohrlochdaten und den Verbreitungsgrenzen in einer durch Flächen (tins) vorgegebenen Auflösung
- Materialzuweisung erfolgt analog Methode a)

5. Anwendung des dreidimensionalen hydrogeologischen Strukturmodells

Nach Überprüfung und Abgleich des Raummodells mit den Bohrlochdaten und Flächendaten erfolgte Visualisierung und Interpretation des Modells, z.B. durch räumliche Abbildungen und die Generation von Profilschnitten.

2.10.5 Initiales hydrogeologisches Parametermodell

Das initiale Parametermodell dient der Zuweisung der hydraulischen Parameter für die ersten Durchläufe der hydraulischen Modellierung. Es wurde dann im Prozess der Kalibrierung schrittweise angepasst.

Die im Modell verwendeten initialen **Durchlässigkeitsbeiwerte** (k_f) und **Porositäten** (n) für die hydrogeologischen Einheiten und Störungszonen (Abschnitt 4.9.1) sind Ergebnis der Arbeiten zur hydrogeologischen Analyse der Vorerzgebirgssenke (Abschnitt 4.2) und der Auswertung der Aufschlussesdatenbanken. Die Zuordnung der Parameter erfolgt auf der Grundlage eines von mehr oder minder hydraulisch aktiven Störungen durchsetzten Grundwasserleiter/Grundwasserhemmer Modells. Auf eine stochastische Auswertung der Parameter wurde unter anderem aus folgenden Gründen verzichtet.

- geringe Datendichte
- inhomogene Verteilung vorhandener Daten
- z.T. schwer einzuschätzende Qualität der Daten
- nur lokal erkundete engräumig variierende Lithologie
- außerhalb von Störungszonen vorrangig schichtparallele Grundwasserbewegung

Es erfolgte darüber hinaus eine datenbankmäßige Auswertung der in der FIS-Aufschlußdatenbank geführten Schichtdaten. Die Ergebnisse dieser Auswertung gingen in die initiale Parametrisierung der Modellschichten ein und wurde auch im Kalibrierungsprozess berücksichtigt.

Die initialen Parameter wurden den Raumkörpern des hydrogeologischen Modells zugewiesen. Bei der Übertragung der Modellgeometrie des hydrogeologischen Strukturmodells auf das hydraulische Modell (Abschnitt 2.10.6) werden diese Parameter entsprechend mitgeführt (Abschnitt 2.10.4).

Die initialen Randbedingungen wurden den Modellzellen des hydraulischen Modells entweder direkt zugewiesen oder aber über die Definition eines konzeptionellen GMS-Modells (Abschnitt 2.10.7) auf die Modellzellen projiziert.

2.10.6 Hydraulisches Modell – Modellgeometrie

Das hydrogeologische GMS-Strukturmodell bildete die Grundlage des Modellgitters für die hydraulischen Berechnungen mit dem Finite Elemente Modellcode FEMWATER. FEMWATER ist als Modul interaktiv in GMS implementiert (Abschnitt 2.10.1).

Erstellung des 2D-Projektionsgitters

Erster Schritt war die Generation eines 2D Projektionsgitters das in x-y – Richtung den Modellraum definiert. Die Gitter-Diskretisierung wurde gemäß des konzeptionellen GMS-Modells durchgeführt (Abschnitt 2.10.7). Ziel war die Sicherstellung einer genügend hohen Auflösung des Modellraumes. Dazu wurde eine räumlich stark variierende Verfeinerung bzw. Vergrößerung des Projektionsgitters bei allmählichen Übergängen realisiert. So erfolgte z.B. eine feinere Diskretisierung in der zentralen Vorerzgebirgssenke, im Bereich der Schichtausstriche am Senkenrand und in Störungsbereichen. In Randgebieten wurden größere Gitterabstände verwendet.

Im Rahmen der Optimierung des Projektionsgitters wurde besonderer Wert auf allmähliche

Übergänge zwischen feiner und gröberer Diskretisierung, die Vermeidung stark ungleichmäßiger Elementgeometrien (z.B. sehr geringe Winkel) sowie die Gewährleistung sauberer Interpolation innerhalb unterschiedlich diskretisierter Polygone gelegt.

Die sorgfältige Generation eines fehlerfreien und harmonischen Modellgitters ist eine sehr wichtige Voraussetzung für die numerische Stabilität des daraus entwickelten hydraulischen Modells. Die Eigenschaften dieses 2D-Projektionsgitters werden in Abschnitt 4.9.3 dargestellt.

Erstellung des 3D-Finite Elemente Gitters

Das 3D-Gitter des hydraulischen Modells wurde durch Projektion des 2D Projektionsgitters auf das 3D-Raummodell (Abschnitt 2.10.4) generiert. Zuvor wurden den einzelnen Solids des Raummodells hydraulische und geometrische Parameter zugewiesen. Letztere kontrollieren die Art der Umsetzung der Solids in die Materialien des 3D-Gitters, hierzu gehören z.B. die Anzahl der zu generierenden Schichten und die minimale Schichtdicke. Unter Verwendung der „Solid to Layered Mesh“ Anweisung wurden dann für jedes Solid ein oder mehrere 3-D Gitterschichten erzeugt.

Wie bei der Erstellung des 2D-Projektionsgitter wurde auch hier eine harmonische Gittergeometrie angestrebt. Aufgrund der möglichst genauen Umsetzung der Schichtverläufe im Rotliegenden bei mussten in einigen Bereichen permokarboner Schichtausstriche größere Gradienten der Höhenlage zwischen den Gitterzellen akzeptiert werden. Die Stabilität der hydraulischen Berechnungen wurde dabei gewährleistet.

Im Verlaufe der 2D- Gittergeneration wurde die Umsetzung der aktuellen Diskretisierung in das dreidimensionale Modellgitter mehrfach getestet. Diesem Modellgitter wurde ein stark vereinfachtes Parameter- und Randbedingungsmodell aufgesetzt und gerechnet um die numerische Stabilität des hydraulischen Modells vor Implementierung differenzierter Randbedingungsszenarien sicherzustellen.

Die Eigenschaften des verwendeten 3D-Finite Elemente Gitters werden in Abschnitt 4.9.3 diskutiert.

2.10.7 Modellrechnung, Randbedingungen und Anpassung von hydraulischen Parametern

Konzeptionelles GMS-Modell und Modellkalibrierung

Die Parametrisierung des hydrogeologischen Modells und die Zuweisung der Modellrandbedingungen sowie die iterative Anpassung von Parametern und Randbedingungen im Rahmen des Kalibrierungsprozesses wurde einerseits manuell, direkt im Modellgitter durchgeführt. Andererseits erfolgten Anpassungen und insbesondere die initiale Parametrisierung der hydrogeologischen Einheiten und die Zuweisung der Modellrandbedingungen durch Eigenschaftszuweisungen mittels des sogenannten „GMS conceptual model“ im folgenden als „konzeptionelles GMS-Modell“ bezeichnet.

Dabei handelt es sich um eine in das Map-Modul von GMS integrierte Zusammenstellung von Informationsebenen, ähnlich verschiedenen GIS-Layern, die per Definition ein „GMS

conceptual model“ darstellt. Ebenen und Vektorobjekten in dieser Zusammenstellung werden über angehängte Attribute/ Datenbanken verschiedene Eigenschaften zugewiesen, die dann beim sogenannten „mapping“ auf die Zellen des hydraulischen Modells übertragen werden. Es können durch entsprechende Ausweisung (z.B. Festlegung Zielschicht Nr. 1, 2, ... Eigenschaft 1, 2, ...) auch schichtspezifische Eigenschaften/Randbedingungen definiert werden, wodurch die Dreidimensionalität des konzeptionellen Modells gewährleistet wird. Die Verwendung eines solchen konzeptionellen GMS-Modells für die Modellentwicklung, insbesondere aber für die Kalibrierung und die Berechnung von Szenarien bietet verschiedene Vorteile.

- Kombinationsmöglichkeit: die Zuweisung von Parametern unter Verwendung eines konzeptionellen GMS-Modells ist mit anderen Verfahren, z.B. manuelle Zuweisung oder inverse Modellierung, kombinierbar
- Einfachheit und Übersichtlichkeit: Es können sehr differenzierte Parameterverteilungen (z.B. diverse kf-Wert-Zonen in verschiedenen Modellschichten) oder Randbedingungen zunächst zweidimensional kartiert werden und dann über den „mapping“-Prozess automatisiert auf das räumliche Modell übertragen werden. Aufwendige manuelle Zuweisungen können vermieden werden.
- Parallelität: Es können beliebig viele konzeptionelle GMS-Modelle gleichzeitig entwickelt/geführt werden. Dies ermöglicht die schnelle sukzessive Berechnung verschiedener Varianten der Parameterverteilung oder verschiedener Szenarien. Jede Interpretation wird in als separates konzeptionelles GMS-Modell gesichert und ist so jederzeit abrufbar/ reproduzierbar.

Es eignet sich damit vorzüglich zur effektiven Anpassung/Kalibrierung von Strömungsmodellen in GMS. Allerdings sind die für GMS-FEMWATER implementierten Funktionen gegenüber denen von z.B. GMS-MODFLOW deutlich eingeschränkt. So sind z.B. interne Randbedingungen (Vorfluter, Seen) und kf-Wert Zonen (Materials) (noch) nicht per konzeptionellem Modell auf das Modellgitter übertragbar. Dies führte zu erheblichem manuellem Aufwand bei der Zuweisung und Anpassung hydraulischer Modellparameter, insbesondere angesichts der Größe und Differenzierung des Modells und der damit verbundenen hohen Anzahl von zu manipulierenden Eigenschaften und Randbedingungen.

Randbedingungen

Die Definition und Anpassung von Art und Verlauf/Verbreitung der Modellrandbedingungen wurden soweit möglich über das konzeptionelle GMS-Modell realisiert. Folgende Randbedingungstypen wurden verwendet:

- passive Modellränder entlang von Grundwasserscheiden, parallel zur Grundwasserfließrichtung („no flow“)
- Festpotentiale entlang von Modellrändern mit Grundwasseranstrom, 1. Art, Drichlet
- Grundwasserneubildung als Randbedingung 2. Art (Neumann) und als variable Randbedingung (Kombination aus 2. und 3. Art)
- Flussrandbedingungen im Bereich von Vorflutern

Zur Festlegung der Flussrandbedingungen wurden wichtige Flüsse im Modellgebiet in ihrem Mittel- und Unterlauf mit einer Flussrandbedingung versehen. Die Datengrundlage bildeten die langjährigen mittleren Wasserstände der amtlichen Pegel (HÖHNE, 2003; PLUNTKE 2003). Ergänzend wurden mittlere Wasserstände aus der Gewässerkarte Sachsen (GewK 200 (P), 1996) und den amtlichen topographischen Karten des Landesvermessungsamtes Sachsen (TK 25 (N), 1998) und des Thüringer Landesvermessungsamtes (TTK 25 (N), 1998) einbezogen.

Die im Modell verwendeten Grundwasserneubildungswerte wurde für die Einzugsgebiete 5. Ordnung für den gesamten Modellraum mittels GEOFEM (Versionen ermittelt (Abschnitte 2.7.3 und Abschnitt 4.4.3). Die hydraulischen Berechnungen wurden zu Vergleichszwecken im Rahmen der Kalibrierung mit GWN-Werten unterschiedlicher Versionen (GEOFEM 2000, 2003 und 2004) durchgeführt (Abschnitt 4.9).

Verifizierung

Im Rahmen des Kalibrierungsprozesses wurden – unter Verwendung verschiedener konzeptioneller GMS-Modelle (siehe oben) – zahlreiche Randbedingungs- und Parameterkonstellationen gerechnet und deren Lösungen miteinander verglichen.

Validierung

Abschließend wurde die Plausibilität der Modellierungsergebnisse anhand dokumentierter/kartierter hydrogeologischer Merkmale/Phänomene überprüft. Dazu wurden Rechenergebnisse und Feldbeobachtungen in ausgewählten Teilgebieten miteinander verglichen.

2.10.8 Ergebnisse der hydraulischen Modellierung

Sensitivitätsanalyse und Fehlerbetrachtung

Die Parameter des kalibrierten und validierten Modells wurden einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Dies betraf insbesondere die kf-Wertverteilung und die Grundwasserneubildung. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse wie auch die Schlussfolgerungen aus dem Kalibrierungsprozess gingen in die Fehlerbetrachtungen zur Modellierung ein.

Szenarienberechnungen, Prognosen

Am Modell wurden Szenarienberechnungen durchgeführt. Im Zentrum der Betrachtungen stand dabei die Simulation des Strömungsgeschehens entlang von Störungszonen.

3 Einführung in das Untersuchungsgebiet, Kenntnisstand

3.1 Lage, Ausdehnung und Morphologie

Die Vorerzgebirgssenke (VES) bildet den zentralen und größten Teil des Modellraumes. Sie wird häufig auch als Erzgebirgisches Becken bezeichnet und ist eine sowohl morphologisch als auch geologisch abgegrenzte Landschaftseinheit permiosilesischer Molassesedimente im mittleren Westen des Freistaates Sachsen. Lediglich die nordwestlichen Ausläufer der Vorerzgebirgssenke gehen fließend in das Gebiet des Bundeslandes Thüringen über. Abbildung 4 gibt einen Überblick über das Untersuchungsgebiet mit der Umrandung der Vorerzgebirgssenke und der Lage wichtiger Ortschaften und Vorfluter. Dort aufgeführte kleinere Ortschaften sind solche mit Textbezug. Diese Karte liegt als Datei zu vergrößerten Darstellung Anlage 6 bei.

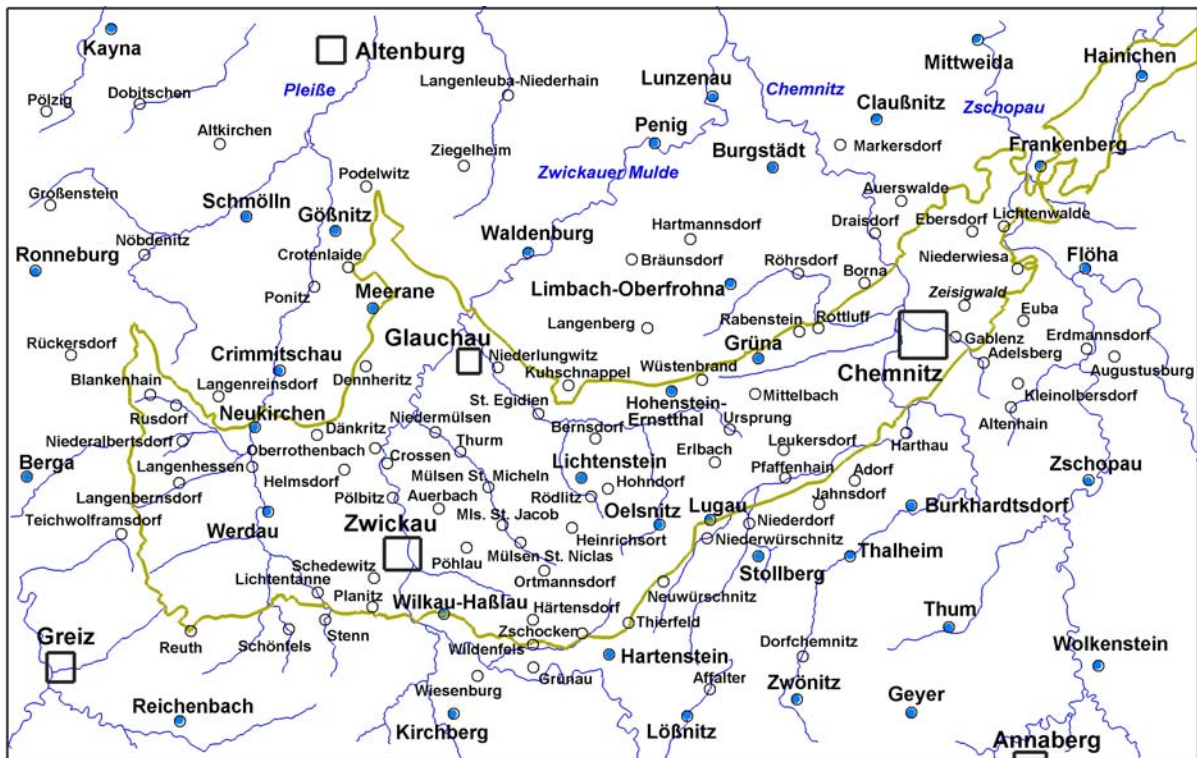


Abbildung 4 Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets

(mit Umrandung der Vorerzgebirgssenne, wichtigen Vorflutern, Hauptorten (Kästen) und größeren Ortschaften (gefüllte Kreise) sowie kleineren Ortschaften mit Textbezug (leere Kreise))

Die Vorerzgebirgssenke erstreckt sich in E-W Richtung entlang der Ortslagen Werda-Zwickau-Chemnitz-Frankenberg, in Form einer nach N geöffneten breiten Sichel, welche sich nach E allmählich verengt. Im NE schließen sich die kleineren Becken von Flöha und Hainichen an. Die Vorerzgebirgssenke i.w.S. vereint diese drei geologischen Absenkungsräume verschiedenen Alters zu einem großen Becken (Abbildung 5 bis Abbildung 7). Die E-W Ausdehnung der Vorerzgebirgssenke beträgt rund 54 km (mit Becken von Flöha-Hainichen ca. 70 km), die N-S Ausdehnung im Westteil 14-26 km, im Ostteil 7-13 km.

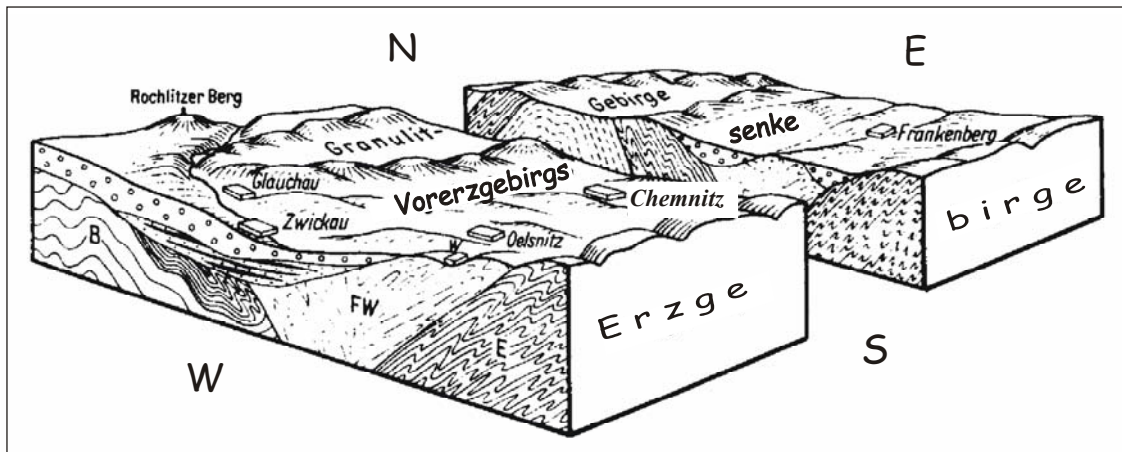


Abbildung 5 Die Vorerzgebirgssenke: Landschaft und geologische Position

(nach Wagenbreth et. al. 1990) (W: Wildenfels, FW: Frankenberg-Wildenfeler Zwischengebirge, E: Erzgebirgskristallin, B: Bergaer Sattel)

Die Umrandung der VES kann durch die Lage der folgenden Ortschaften beschrieben werden (im Uhrzeigersinn, in NW beginnend): Blankenhain – Neukirchen – Dänkritz – Dennheritz – Meerane – Podelwitz – NE Glauchau – Hohenstein-Ernstthal – Gröna – Rottluff – Borna – NE Chemnitz – Frankenberg – Hainichen – Niederwiesa – Harthau – Jahnsdorf – Lugau – Neuoelsnitz – Neuwürschnitz – Thierfeld – Wildenfels – Wilkau – Haßlau – Lichtenhain – Reuth – Teichwolframsdorf (Abbildung 4). Sie liegt damit im Bereich der folgenden Kartenblätter der Topographischen Karte TK 1:25 000: 5043, 5044, 5139-5144, 5239-5243, 5339-5324 (Landesvermessungsamt Sachsen) und TK 5339 und 5139 (Thüringer Landesvermessungsamt).

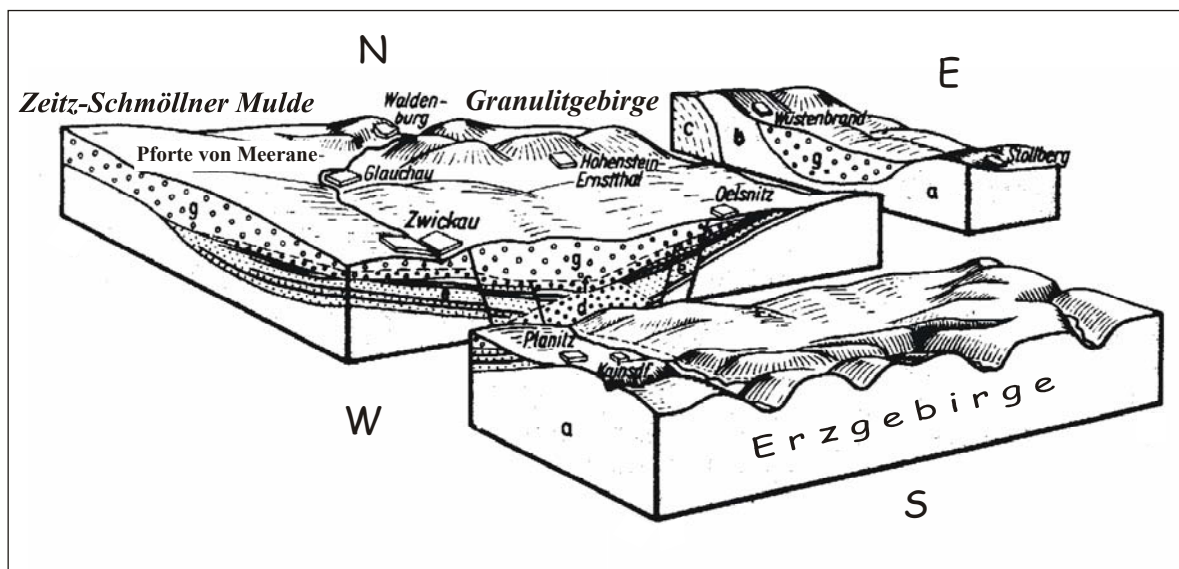


Abbildung 6 Die zentrale Vorerzgebirgssenke bei Zwickau-Oelsnitz

(nach Wagenbreth et. al. 1990) (a Grundgebirge, b Schiefermantel des Granulitgebirges, Granulitgebirge, d Flözleeres Oberkarbon, e Flözführendes Oberkarbon, f Graues Konglomerat (zu Härtensdorf-Folge), g Hangendes Rotliegendes)

Morphologisch bildet die Vorerzgebirgssenke eine, von z.T. tiefen Tälern durchschnittenen, flachwellige Mulde. Sie wird morphologisch/geologisch von den folgenden, die Randbereiche des Modellraumes bildenden Einheiten wie folgt begrenzt:

- im S und E durch die Metamorphite und Plutone des rund 100 m über der Vorerzgebirgssenke aufragenden, allmählich nach SSE ansteigenden, in N-S Richtung zertalten Erzgebirgskomplexes.
- nach N durch den morphologisch aufragenden metamorphen Schiefermantel und die Granulite des sich kupplig über die Vorerzgebirgssenke erhebenden nach N dann allmählich wieder abfallenden Granulitgebirges (Sächsisches Mittelgebirge).
- im NW durch Zechstein und Mesozoikum der Zeitz-Schmöllner Mulde und die nach N abflachenden Ausläufer des Nordwestsächsischen Vulkanitkomplexes.
- nach W und SW durch den Geraer Vorsprung und die Sattel- und Muldenstrukturen des Ostthüringisch-Vogtländischen Hügellandes.

Die Geländeoberfläche der Vorerzgebirgssenke liegt meist zwischen 250 m und 450 m ü. NN. Die höchste Erhebung im zentralen Untersuchungsgebiet liegt nördlich Zschocken (496,1 m), tiefster Geländepunkt ist die Zwickauer Mulde nördlich von Glauchau (226 m). Der höchste Bereich des weiteren Modellgebietes liegt bei Geyer mit rund 735m NN, die tiefsten im Tal der Pleiße bei Burg und der Zwickauer Mulde bei Wechselburg mit rund 170m NN.

Der weitere Vorerzgebirgssenkenraum liegt im Einzugsgebiet dreier Flüsse 3. Ordnung und ihrer Nebenflüsse. Der Pleiße im W, der Zschopau im E und der Zwickauer Mulde im Zentrum des Gebietes.

Die um E-W streichende Achse der Basis der Vorerzgebirgssenke sinkt im zentralen Senkenbereich an der Basis des Westfal D nordöstlich Zwickaus bis auf rund –950 mNN ab. Die Gesamtmächtigkeit der Schichtenfolgen beträgt dort also rund 1300 m. Die Senkenbasis steigt von der um W-E verlaufenden Senkenachse nicht-kontinuierlich nach allen Richtungen an und streicht außer im NW (siehe unten) über den Gesteinen älterer Grundgebirgskomplexe aus (siehe oben). Nach NE schließen sich im Liegenden zuvor noch die kleineren Becken von Flöha und Hainichen an. Nur im NW bleibt die Senkenstruktur im Bereich der Pforte von Meerane geöffnet. Hier setzt sich die Beckensedimentation nach NW mit Oberrotliegendem und Zechstein fort.

3.2 Geologische Entwicklung

Die Vorerzgebirgssenke ist ein, in mehrere Teilsenken untergliederter, intramontaner variszischer Molassetrog permosilesischen Alters. Sie wurde im obersten Visé im Bereich der Tiefenbruchzone des NE-SW streichenden Zentralsächsischen Lineaments (WATZNAUER 1965, KURZE 1966) angelegt. Sie ist, im klassischen Sinne, durch eine klare Stockwerksgliederung in Grundgebirge, Übergangsstockwerk und Tafeldeckgebirge gekennzeichnet.

Dem Grundgebirge aus altpaläozoischen Schiefern, Tonsteinen, Sandsteinen und Grauwacken (Unterkarbon bis Ordovizium ist in Bohrungen aufgeschlossen) ist in der Vorerzgebirgssenke (ohne die Becken von Flöha und Hainichen) diskordant kohleführendes Westfal D aufgelagert. Dieses war bis Ende der 60er Jahre im Bereich von Zwickau und Lugau-Oelsnitz Ziel intensiven Kohlebergbaus. Das Westfal D wird diskordant von bis zu 1300 m mächtigen Molassen des Rotliegenden überlagert, eine Folge zeitlich und örtlich gestaffelter Absenkungsvorgänge im Bereich des Zentralsächsischen Lineaments (FISCHER 1990) (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6). Im äußersten NW der Vorerzgebirgssenke setzte sich die Beckensedimentation weiter fort. Hier überlagert mariner Zechstein und weiter nordwestlich auch Buntsandstein transgressiv die Rotliegend-Folgen. Mesozoische Sedimente sind im engeren Bereich der Vorerzgebirgssenke nicht aufgeschlossen.

Vereinzelt, so z.B. im N von Zwickau, treten auf Hochflächen als Relikte einer einst flächigen Bedeckung Tertiärsedimente von meist geringer, lokal aber bis zu einigen 10er Metern Mächtigkeit auf. Als jüngste geologische Einheiten finden sich in den größeren Flusstälern holozäne fluviatile Sedimente die in ihrer Mächtigkeit einige Meter meist nicht überschreiten. Die für die hydrogeologischen Verhältnisse wichtigen Molasseablagerungen des Rotliegenden bestehen aus zyklisch aufgebauten, vorwiegend fluviatilen Konglomerat- bis Tonsteinabfolgen, in welche sporadisch geringmächtige lakustrische Carbonate und palustrisch beeinflusste Sedimente sowie vulkanogene Bildungen eingeschaltet sind (FISCHER 1990). Die stratigraphische Einordnung der Rotliegend Formationen folgt der Einteilung von FISCHER (1990). Weitere in der älteren Literatur und in geologischen Karten verwendete stratigraphische Tabellen sind die von SIEGERT (1901) und PIETZSCH (1962).

Eine Übersichtskarte der Geologie der VES und seine Einbettung in das Sächsisch-Thüringische Grundgebirge zeigt Abbildung 7.

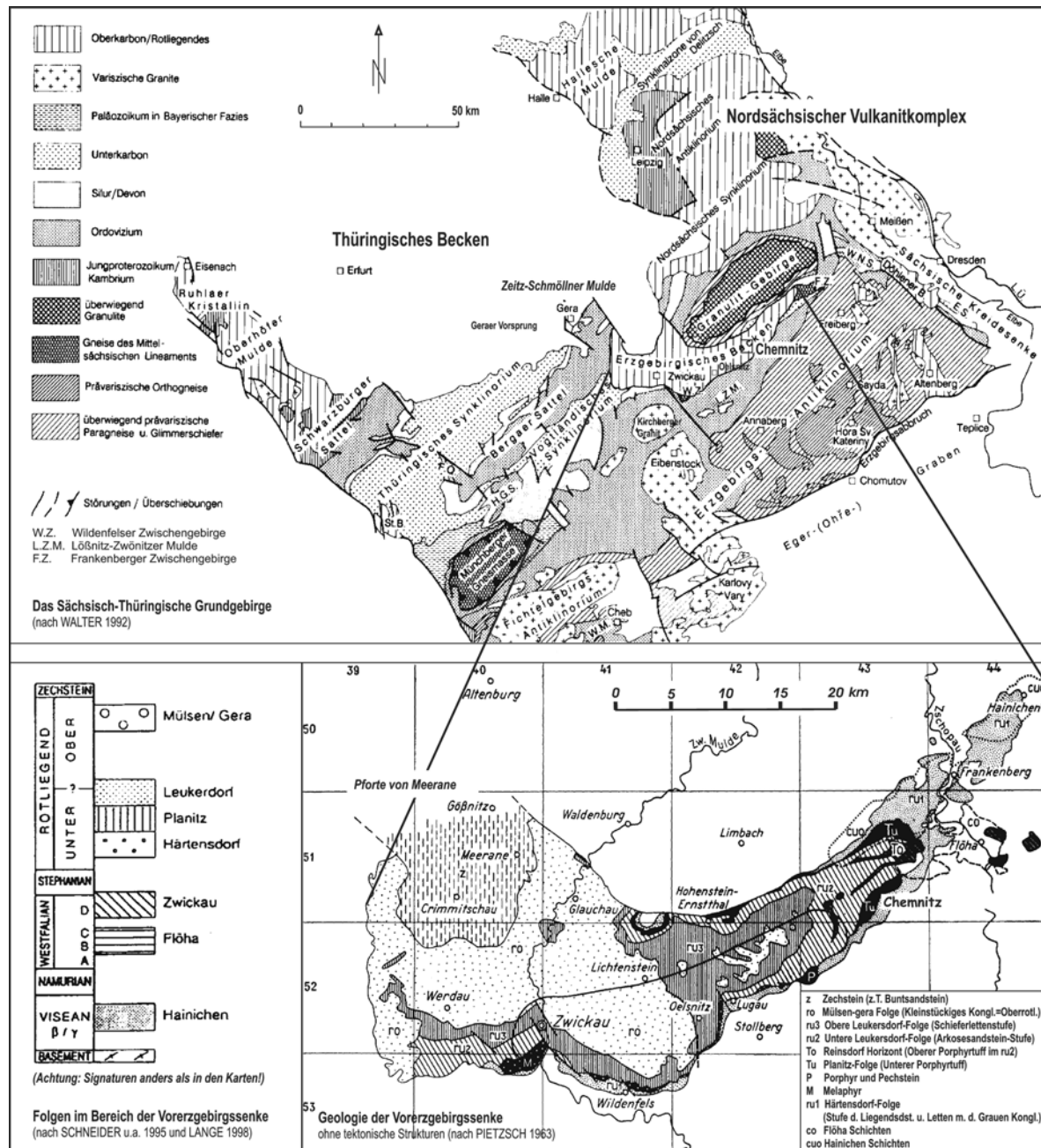


Abbildung 7 Die Vorerzgebirgssenke und ihre Einbettung in das Sächsisch Thüringische Grundgebirge – geologische Übersicht
(aus verschiedenen Quellen kombiniert und verändert, auf Grdl. von WALTER 1992, PIETZSCH 1962, SCHNEIDER & RÖBLER 1995 und LANGE 1998)

Tabelle 6 zeigt eine Zusammenstellung der geologischen Einheiten im Bereich der VES. Eine um Details erweiterte Variante enthält Anlage 2. Die für hydrogeologische Fragestellungen besonders wichtigen tektonischen Verhältnisse werden Abschnitt 3.3 diskutiert. Detaillierte Ausführungen, insbesondere zur stratigraphisch-lithofaziellen und vulkanogenen Entwicklung der VES im Rotliegenden finden sich in u.a. in FISCHER (1990), zur tektonischen Entwicklung in BRAUSE et al. (1997) und zu den lokalen geologischen Verhältnissen in PIETZSCH (1963). Mit aktuellen räumlichen Bearbeitungen der geologischen Strukturen im Raum Zwickau-Oelsnitz beschäftigen sich FELIX et al. (2006).

Tabelle 6 Geologische Einheiten im Bereich der Vorerzgebirgssenke

Stratigraphie	M (m) ²⁾	Kurzbeschreibung, Bemerkungen
Quartär <i>Holozän</i>	meist einige Meter, lokal bis 9m	anthropogene Ablagerungen (Auffüllungen, Halden, Absetzbecken, Deponien, Bergbauversatz usw.); Auelehme und sandiger bis kiesiger Schluff, Talsande, Kiese, Abschwemm- und Verwitterungsschutt, Torf
<i>Pleistozän</i>		Schmelzwassersande und Kiese, Lößlehm (meist 2-4 m) auf Hochflächen; Schotterterrassen d. Mulde, eiszeitl. Geschiebelehme, Bändertone, Flußschotter
Tertiär <i>Neogen</i>	meist einige Meter; lokal bis 40m	Sande, Kiese, Tone (Raum Limbach); meist als Erosionsrelikte auf Hochflächen
<i>Paläogen</i>		vorwiegend fluviatile Sande und Kiese, z.T. tonig-schluffig; Schotter, lokal Toneinschaltungen (Oligozän); <i>Basisdiskordanz</i>
Kreide, Jura, Trias	nord-westlich der VES	triassische (konglomeratische) Sandsteine und Konglomerate der Nordhausen-Folge (Schuttfächer); im äußerstem NW an das Untersuchungsgebiet angrenzend dem Zechstein aufgelagert; sonst abgetragen; <i>Basisdiskordanz</i>
Perm (Zechstein)	aufgeschlossen	Schieferton-Sandstein Wechsellagerung (WL), z.T. mit dolomitischen Lagen, Plattendolomit; im unteren Abschnitt Schieferton-Sandstein WL mit Dolomithorizonten Im NW an das Untersuchungsgebiet angrenzend; sonst abgetragen; <i>Basisdiskordanz mit deutlichem Hiatus</i>
Perm (Rotliegendes) <i>Gera-/ Mülsen – Folge (MlsF)</i> Stufe d. kleinstückigen Konglom. ¹⁾ M _{ges} ca. 350m	50-150	<u>Oberer Zyklus</u> : überwiegend psammitisch-pelitisch; in der VES nur im NW (Ponitz) nachweisbar; <u>Mittlerer-Zyklus</u> : fast durchgehend matrixgestützte Konglomerate; beckenzentral selten schluffig-sandige Einschaltungen; Bindemittel meist sandig, seltener kalkig-tonig
	150-ca. 315	<u>Unterer Zyklus</u> : Basale matrixgestützte Konglomerate, dann gering-mächtige gradierte Konglomerat-Schluffstein Zyklen; Bindemittel meist sandig, seltener kalkig-tonig; basal bis rund 1m mächtiger Zersetzungshorizont der Leukersdorf-Folge; <i>Basisdiskordanz mit deutlichem Hiatus</i>
Leukersdorf-Folge Stufe der vorherrschenden Schieferfetten (hangend) und Stufe der Arkosesandsteine u. Letten (liegend) ¹⁾ M _{ges} bis >700	100-180 max. 385	<u>Obere Teilfolge</u> : Schiefertone vorherrschend; Grobklastika am Beckenrand; sonst auch basal pelitische bis sandige Abfolgen; eingeschaltete lakustrische Karbonate; Zeisigwaldtuff im E (bis über 90m) als Abschluss der vulkan. Aktivität in der VES, verbunden mit Absenkung des Eruptionsareals
	0-500	<u>Untere Teilfolge</u> : Arkosesdst. und Schiefertone, z.T. Kongl. mit tonigem, seltener kalkigem Bindemittel (Sdst. u. Kongl.) bzw. sandig u. z.T. kalkigen Anteilen (Tonsteine); zwei sedimentativen Großzyklen <u>Unt. Zyklus</u> : grobklast. Basis; dann Sdst./Pelit WL mit eingeschalteten konglomeratischen Lagen und einigen Pyrroklasithorizonten <u>Ob. Zyklus</u> : grobklast. Basis; dann überwiegend pelitisch mit grobklast. Rinnen; untergeordnet psammitisch/psephitische Faziesgürtel; Übergreifen des Sedimentationsraumes auf bisherige Abtragungsgebiete; die Unterteilung der Leukersdorf-Folge ist aufgrund fehlender (Tuff-) Leithorizonte an den Beckenrändern schwierig; schwache vulkan. Aktivität
Planitz-Folge Stufe der unteren vulkanischen Tuffe und Ergüsse ¹⁾ M _{ges} bis >265m	0- >50	<u>Obere Teilfolge</u> : feinklastische Sequenzen (z.T. karbonatisch) der Überschwemmungsebenen mit einzelnen geringmächtigen gröberklastischen und mehreren pyroklastischen Einschaltungen (3 Leithorizonte); mehrere ignimbritische Abfolgen; verstärkte Absenkungen und Differenzierung in der Beckenentwicklung; Neueinsatz der Sedimentation im E der VES; <i>Basisdiskordanz</i>
	15- >120	<u>Untere Teilfolge</u> : verschiedene Horizonte basischer Tuffe und Vulkanite; konglomeratische bis pelitische Schuttfächersedimente; terrestrische bis fluviatile Ton- u. Schluffsteine mit basischen Tuffen u. Vulkaniten; starke Variationen in Ausbildung u. Mächtigkeit in Abhängigkeit von tekton. und vulkan. Aktivität

Stratigraphie	M (m) ²⁾	Kurzbeschreibung, Bemerkungen
Härtensdorf-Folge Obere Teilfolge: Stufe der unteren vulkanischen Tuffe und Ergüsse Untere Teilfolge: Stufe der Liegendsandsteine und -letten ¹⁾ M _{ges} bis >265m	meist 20-40 max. >100 bis >195	<u>Obere Teilfolge</u> : Sedimentationsraum deutlich über den der Unteren Teilfolge hinausgehend; Schwemmfächersedimente (flood plain sediments) mit einigen eingeschalteten pyroklastischen Horizonten (Taupaddel-Tuff als Leithorizont); hangend vorwiegend Schluff- und Tonsteine; <i>Basisdiskordanz</i> <u>Untere Teilfolge</u> : Kongl.- bis Schluff-/Tonsteinabfolge (im oberen Abschnitt dominierend), lokal mit schwachen palustrischen Entwicklung und geringmächtigen lakustrischen Karbonaten im Topbereich; meist toniges oder kalkig-dolomitisches Bindemittel; typisch sind die basalen (rot)braunen Kongl.; größere Schwemmfächer (alluvial fans) mit mächtigem Basalkongl. ("Graues Konglomerat") und Schlammstromabsätzen die stark erosiv das flözführende Karbon überlagern; lokal dünne Brandschieferlagen bis Steinkohlenflözen ("Wildes Kohlengeb."); Arkosesdst. und rote Letten; lokal gediegen Kupfer; rascher horizontaler und vertikaler Fazieswechsel; <i>Basisdiskordanz mit deutlichem Hiatus über schrägestelltem z.T. erodiertem Westfal D</i>
Karbon		
Zwickau Schichten Westfal D (vgl. Anlage 2)	bis >350	basaler Melaphyr (bis zu 80m mächtige Decke); in den basalen Abschnitten fein- bis grobkörnige, porenarme Sdst. und Kongl. mit phyllitischem Detritus verkittet; zum Hang. zudem Schiefertone mit Steinkohlenflözen (die nach N erodiert (Abwaschung) und nach Süd versteint sind, bzw. am Grundgeb. auskeilen; Einfallen (Zwickau) 12-18° nach N-NNE) und Sdst. Top, z.T. Arkosen; im Raum Oelsnitz tiefe konglomeratische Erosionsrinnen im Topbereich; Flözeinfallen in Richtung Ausstrich häufig zunehmend (Oelsnitz 10-30°); im Raum Leukersdorf Porphyrite und Tuffe; <i>Basisdiskordanz</i>
Flöha Schichten Westfal B/C (vgl. Anlage 2)	60-100	Konglomerate, Sandsteine, z.T. Schiefertone mit Steinkohlenflözen, Rhyolite; Vorkommen nur im östlichsten Teil der VES; <i>Basisdiskordanz</i>
Oberkarbon	Granite (Jüngerer und älterer Intrusivkomplex); Rhyolite	
Hainichen Schichten Visè III β/γ	400; z.T. bis 1000	Frühmolasse; basales Grundkongl. mit sandig-grusigem Bindemittel, Kongl. (mit granitischen Geröllern), Schiefertone z.T. mit Steinkohlenflözen, lokal Sdst., Arkosen; Vorkommen nur im der VES nordöstlich vorgelagerten Becken von Hainichen; Schichten steil aufgerichtet; steil einfallender NW-Flügel; <i>Basisdiskordanz</i>
Altpaläozoikum und Präkambrium des die VES umgebenden Grundgebirges: Tonschiefer, Grauwacken, Quarzite, Phyllite, Glimmerschiefer, Gneise, Granulite, Diabase und Diabastuffe, Kiesel- und Alaunschiefer, Kalksteine und Kalkschiefer, (quarzitische) Sandsteine		

Quellen: SCHNEIDER et. al. (1996), BRAUSE et al. (1997), VEB HYDROGEOLOGIE (1977), ZGI (1984), BLÜHER (1960), BLÜHER (1968), DABER (1992), STEINKOHLN-A-V (1912), STUTZER (1935), RUDER (1998); Rotliegendes nach FISCHER (1990), BLÜHER (1967) ¹⁾ Bezeichnung alte Stratigraphie nach PIETSCH (1963) ²⁾ Mächtigkeit, ca.

3.3 Tektonische Entwicklung

Die tektonische Entwicklung des weiteren Vorerzgebirgssenkensraumes ist von entscheidender Bedeutung für das Auftreten der heutigen kluft- und störungsgebundenen Grundwässer. Die heute im Bereich der VES anzutreffenden Sedimentations- und insbesondere Störungsmuster bestimmen entscheidend die hydrogeologischen Verhältnisse. Sie sind Folge einer sehr differenzierten geologisch-tektonischen Entwicklung des vorerzgebirgischen Molassetroges unter Einfluss sich häufig und schnell ändernder tektonischer Spannungsfelder und Weitungsräume. Dies führte zu in Zeit und Raum stark variierenden Orientierungen von Störungen einschließlich Reaktivierungen und Richtungsänderungen bereits vorhandener tekto-

nischer Strukturen.

FISCHER 1990 unterscheidet für den Bereich der VES die folgenden Stadien der Beckenentwicklung, die nach INGERSOLL 1988, GOLOMBEK u.a. 1983 und SCHABROTH 1990 typische Merkmale einer kontinentalen Riftentwicklung darstellen.

- Einfache Depression (Hainichen-Schichten bis Untere Teilfolge der Härtensdorf-Folge)
- Taphrogene Senke (Obere Teilfolge der Härtensdorf –Folge bis Basis Mockern-Tuff der Unteren Teilfolge der Planitz-Folge)
- Riftsenke (Hangendes der Unteren Teilfolge der Planitz-Folge)
- Vulkanogen-differenzierte Senke (Obere Teilfolge der Planitz-Folge bis Top Leukersdorf-Folge)
- Kratonale Senke (Gera-/ Mülsen-Folge, Zechstein)

Die VES liegt im Bereich der Vogtländisch-Mittelsächsischen Synklinalzone. Diese grenzt nördlich an die Ostthüringisch-Mittelsächsische- und südlich an die Fichtelgebirgs-Erzgebirgs-Antiklinalzone. Ausgangspunkt der Entwicklung der VES war ein variszisch konsolidiertes, gefaltetes und von Störungen durchsetztes Fundament altpaläozoischer Gesteinsformationen (sudetische und erzgebirgische Phase der variszischen Orogenese mit Hauptfaltung und Anlage des Großfaltenbaues; Kompressionsregime).

Die VES ist eine intramontane Senkenstruktur. Sie ist Ergebnis einer spätvariszischen postkollisionalen Extension (kontinentale Dehnungstektonik) zwischen zwei "metamorphic core" Komplexen, dem Granulitgebirge in N und NW und dem Erzgebirge in S und SE (SCHNEIDER et. al. 1996). Die tektonischen Spannungsverhältnisse während dieser Equilibrierungsphase sind jedoch außerordentlich komplex und noch nicht vollständig verstanden (KRONER et al. 2004). So führte die Überlagerung unterschiedlich ausgerichteter Druckregimes zu einer räumlich und zeitlich sehr differenzierten Extensions- bis Kompressionstektonik – ein Szenario das die Entwicklung des weiteren Vorerzgebirgssenkensraumes lange begleiten sollte.

Die Anlage der VES, und damit der Beginn der Molassensedimentation, erfolgte im obersten Silur, im Bereich des nach SE einfallenden altvariszischen Zentralsächsischen Lineaments (WATZNAUER 1965, KURZE 1966), einer NE-SW streichenden Tiefenbruchzone, die nach CONRAD u. a. 1983 durch die Plauener Störung und die Granulitgebirgsrandstörung im N und die Falkenstein-Thalheim-Siebenlehnener Störungszone im S begrenzt wird. Das Zentralsächsische Lineament tritt im Bereich der VES als eine Zone von Abschiebungen am SE-Rand des Granulitgebirges und am NW-Rand des Erzgebirges auf.

Ebenfalls variszischen Alters ist die Anlage der Finne-Kyffhäuser-Gera-Jachymov-Zone, eines NW-SE verlaufenden weitreichenden Lineaments das sich, den westlichen und zentralen Teil der VES streifend, von der NE-Flanke des Thüringer Beckens bis nach Nordböhmen erstreckt. Dieses alte, Gebiete unterschiedlichen Krustenbaus trennende Lineament (BRAUSE 1995) wurde postvariszisch mehrfach aktiviert und beeinflusste so maßgeblich den Sedimentationsvorgang sowie die spätere saxonische Bruchtektonik im Übergangsstockwerk und Deckgebirge (VEB HYDRO 1980 u.a., siehe unten). SCHRÄBER (1983) nennt eine Breite dieser Scherzone von rund 10 km. Nach BANKWITZ et al. (1993) bzw. WITTENBURG (1997) und BRAUSE et al. (1997, 1999) konnten auch rezent geringe horizontale Bewegun-

gen nachgewiesen werden (4 bzw. 1 mm/Jahr).

Eine dritte überregionale Störungszone, die meridionale Zone von Plauen-Leipzig-Dessau (Naab-N-S-Element), streift den westlichen Teil der VES (SCHNEIDER et. al. 1996).

Für die Finne-Kyffhäuser-Gera-Jachymov-Zone und die meridionale Zone von Plauen-Leipzig-Dessau sind auch rezent seismologische Aktivitäten nachgewiesen die auf Bewegungen an diesen Störungen hinweisen (WENDT et al. 1996)

Erste (prä-erzgebirgische) lokale Molassebildungen in eine von strike slip Bewegungen initiierte einfache Depression werden durch Sedimente der Hainichener Schichten (Visé III β/γ), Flöha Schichten, Zwickauer Schichten und der Härtensdorf-Folge bis zur Grenze Untere/Obere Härtensdorf-Teilfolge von jenem alten variszischen Bauplan kontrolliert (FISCHER 1990). Die in mehrere Teilbecken sedimentierten karbonen kohleführende Molassen wurden sicher synsedimentär von tektonischen Bewegungen begleitet (BRAUSE et al. 1997), wobei es in diesem von NE-SW Richtungen dominierten tektonischen Regime nur zu geringen vertikalen Versätzen kommt. Vor der Sedimentation der ersten Rotliegendfolgen kommt es zunächst zu einer teilweisen Erosion der karbonen Schichten (zur Beckenentwicklung im Karbon vgl. auch HOTH 1984 und DÖRING et al. 1988).

Beginnend im Sedimentationszeitraum der Oberen Härtensdorf-Folge, weist die strukturelle Entwicklung in der VES Merkmale der Ausbildung einer dreiarmligen Riftstruktur (triple junction), diskonform zu den bisherigen variszischen Strukturen auf, die von FISCHER 1990 als „Westsächsische triple junction Struktur“ bezeichnet wird. Danach bestimmen drei Grabenstrukturen mit ihrem Zentrum nördlich von Werdau die Beckenentwicklung im Sedimentationszeitraum der Oberen Härtensdorf- und Unteren Planitz-Folge:

- NNW-SSE; dominierende Struktur mit höchsten Absenkungsbeträgen und intensivem Vulkanismus
- NE-SW; weniger stark ausgeprägte Struktur
- WNW-ESE; Struktur mit geringeren Absenkungsbeträgen, die nach E in die NE-SW Orientierung des Zentralsächsischen Lineaments umschwenkt

Diese Orientierungen werden teilweise auch durch die heutigen Störungssysteme repräsentiert. Innerhalb dieses tektonischen Weitungsregimes kommt es zunehmend zu Absenkungen in von den Randstörungen umgrenzten Bereichen. Die Westsächsische triple junction Struktur stellt den Beginn einer „failed rift“ Entwicklung dar, die im Bereich der VES mit dem Ausklang der herzynischen Orogenese im Unterperm die Anlage eines interkratonalen Beckens einleitet (INGERSOLL 1988).

Bei abklingender riftogener Entwicklung werden im Stadium einer vulkanogendifferenzierten Senke die Sedimente der Oberen Planitz-Folge und der Leukersdorf-Folge diskordant über den Sedimenten der Unteren Planitz-Folge abgelagert. Diese Sedimentation wird an der Basis des Oberrotliegenden 1 (Hangendes Leukersdorf-Folge) von mehreren zeitlich gestaffelten tektonischen Impulsen (saalische und subsaalische Bewegungen) und resultierenden lokalen Diskordanzen begleitet (FISCHER 1990). Nach erneuten tektonischen Impulsen folgen nach deutlichem Hiatus im Hangenden der Leukersdorf-Folge die Ablagerungen der Gera-/ Mülsen-Folge als Beginn einer weitspannigen kratonalen Senkenbildung. Nach Sedimentation der Gera-/ Mülsen-Folge folgt eine Phase intensiver tektonischer Aktivität, die jedoch bereits mit Beginn der Zechstein-Transgression wieder abklingt. Davon

zeugt eine deutliche tektonische Zerböckung von Grundgebirge und Übergangsstöckwerk, sicherlich entlang reaktivierter alter herzynischer Richtungen (NW-SE; Störungssystem der Gera-Jachymov-Zone) und meridional (N-S) streichender Störungen. Im Hangenden der Gera-/ Mülsen-Folge folgt, fast ungestört, Zechstein.

Eine erneute Aktivierung der NW-SE Richtung mit einhergehender starker Bruchtektonik erfolgte in postvariszischer (saxonischer) Zeit und führte zur Heraushebung von Erzgebirge und Granulitgebirge gegenüber der VES entlang reaktiver Störungen des zentralsächsischen Lineaments (Erzgebirgs- und Granulitgebirgsrandstörungen). Tabelle 7 dokumentiert die zeitliche Abfolge tektonischer Spannungsfelder im Bereich der VES und ihre Auswirkungen auf das tektonische Inventar.

Tabelle 7 Tektonische Entwicklung im Bereich der Vorerzgebirgssenke und deren Umland

(nach SCHNEIDER et. al. 1996, BRAUSE et al. 1997, 1999, VEB HYDROGEOL.-ZWICKAU 1977, ZGI 1984, BLÜHER 1960, BLÜHER 1968, DABER 1992, STEINKOHLN-A-V 1912, STUTZER 1935, RUDER 1998 u.a.; Rotliegendes nach FISCHER 1990, BLÜHER 1967)

Stratigraphie	Tektonik, Schlussfolgerungen für rezente Hydraulik	Symbolik ¹⁾
Quartär	geringe horizontale und vertikale Bewegungen, mglw. als Folge saxonischer Tektonik	
Tertiär Neogen	<u>saxonische Tektonik</u> (Bruchtektonik); Heraushebung des Erzgebirges; Reaktivierung alter NW-SE Richtungen (?) = eine Grundlage für die erhöhte hydraulische Aktivität herzynischer Störungen	
Paläogen	<i>Basisdiskordanz</i>	
Kreide, Jura, Trias	<i>synalpidisch-saxonische Tektonik</i> (Bruchtektonik); Reaktivierung alter NW-SE und anderer (?) Richtungen; <i>Basisdiskordanz</i>	
Perm Zechstein	<i>Basisdiskordanz mit deutlichem Hiatus</i>	
Oberstes Rotliegendes	<i>Tektonische Zerböckung</i> in NW-SE und N-S (meridionaler) Richtung; Einfallen der Verwerfungen meist 45-60°; Sprunghöhen meist zwischen 0,1 und 30m	
Gera-Mülsen-Folge	<i>Basisdiskordanz mit deutlichem Hiatus</i>	
Grenze Ob. Oberrotliegend I– Oberrotliegend II	<i>Altmark-Bewegungen</i> : bis in den Sedimentationszeitraum der Gera-/ Mülsen-Folge andauernd; NW-SE Expansionsregime jetzt deutlich vorherrschend	
Leukersdorf-Folge	<i>saalische und subsaalische Bewegungen</i> : Bruchtektonik, mehrere tektonische Impulse; ab Basis Leukersdorf-Folge mit lokalen Diskordanzen; Intrusion der Innengranite Aktivierung von NW-SE verlaufenden tekton. Strukturen im Sedimentationszeitraum der Unteren Leukersdorf-Folge	
Planitz-Folge	<u>Obere Teilfolge</u> : verstärkte Absenkungen und Differenzierung in der Beckenentwicklung; <i>Basisdiskordanz</i>	
Härtensdorf-Folge	<u>Härtensdorf (Obere Teilfolge) bis Planitz (Untere Teilfolge)</u> : Triple junction-Grabenstruktur; zunehmend starke Absenkungen in von Randstörungen umgrenzten Bereichen innerhalb eines tektonischen Weitungsregimes; NE-SW Richtung dominierend; örtlich und zeitlich deutlich wechselnde vulkan. und/oder tekton. Aktivität; <i>Basisdiskordanz</i>	

Stratigraphie	Tektonik, Schlussfolgerungen für rezente Hydraulik	Symbolik ¹⁾
	<u>Untere Teilfolge</u> : strike-slip Bewegungen in NE-SW Richtung mit geringen vertikalen Versatzbeträgen; Bruchtektonik; <i>Basisdiskordanz mit deutlichem Hiatus</i>	
Grenze Rotliegend - Karbon	Schrägestellung Schichten (Westfal D) = Nachphase der asturischen Phase ?, Plutonintrusionen ?; vermutlich Wechsel des tektonischen Regimes (BRAUSE 1999)	
Karbon <i>Zwickauer Schichten</i>	Westfal D/Stefan: Strike-slip Bewegungen in NE-SW Richtung mit geringen vertikalen Versatzbeträgen; Beginn Dehnungs- und Molassentektonik (syndimentäre Tektonik, asturische Phase); Hauptrichtungen um N-S und NW-SE; <i>Basisdiskordanz</i>	
Westfal C bis C/D	<i>Variszische Hauptfaltung: Asturische Phase</i> : Haupteinengungszeit im Bereich d. Saumsenken; in der VES vermutlich zeitl. etwas früher; wahrscheinlich Überlappung des zeitlich-räumlichen Kompressionshöhepunktes mit ersten Phasen der Dehnungs- und Molassentektonik (BRAUSE et al. 1997 u.a.) → syndimentäre Tektonik im Westfal D	
<i>Flöha Schichten</i>	Westfal B/C: Strike-slip Bewegungen in NE-SW Richtung und N-S Weitungsregime; <i>Basisdiskordanz</i>	
Namur	<i>Variszische Hauptfaltung: Erzgebirgische Phase</i> (Namur A/B) mit leichter Einengung des Hainichener Beckens; jedoch weiterhin Übergang zu Extensionsregime; Intrusion der Granite von Kirchberg und Eibenstock	
<i>Hainichen Schichten</i>	Visè III β/γ: Übergang von Kompression zu Extensionsregime im höheren Unterkarbon; Strike-slip Bewegungen in NE-SW Richtung; <i>Basisdiskordanz</i>	
Unteres Obervisè	<i>Variszische Hauptfaltung: Sudetische Phase</i> ; Anlage von Störungen im Grundgebirge; Kompressionsmaximum	
Prä-Unteres Obervisè	Variszische Überprägung des Grundgebirges: u.a. sudetisch, reußisch, bretonisch u.a.) Faltung, Störung, Konsolidierung	
Prävariszisch	Konsolidierung, Metamorphose und Störung durch prävarisz. Tektonik	

¹⁾ Pfeile repräsentieren, wenn nicht anders gekennzeichnet, die tektonischen Hauptrichtungen bzw. Einengungsrichtungen; vertikale Anordnung deutet eine zeitliche Abfolge an; wichtigste Quelle FISCHER (1990); ²⁾ resultierende Hauptdehnungsrichtungen nach BRAUSE (2000); ³⁾ tektonische Hauptrichtungen interpretiert nach WITTENBURG (1997) und BRAUSE (1999)

Heute dominieren in der Vorerzgebirgssenne herzynische NW-SE und erzgebirgische NE-SW Richtungen von Störungen und Kluftzonen, die auch für die Grundwasserdynamik besonders bedeutend sind (Abschnitt 4.3).

3.4 Hydrogeologie

Der Vorerzgebirgssenenraum kann aus hydrogeologischer Sicht in vier zeitlich und strukturell verschiedene Systeme unterteilt werden:

- das tertiäre und quartäre Deckgebirge
- die karbone bis permische Senkenfüllung
- der Übergang in das Perm bis Mesozoikum der Zeitz-Schmöllner Mulde

- das umgebende altpaläozoische bis präkambrische Grundgebirge/ Senkenbasis

Die hangenden känozoischen Bildungen stellen dabei klassische Lockergesteinsgrundwasserleiter bzw. bei feinklastischer Ausbildung -hemmer dar. Beim Grundgebirge handelt es sich – wenn als Grundwasserleiter eingestuft – um Kluftgrundwasserleiter. Gleichmaßen kann die permokarbone Senkenfüllung und der nordwestliche Übergang in die Zeitz-Schmöllner Mulde als ein aus verschiedenen hydrogeologischen Einheiten bestehender Kluftgrundwasserleiterkomplex mit, in Teilen, Doppel-Porositäts-Eigenschaften charakterisiert werden. Die Grundwasserführung innerhalb der genannten Systeme variiert in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Lage beträchtlich. Dabei spielen im Festgesteinsbereich Kluft- und Störungszonen eine entscheidende Rolle (Abschnitt 3.3).

Die Abgrenzung der hydrogeologischen Einheiten im Bereich der Vorerzgebirgssenke folgt im wesentlichen der stratigraphischen Einteilung der geologischen Einheiten (Abschnitt 3.2). Einige geologische Einheiten können entsprechend ihrer variierenden lithologischen Ausbildung in verschiedene hydrogeologische Einheiten untergliedert werden. Jedoch unterscheiden sich auch diese Einheiten in bezug auf ihre hydrogeologischen Eigenschaften regional oft erheblich. Dies erschwert die Entwicklung einer allgemein gültigen hydrogeologischen Modellvorstellung.

Eine Analyse, Auswertung und Diskussion der größermaßstäblichen hydrogeologischen Verhältnisse in der VES und ihrem Umland erfolgt in Abschnitt 4.2.

Känozoische Schichtenfolgen

Bei den quartären Lockergesteinsbildungen handelt es sich neben anthropogenen Ablagerungen und lokalen Hangschuttbildungen zumeist um fluviatile Sedimente die sich in ihrer Verbreitung auf die Fluss- und Bachtäler, insbesondere der Zwickauer Mulde, aber auch der Pleiße, Chemnitz und Zschopau und einiger Bäche beschränken.

Tertiäre Bildungen sind nur in reliktischer Form auf Hochflächen im westlichen Teil der VES erhalten. Als eigenständige Grundwasserleiter sind sie nur in der weiteren Region Helmsdorf-Dänkriz relevant.

Die känozoischen Bildungen insgesamt sind Teil des obersten Grundwasserstockwerkes. Sie sind aufgrund ihrer begrenzten Verbreitung und geringen Mächtigkeit nur für lokale Grundwasserflusssysteme von Bedeutung.

Permokarbone Senkenfüllung und Übergang in die Zeitz-Schmöllner Mulde

Die permokarbonen bis mesozoischen Schichtenfolgen werden vom Liegenden zum Hangenden aus den karbonen Hainichen-, Flöha- und Zwickau-Schichten sowie den rotliegenden Härtensdorf-, Planitz, Leukersdorf- und Gera-/Mülsen-Folgen, dem Zechstein und der Trias aufgebaut. Sie stellen Kluftgrundwasserleiter dar. Die Auflockerungszone, die oberen Abschnitte der Gera-/ Mülsen-Folge, Teile der Leukersdorf-Folge sowie grobklastische Einschaltungen im unteren Rotliegenden (Planitz-Folge und Härtensdorf-Folge) können darüber hinaus auch als Poren- bzw. Doppelporositäts-Grundwasserleiter wirksam werden. Die Gesamtabfolge baut sich i.d.R. aus Wechselfolgen grundwasserleitender, -geringleitender und –hemmender Schichten auf. Neben den im östlichen Randbereich auftretenden Flöha- und Hainichen-Schichten weisen Gera-/Mülsen-Folge, der Zechstein und das Mesozoikum im

Vergleich zum tieferen Rotliegenden erhöhte Durchlässigkeiten auf. Gleiches gilt für die Auflockerungszone bzw. die Ausstrichbereiche aller Schichtenfolgen an den Senkenrändern.

Altpaläozoisches bis präkambrisches Grundgebirge

Das die Vorerzgebirgssenke umgebende/unterlagernde Grundgebirge baut sich aus vielfältigen Gesteinen wie Tonschiefern, Grauwacken, Quarziten, Phylliten, Glimmerschiefern, Gneisen und Diabasen auf. Unterhalb der Auflockerungszone weisen sie mehrheitlich hydraulische Leitfähigkeiten auf, die deutlich unter jenen der Rotliegendesedimente der Vorerzgebirgssenke liegen (VEB HYDRO 1977-1982, BLÜHER 1960, HOPPE 1952, DEUBEL 1944, GRAHMANN 1944, GRAHMANN 1943) und sind zumeist als Grundwassergeringleiter oder –hemmer einzuordnen.

Kluft- und Störungssysteme

Wesentliche Grundwasservorkommen in der Vorerzgebirgssenke sind zumeist an tektonische Kluft- und Störungssysteme gebunden. Dies gilt sowohl für das Altpaläozoikum im Liegenden der VES und die generell eher grundwasserarmen Schichten des Karbon und Teile des unteren Rotliegenden als auch für die reichlich grundwasserführenden Bereiche des oberen Rotliegenden, vor allem in der Gera-/Mülsen-Folge (VEB HYDRO 1977-1982, ZGI 1984 u.a.). Arbeiten in den vergangenen Jahren insbesondere im Raum Zwickau (KOLITSCH et al. 2000, BRAUSE 1999) bestätigen, dass die Grundwasserdynamik in der Vorerzgebirgssenke maßgeblich von Grundwasser-Bewegungen auf Kluft- und Störungszonen bestimmt wird. NW-SE (herzynischen) und NE-SW (erzgebirgischen) ausgerichteten Elementen fällt dabei die größte Bedeutung zu (Abschnitt 4.3). Hydraulisch wirksame Störungszonen können darüber hinaus eine hydraulische Verbindung zwischen den hydrogeologischen Einheiten herstellen und spielen so auch für die Ausbildung von Grundwasserstockwerken eine wichtige Rolle.

Grundwasserstockwerksbau

Grundwasserstockwerke sind in der Vorerzgebirgssenke in Abhängigkeit von der Verbreitung der hydrogeologischen Einheiten, ihrer lithologischen Ausbildung und geologischen Lagerung und den tektonischen Verhältnissen sehr unterschiedlich ausgebildet. Aufgrund dieser stark wechselnden Randbedingungen sind detaillierte Kenntnisse zur Stockwerksgliederung nur lokal vorhanden und lassen sich nicht ohne weiteres auf andere Gebiete übertragen. Problematisch ist deshalb die Ausweisung von Grundwasserstockwerken bzw. Grundwasser-Horizonten im regionalen Maßstab. Die hydraulischen Eigenschaften und damit die Grundwasserführung auch innerhalb einzelner geologischer Einheiten wechseln häufig auch kleinräumig. Lokal bekannte Stockwerksgliederungen (wie z.B. im Bereich Lungwitztal oder in Zwickau) können untereinander nicht ohne weiteres korreliert bzw. für größere Bereiche der Vorerzgebirgssenke verallgemeinert werden.

Die auf Grundlage des bisherigen Kenntnisstand zur Hydrogeologie im weiteren Vorerzgebirgsraum entwickelten Interpretationen und Zusammenfassungen in Bezug auf die großräumigen hydrogeologischen Verhältnisse und die Hydraulik der tieferen Grundwasserstockwerke werden im Abschnitt 4.2 ausführlich diskutiert.

4 Ergebnisse

Die Ergebnisdiskussion gliedert sich in 9 Schwerpunkte, die in separaten Abschnitten dargestellt werden.

Sie beginnt im Abschnitt 4.1 mit der Analyse und Auswertung internationaler Publikationen zu Hydraulik und Charakter tiefer Grundwässer in sedimentären Senkenstrukturen weltweit und bildet so Diskussionsgrundlage und Vergleichsmöglichkeit für die Verhältnisse im Vorerzgebirgssenenraum. Im Mittelpunkt des Abschnittes 4.2 steht die Diskussion des hydrogeologisch-strukturellen Baus der Vorerzgebirgssenke und der angrenzenden Einheiten und dessen Einfluss auf die Grundwasserhydraulik. Abschnitt 4.3 geht spezieller auf die Entwicklung und Einschätzung der hydrogeologischen Bedeutung von Störungs- und Kluftzonen inklusive Beispielrechnungen ein. Die den Störungseigenschaften zugrunde liegenden ehemaligen und rezenten Stressregimes gehen in die Diskussion ein. Es folgt die Auswertung wichtiger Aspekte des Grundwasserhaushaltes, insbesondere der unterirdischen Einzugsgebietsgrenzen und der Grundwasserneubildung (Abschnitt 4.4). Eine Beschreibung und Bewertung der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich der Vorerzgebirgssenke erfolgt, unter anderem im Sinne einer Typisierung, in Abschnitt 4.5. Abschnitt 4.6 diskutiert die Herkunft und Bedeutung hochmineralisierter tiefer Grundwässer und ihre Einordnung in den weiteren hydraulischen Kontext. Das konzeptionelle hydrogeologische Modell (Abschnitt 4.7) der Vorerzgebirgssenke stellt die Grundlage für das hydrogeologische Modell (Abschnitt 4.8) dar. Die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse der hydraulischen Modellierung (Abschnitt 4.9) beschließt die Ergebnisdiskussion.

4.1 Literaturstudie: Hydraulik und Charakter tiefer Grundwässer in sedimentären Senken

4.1.1 Einführung, Zielstellung und Systematik

In den Grubenbauen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus um Zwickau und Lugau-Oelsnitz sowie in einigen zumeist tieferen Bohrungen im weiteren Vorerzgebirgssenenraum wurden höher mineralisierte Grundwässer aufgeschlossen (Abschnitt 4.2, Anlage 3). In den Steinkohlengruben waren solche zufließenden Grundwässer eher als Störfaktoren für den Bergbaubetrieb von Interesse. Aussagekräftige chemische Analysen aus der Zeit des aktiven Bergbaus fehlen daher fast gänzlich. Weitere dokumentierte Vorkommen tiefer Grundwässer und begleitende hydraulische Tests beschränken sich auf wenige Aufschlüsse, insbesondere einige neuere im Raum Zwickau.

Insbesondere das Auftreten der höher mineralisierten Wässer wirft Fragen über den Charakter, die Genese und das hydraulische Verhalten tiefer Grundwässer im allgemeinen im Vorerzgebirgssenenraum auf. Aufgrund der geringen Anzahl tiefer Grundwasseraufschlüsse ist die Datenlage zu tiefen Grundwässern jedoch äußerst begrenzt (Abschnitte 4.5 und 4.6).

Um die sich daraus ergebenden Defizite im hydrogeologischen Kenntnisstand der tieferen Bereiche der Vorerzgebirgssenke einzuschränken, wurde eine Recherche zu Ergebnissen hydrogeologischer Untersuchungen in sedimentären Senken weltweit durchgeführt. Dabei

wurden Senkenstrukturen ausgewählt, die entweder lithologisch und/oder strukturell Ähnlichkeiten mit der Vorerzgebirgssenke aufweisen bzw. in denen die dort dokumentierten hydraulischen und hydrochemischen Zustände und Prozesse Rückschlüsse auf die Verhältnisse in der VES zulassen.

Fluida bzw. Grundwässer in sedimentären Senken sind Gegenstand zahlreicher Untersuchungen und Modellierungen auf allen Kontinenten, insbesondere aber in Nordamerika, Australien und Europa (vgl. KYSER et al. 2003, GOFF et al. 1987, RUEHAAK et al. 2004). Im Mittelpunkt der meisten Untersuchungen stehen lagerstättenkundliche Fragestellungen und die Untersuchung von mit solchen Lagerstätten assoziierten Wässern. Zu solchen Lagerstätten gehören insbesondere Öl- und Gasvorkommen, aber auch Lagerstätten sedimentärer Metallerze. Die zugehörigen Senkenstrukturen sind deshalb zumeist sehr groß und mindestens einige Kilometer mächtig.

Hier liegt ein wesentlicher Unterschied zur Vorerzgebirgssenke, die mit Teufen bis maximal rund 1300m eine vergleichsweise flache Struktur darstellt. Aufgrund fehlender wesentlicher Lagerstättenvorkommen (außer den Steinkohlen) sind die tieferen Bereiche der Vorerzgebirgssenke kein Ziel aufwendiger Untersuchungen. Aufgrund der geringeren Teufe unterscheiden sich auch die in der Vorerzgebirgssenke auftretenden Grundwässer (und Grundwasserleiter) in ihrer Beschaffenheit bzw. Ausbildung von denen in tieferen Senken. Drücke und Temperaturen sind geringer. Überkritische Wässer und Fluida spielen kaum eine Rolle, die Porositäten sind noch vergleichsweise hoch und verschiedene mineralumbildende Prozesse finden nicht oder nur sehr untergeordnet statt.

Deshalb können die Ergebnisse von Forschungsarbeiten in den meisten Senkenstrukturen nicht direkt auf die Verhältnisse in der Vorerzgebirgssenke angewendet werden. Viele hydrogeologische Prozesse und Zustände beruhen jedoch auf Gesetzmäßigkeiten, die entsprechend eingeordnet, auch für die permokarbonen Folgen der Vorerzgebirgssenke gelten können. Die Auswertung solcher Forschungsergebnisse liefern deshalb wertvolle Hinweise zur Diskussion von Prozessen, hydraulischen Szenarien und methodischen Ansätzen, gerade in den tieferen hydrogeologisch nicht erschlossenen Bereichen der Vorerzgebirgssenke.

Das Ergebnis der Studie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Recherche basiert auf Stichwortsuchen in diversen Literaturdatenbanken. Die Recherche und Auswertung wurde sukzessive zwischen 2003 und 2007 durchgeführt und aktualisiert. Sie basiert fast ausschließlich auf englischsprachigen Veröffentlichungen. Zu ausgewählten Senken wurden zusätzlich Formblätter erstellt, die wichtige Aussagen und Kenngrößen dieser Strukturen und ihre Bedeutung für die Vorerzgebirgssenke zusammenfassen. Diese sind in Anlage 1 zusammengestellt.

Im folgenden werden wichtige, aus den Recherchen gewonnene Erkenntnisse zu hydraulischen Szenarien, Zusammenhängen und Parametern sowie mögliche methodische Erkundungsansätze zusammengefasst. Dabei handelt es sich weniger um eine lückenlose systematische Darstellung dieser Themenkomplexe, als um eine Zusammenstellung von Prozessen und Parametern die in den recherchierten Senkenstrukturen beschrieben wurden und die für die Beschreibung und Interpretation der Verhältnisse in der VES und für die Ableitung diesbezüglicher Aussagen interessant sein können.

Die aus der Studie ableitbaren Schlussfolgerungen für die Verhältnisse in der Vorerzgebirgs-

senke gehen darüber hinaus in die Ergebniskapitel 4.2 bis 4.9 ein.

4.1.2 Bildung tiefer Grundwässer in sedimentären Senken

Tiefe Grundwässer in sedimentären Senken sind fast immer Mischwässer verschiedener Herkunft, die im Verlaufe ihrer Entwicklung durch diverse diagenetische Prozesse (Abschnitt 4.1.4.2) beeinflusst wurden. Folgende genetische Typen können im Bereich sedimentärer Senken unterschieden werden.

Meteorische (vadose) Wässer entstehen durch Grundwasserneubildung aus Niederschlagswässern und bilden meist den Hauptanteil der an Fließprozessen beteiligten Grundwässer in den oberflächennahen Grundwasserleitern, auch in der Vorerzgebirgssenke. Ihr Anteil nimmt i.d.R. mit zunehmender Teufe ab. Grundwasserneubildung durch Schmelzwässer unter Inlandsgletschern bzw. an Eisrandlagen trugen insbesondere während der letzten Eiszeiten regional beträchtlich zur Grundwasserneubildung bei (u.a. GRASBY et al. 2005) und werden auch im Zusammenhang mit tiefen vorerzgebirgischen Grundwässern diskutiert.

Grundwässer mariner Herkunft bilden sich durch Versinkung von Meereswasser in verschiedenen geologischen Zeiträumen. Die Herkunft eines Teiles der höher mineralisierten Wässer im Bereich der Vorerzgebirgssenke aus tertiärem Meereswasser wird diskutiert (vgl. Abschnitt 4.6).

Der kontinuierliche Eintrag **juveniler/magmatischer Wässer und Gase** aus der tieferen Kruste und dem Mantel in hangende Schichten konnte durch BARNES (1988) und BURRUSS (1988) nachgewiesen werden. Diese können durch Kompression, Überdrücke und Heraushebungen aufwärts migrieren (Abschnitt 4.1.3) und sogar bis an die Oberfläche sedimentärer Senken gelangen (BETHKE, 1988).

Im Bereich der Vorerzgebirgssenke sind solche Wässer im Zusammenhang mit vulkanischer/magmatischer Aktivität während des Permokarbons von Interesse. Rezent haben sie aufgrund der geringen Teufenlage der Senkenbasis sicher keine wesentliche Bedeutung.

Konate und diagenetische/metamorphe Wässer sind synsedimentär eingebundene Wässer, entstehen durch Freisetzung von Wässern aus dem Gesteinsverband durch Kompaktion oder sind das Ergebnis von Mineralumbildungen unter Freisetzung von Fluida, so z.B. durch Illitisierung oder Dehydrierung von Gips (vgl. Abschnitt 4.1.4.2).

Diagenetisch gebildete Wässer können auch im Bereich der Vorerzgebirgssenke insbesondere in Mischungen mit anderen Wässern von Bedeutung sein. Allerdings sind im Gegensatz zu tieferen Senkenstrukturen viele Primärminerale aufgrund des geringeren Drucks noch weitgehend stabil bzw. bilden sich nur sehr langsam um, was die Fluidafreisetzung einschränkt (vgl. KYSER et al. 2003). Hier werden aus Kompaktionsprozessen freigesetzte Wässer überwiegen.

Hydrothermale Systeme

Mit zunehmender Teufe steigen die Grundwassertemperaturen entsprechend der lokal vor-

herrschenden geothermischen Tiefenstufe. Ist die geothermische Tiefenstufe sehr hoch, ändert sich über kurze horizontale Entfernungen signifikant oder wird der teufenabhängige Temperaturanstieg gestört, können die entstehenden Temperaturanomalien Ausgangspunkt temperaturinduzierter Grundwasserströmung sein (vgl. Abschnitt 4.1.3.2). Solche hydrothermalen Systeme können lokaler bis überregionaler Dimension sein. Voraussetzung bzw. beeinflussende Randbedingung für ihre Ausbildung sind neben einer Wärmequelle (natürlicher Gradient, Pluton, Reaktionswärme), die Art und Ausbildung von Grundwasserwegsamkeiten (Aquifer) sowie ggf. eine hemmende Abdeckung im Hangenden zum Erhalt des hydrothermalen Systems.

Nach GHEORGHE et al. (1993) treten thermale Aquifere in sedimentären Senken oder Plattformen ohne hydrodynamisch aktive tektonische Strukturen erst in Teufen über 1000m auf. Ausnahmen bilden magmatisch induzierte thermale Aquifere (z.B. über Plutonen) und störungsgebundene zumeist kleiner dimensionierte hydrothermale Systeme.

Für die permokarbonen Folgen in **Vor erzgebirgssenke** sowie die umgebenden Grundgebirgsbereiche könnte das letztgenannte Szenario eine Rolle spielen. So wurden in den ehemaligen Steinkohlengruben des Zwickau-Oelsnitzer Reviers im Bereich tektonischer Schwächezonen Wässer aufgeschlossen, die Temperaturen deutlich oberhalb der nach dem geothermischen Gradienten zu erwartenden aufwiesen (Abschnitt 4.2.1). Gleiches gilt für Grundwässer in Bohrungen im Bereich von Störungszonen in Schedewitz und am Kornmarkt in Zwickau, die auf einen temperaturinduzierten Grundwasseraufstieg entlang tektonischer Strukturen hinweisen können (Abschnitte 4.2.1 und 4.2.4). Hierbei handelt es sich um Niedrigtemperatursysteme ($<90^{\circ}\text{C}$, nach GHEORGHE et al. 1993). Einen Sonderfall stellen die mehr oder minder verfüllten Grubenbaue des Zwickau-Oelsnitzer Reviers dar. Hier sind aufgrund der hohen vertikalen Durchlässigkeiten die Ausbildung temperaturinduzierter Grundwasserzirkulationen prinzipiell möglich (Abschnitte 4.2.5 und 4.5.3). Letztgenannte Prozesse wurden im Rahmen eines Grubenwasserwiederanstiegs- und Qualitätsmodell detailliert untersucht (vgl. FELIX et al. 2006).

4.1.3 Grundwasserfluss in sedimentären Senken

4.1.3.1 Konzepte zu Grundwasser- und Fluidbewegungen in sedimentären Senken

Sedimentäre Senken weisen in Abhängigkeit von den geologischen und hydrologischen Gegebenheiten und der Teufenlage meist unterschiedliche von einander mehr oder minder abgegrenzte Grundwasserfließsysteme auf (Abschnitt 4.2.2). Die Antriebskräfte des Grundwasserflusses beruhen auf Potentialunterschieden bei Druck, Dichte, Temperatur und Konzentration und dem Bestreben diese auszugleichen. Zur konzeptionellen Beschreibung der Grundwasserfließvorgänge in sedimentären Senkenstrukturen ist eine Unterscheidung von drei Dominanzsystemen des Grundwasserflusses sinnvoll.

- Topographie- induzierter Grundwasserfluss
- Dichte- induzierter Grundwasserfluss

- Druck- induzierter Grundwasserfluss

Die genannten physikalischen Triebkräfte spiegeln sich in verschiedenen natürlichen Prozessen wider, die in Abschnitt 4.1.3.2 näher erläutert werden.

- Schwerkraftwirkung
- Auftrieb (buoyancy)
- Kompaktion
- tektonische Impulse
- Konzentrationsänderungen mit resultierender Dichteänderung
- Volumenänderung durch Lösungsvorgänge und Mineraltransformationen
- Osmotische Prozesse mit resultierenden Konzentrations- und Volumenänderungen
- Temperaturänderungen mit resultierenden Volumen-, Dichte- & Viskositätsänderungen
- Sonstige (z.B. Kapillarkräfte)

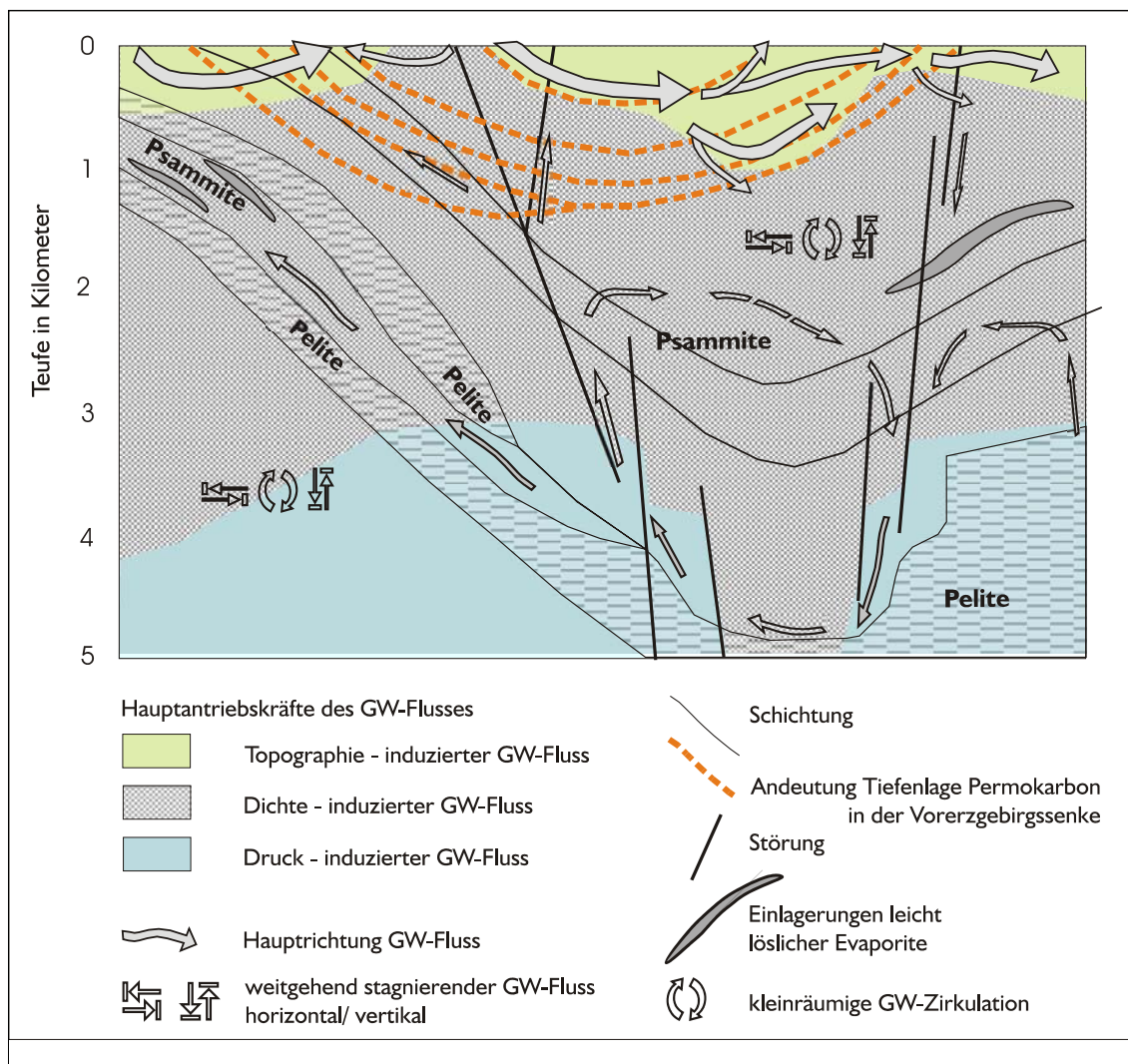


Abbildung 8 Schema typischer Grundwasserfluss-Regimes in sedimentären Senken
(nach MORSE et al. (1997) und HANOR et al. (1990), stark verändert, Erläuterung vergleiche Text)

Grundwasserbewegungen sind letztlich das Resultat der Überlagerung verschiedener, sich zum Teil gegenseitig bedingender, verstärkender oder einander entgegenwirkender Antriebskräfte. HANOR und SASSON (1990) und MORSE et al. (1997) diskutieren die räumliche Lage der dominierenden Antriebskräfte beispielhaft anhand der Verhältnisse im südlichen Louisiana Gulf Coast Becken. Abbildung 8 zeigt ein daraus abgeleitetes verallgemeinertes Schema zum Wirken der wichtigsten Antriebskräfte hydraulischer Regimes, wie sie in vielen Senkenstrukturen vorherrschen.

In den meisten sedimentären Senkenstrukturen ist **Topographie-induzierter Grundwasserfluss** in den oberen 400 bis 600m die dominierende Triebkraft, kann oft aber auch deutlich tiefer, bis in Teufen von über 1,5km dominant weiterwirken (hellgrüner Bereich in Abbildung 8) (Erläuterungen zu den Triebkräften vgl. unten).

In Teufen über 500m geht die Dominanz gravitativer Fließvorgänge häufig allmählich in **Dichte-induzierten Grundwasserfluss**, hervorgerufen durch Salinitäts- und/oder Temperaturunterschiede des Grundwassers, über. Lokal kann diese Dominanz auch bis in die obersten Grundwasserleiter hinaufwirken (grau signierter Bereich). Thermalquellen können Ausdruck solcher Fließsysteme sein. Die Ausbildung Dichte-induzierten Grundwasserflusses erfolgt jedoch nicht notwendigerweise, sondern ist von bestimmten Randbedingungen abhängig (Abschnitt 4.1.3.2). So beschreiben ALMASI (2003) und TOTH (2003) für die Ungarische Senke den direkten Übergang Topographie-induzierten Grundwasserflusses in Druck-induzierten ohne Ausbildung einer durchgehenden Zone freier Konvektion.

Ab rund 3km Teufe geht Dichte-induzierter zunehmend in **Druck-induzierten Grundwasser- bzw. Fluidafluss** über (hellblauer Bereich in Abbildung 8), bei entsprechenden Voraussetzungen reicht dieser jedoch auch weit höher und kann, wie erläutert, Dichte-induzierte Grundwasserbewegungen weitgehend ersetzen. Für die vergleichsweise flachen (<2km) permokarbonen und oberen kristallinen Bereiche der **Vorerzgebirgssenne** dürfte Druckgetriebener Grundwasserfluss i.d.R. eine eher untergeordnete Rolle spielen.

Konzentrations-induzierter Grundwasserfluss (inklusive Osmoseprozesse mit resultierendem Dichte-/Druckaufbau) und **tektonisch-induzierter Grundwasserfluss** sind meist lokal wirkende Phänomene, die unabhängig von der Teufenlage auftreten können.

Entwickelt man eine von BACHU (1995) angeregte Modellvorstellung in Anlehnung an Abbildung 8 weiter, so kann man sich die Vorerzgebirgssenne als einen Raumkörper aus verschiedenen Sphären vorstellen. Sie repräsentieren die den Grundwasserfluss antreibenden dominierenden Kraftfelder. Die Verteilung der Sphären ist dabei in Zeit und Raum variabel. Die Stärke und Dynamik der im oberen Modellbereich verbreiteten Sphere „Triebkraft Gravitation“ ist dabei am größten. Schwankt sie in ihrer Intensität und Ausrichtung kann sie den tieferen Dichte- und Druck-induzierten Wirkungsbereichen Raum geben, die sich dann nach oben ausdehnen bzw. wieder zurückweichen.

In diesem großmaßstäblichen Kräftegefüge bilden sich kleinere räumlich und zeitlich variable Sphären abweichender Druckverteilungen, hervorgerufen durch lokale Konzentrationsanomalien, tektonische Impulse oder diagenetische Vorgänge, die sich verändern und wieder vergehen.

In dieses Schema fügen sich Beobachtungen von HANOR et al. 1998 ein, der die Druckregimes im Grundwasserbereich als „meist transient und instabil“ bezeichnet, wobei Grundwasser- und Fluidbewegungen entweder stabil (NEUZIL 1988) oder episodisch (CATHLES 1988) erfolgen können.

Die Bedeutung tektonischer Strukturen

In vielen sedimentären Senken ist die erhebliche Bedeutung von Störungszonen für die Grundwasserdynamik unstrittig. Detaillierte Studien belegen an zahlreichen Lokalitäten die besondere Bedeutung vertikalen Grundwasserflusses entlang tektonischer Strukturen. Störungen und begleitende Kluftzonen stellen häufig, genauso wie Diskontinuitäten in der Sedimentation, hydraulische Fenster dar, durch die sich generierte Überdrücke ausbreiten und über Fluidabewegungen abbauen können (z.B. in der Ungarischen Senke, vgl. TOTH 2003 oder im Bohaiwan Basin, vgl. XIE et al. 2006). Im Santa Barbara Basin wurden entlang von Störungen Überdrücke in Kompressionsphasen in Teufen von weniger als 200m aufgebaut und stufenweise über Zeiträume von Hunderten bis Tausenden von Jahren durch Grundwasser- und Wärmetransport abgebaut (APPOLD et al. 2005).

Für den horizontalen Grundwasserfluss quer zur Streichrichtung stellen Störungen dagegen häufig hemmende Strukturen dar. Zur Quantifizierung von Grundwasserströmen entlang von Störungen sind in den letzten Jahren verschiedene Ansätze unterbreitet worden, deren ergebnisgerechte Umsetzung jedoch schwierig bleibt. DÖBBER et al. (2002) korreliert die Wahrscheinlichkeit der Zusetzung von Störungen durch Lettenbildung mit den Versetzungsbeträgen entlang einer Störung. Auf Grundlage von lokalen und regionalen Felduntersuchungen in den Niederlanden und Deutschland (BENSE et al. 2003 und 2005), Großbritannien (HOUGH et al. 2006) und Frankreich (CONSTANTIN et al. 2004 und dort zitierte Schriften) zum hydraulischen Verhalten von Störungen und Klüften wurden Algorithmen zur Abschätzung von Störungsweite, lithologischer Heterogenität und hydraulischer Anisotropie auf Grundlage des Verschiebungsbetrages, des Tongehaltes der umgebenden Gesteine und der Art und Beschaffenheit von Kluftfüllungen u.a. entwickelt. Dennoch bleibt die Anwendung solcher Konzepte schwierig. Ursachen hierfür liegen in der ortsabhängigen und im allgemeinen starken hydraulischen Heterogenität solcher Strukturen, die durch die meist begrenzten Untersuchungsumfänge nicht abgebildet werden kann.

In der **Vorerzgebirgssenke** konnten bisher keine tiefreichenden und hydraulisch durchgehend wirksamen vertikal ausgerichteten Grundwasserwegsamkeiten nachgewiesen werden. Allerdings ist die verfügbare Datenbasis zur Ableitung diesbezüglicher Aussagen äußerst begrenzt. Indizien, wie die häufig nachgewiesene Verlehmung/ Zusetzung von Abschnitten von Störungs- und Kluftzonen (Abschnitte 4.2, 4.3 und 4.6) sowie unterschiedliche Grundwasserspiegel in vertikalen Abfolgen hydrogeologischer Einheiten oder entlang ein und derselben Störung lassen die Annahme zu, dass eine weitreichende vertikale Vermischung von Grundwässern unterschiedlicher Teufenniveaus nur ein lokales Phänomen darstellt. Allerdings repräsentieren die meisten bisherigen Feldversuche nur „punktueller“ hydraulische Szenarien und berücksichtigen kaum Störungszonen in ihrer gesamtheitlichen hydraulischen Wirkung.

Grundwasserfluss entlang von Störungen als Vergleichsmöglichkeit für die Situation in der Vorerzgebirgssenke wurde u.a. auch für folgende Senkestrukturen beschrieben: Känozoische

Senken in den Apenninen (DUCHI et al. 2005), Steamboat Hills (basin) Nevada (Skalbeck et al. 2005). Geeignete Interpretationsansätze und Schlussfolgerungen für die Verhältnisse in der Vorerzgebirgssenke werden in Abschnitt 4.3.1 diskutiert.

Einfluss der Teufe auf Grundwasser-/ Fluidbewegungen

Die Teufenerstreckung der permokarbonen Einheiten der Vorerzgebirgssenke ist in Abbildung 8 in orange gestrichelter Linie angedeutet. Das Schema zeigt, dass der Hauptumsatz, im Sinne von Neubildung und Entlastung von Grundwasser, relativ oberflächennah und fast ausschließlich im Einflussbereich Topographie- induzierten Grundwasserflusses erfolgt (große Pfeile). Dies wird durch die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung bestätigt (Abschnitt 4.9.7). Phänomene wie das Absinken von Grundwasser in Bereiche Dichte- und Druck- induzierten Grundwasserflusses bzw. ein „Aufsteigen“ aus tiefen Senkenbereichen nach oben ist danach mit sehr geringen Fließgeschwindigkeiten verbunden (kleine Pfeile) und vorzugsweise an tektonische Strukturen gebunden. Voraussetzung für eine solche vertikale Strömung ist die Kombination von Potentialunterschied und Existenz entsprechend kontinuierlicher präferenzieller Fließwege. Dabei behindern die nach der Teufe abnehmenden Durchlässigkeiten sowie der durch Überdruck induzierte tendenzielle Aufwärtsfluss in tieferen Senkenbereichen (Abschnitt 4.1.3.2) eine Infiltration meteorischer Wässer in tiefere Schichten.

Während Absenkungsphasen in bereichen sedimentärer Senken konnte sogar ein Umschwenken gravitativ bedingter Abwärtsströmung in eine druckgetriebene Aufwärtsströmung durch hohe Absenkungsbeträge/Auflast beobachtet werden (BASSET et al. 1982, FISHER et al. 1987, Palo-Duro Basin, vgl. Anlage 1).

Mit steigender Teufe ist eine, zumeist exponentiell, steigende Verdichtung des Gesteinsverbandes bei meist abnehmender Porosität zu beobachten. Nach BRADLEY (1986) kann dieser Verdichtungsprozess in 3 Phasen unterteilt werden. (1) Bei Absenkung bis ca. 3000m Teufe sinkt die Porosität in einem Beispielsediment von 58% auf 28% durch maximale mechanische Umordnung und Konsolidierung der Körner bis unmittelbar vor Zementation („Atterberg-Limit“). (2) Bei weiterer Versenkung nimmt die Porosität auf ca. 10% vom Ausgangswert ab. Dabei spielen weniger mechanische Kompaktion als Lithifizierungsprozesse (Rekristallisierung, Zementation, (Druck-) Lösung und Fällung) eine Rolle. Dies ist auch der Teufenbereich mit dominierender Druck-induzierter Fluidabewegung. (3) Setzt sich die Absenkung weiter fort, erfolgt häufig ein leichter Wiederanstieg der Porosität durch temperaturbedingte Ausdehnung des Gesteins. Lukin (2005) nennt für sehr tiefe sedimentäre Folgen die Möglichkeit einer „hydrogeologischen Inversion“ hervorgerufen durch tektonische und geodynamische Prozesse.

Für die Verhältnisse im Permokarbon der **Vorerzgebirgssenke** ist aufgrund der geringen Teufenlage (<2000m) im wesentlichen Prozess (1) von Bedeutung. Auf Grundlage von Tests mit typischen pelitischen Sedimenten (KYSER et al., 2003) kann für die tiefsten Bereiche der Vorerzgebirgssenke (um 1300m unter GOK) mit einer Verringerung der Porosität auf 15-30% der Ausgangsporosität ausgegangen werden, wobei ein höherer Kompaktionsgrad durch eine in der Vergangenheit evtl. höhere Absenkung unberücksichtigt bleibt.

Die zunehmende Verfestigung des Gesteins und Abnahme der Porosität mit der Teufe geht

mit einer deutlichen Verminderung der hydraulischen Durchlässigkeiten einher. Dies reduziert sowohl den Grundwasserfluss in tiefen Grundwasserleitern selbst, als auch den Austausch zwischen tiefen und flacheren Grundwasserstockwerken (in Abbildung 8 angedeutet durch die vertikalen und horizontalen Stop-Pfeilsymbole). WILSON et al. (1999) hat für das San Joaquin Becken Abnahmen der Durchlässigkeit bis 1 Größenordnung pro 1km (0,057 bis 0,1 Größenordnungen pro 100m) Teufe modelliert. Nach Untersuchungen von DOWNING et al. (1987) in Großbritannien weisen oberflächennah hoch durchlässige Aquifere ($k_f \geq 10^{-3} \text{ m/s}$) in 1-2km Teufe nur noch Durchlässigkeiten $\leq 10^{-6} \text{ m/s}$ auf.

Für die **Vorerrzgebirgssenne**, mit einem vergleichsweise hohen Verfestigungsgrad der Gesteine kann von einer durchschnittlichen Abnahme der Durchlässigkeit von mindestens 1 Größenordnung pro 1km, vermutlich aber mehr, ausgegangen werden. Trotzdem ist eine völlige vertikale Abgrenzung/ Isolierung höherer und tieferer Grundwässer bzw. Fluida in der Vorerrzgebirgssenne unwahrscheinlich. Die von einigen Autoren (BJORLYKKE 1993, BJORLYKKE et al. 1989, SURDAM et al. 1989) für bestimmte sedimentäre Senken beschriebenen weitgehend geschlossenen (diagenetischen) Systeme stellen sicher Ausnahmen bzw. lokale Phänomene dar. So können lokale Salinitäts- oder Temperaturanomalien in größeren Teufen zu Grundwasserzirkulationen führen, die aufgrund der begrenzenden hydraulischen Faktoren kleinräumigen Charakters sein können (Zirkulationssymbol in Abbildung 8).

Im allgemeinen sorgt jedoch das Zusammenwirken advektiver und dispersiver Mischungsvorgänge für mehr oder minder intensive Austauschprozesse, die durch genetisch analysierte Mischwasseraufschlüsse, für die meisten sedimentären Senken der Welt belegt sind, z.B. South-Louisiana Gulf Coast, (MORSE et al. 1997), Songliao Basin (XIE et al. 2003), weitere vgl. Anlage 1). Solche Mischwässer sind in geringer Anzahl auch in der **Vorerrzgebirgssenne** beschrieben (Raum Zwickau und Oelsnitz, Abschnitte 4.2.4 und 4.5, Anlage 3).

Grund- und Porenwasserbewegung während der Beckenentwicklung

Das Verhalten von Grund- und Porenwasser während der Beckenentwicklung ist einerseits eine entscheidende Randbedingung für verschiedene diagenetische Prozesse. Es kann andererseits auch für die Salinität und Dynamik rezenter Grundwasserbewegungen von Bedeutung sein.

Im allgemeinen sind die Absenkungsgeschwindigkeiten bei der Senkenbildung deutlich höher als die syngenetischen Aufstiegsbeträge mobilen Porenwassers. So ermittelte BRADLEY (1986) in Massenbilanzrechnungen für ein marines permeables Becken aus porösen Schiefertonen und ohne tektonischen Stress bei einer Versenkung des Sediments von 310m in 4 Mio. Jahren Aufstiegsbeträge der Porenfluida/Grundwässer von lediglich 0,09m. Daraus leitete er ab, dass solche aufsteigenden Porenfluida zumeist nicht geeignet sind um Diageneseprozesse wie Zementations- oder Lösungsvorgänge (sekundäre Porositäten) für große Beckenräume zu erklären. Allerdings gibt es in Bezug auf die Aufstiegsraten in Abhängigkeit von den verschiedenen wirkenden Randbedingungen (z.B. Tektonik/Stressregime, Sedimentbeschaffenheit, Fluidazusammensetzung, Porendruck) zeitlich und lokal große Unterschiede. So können Wässer in gut durchlässigen Bereichen wie z.B. entlang tektonischer Strukturen, diagenetisch von Bedeutung sein.

Für die hydrogeologischen Verhältnisse in der **Vorerrzgebirgssenne** können solche Formati-

onswässer in größeren Tiefen, außerhalb des Dominanzbereiches topographisch-induzierten Grundwasserflusses für diverse diagenetische Prozesse bis heute relevant sein. Darüber hinaus kann für die Vorerzgebirgssenke aufgrund fortwährenden tektonischen Aktivität, insbesondere zur Zeit der Senkenbildung, von deutlich erhöhten Aufstiegsraten von Formationswässern auch entlang von Störungen ausgegangen werden. Ihre Bedeutung im Zusammenhang mit der Bildung höher mineralisierter Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke ist zu diskutieren (Abschnitt 4.6).

4.1.3.2 Antriebskräfte von Grundwasser-/ Fluidabewegungen und ihre Wechselwirkungen

Die drei Zonen des Grundwasserflusses in sedimentären Senken (Abschnitt 4.1.3.1) sind Wirkungsfeld verschiedener Kräfte die Einfluss auf die Grundwasserbewegung ausüben. Dabei können sie einander bedingen und verstärken oder entgegengesetzt wirken und einander aufheben. Im folgenden werden neben den drei Grundkonzepten, wichtige Triebkräfte des Grundwasserflusses in gut untersuchten Senkenstrukturen diskutiert und ihre Relevanz für die hydrogeologischen Verhältnisse in der Vorerzgebirgssenke abgeschätzt.

Topographie-induzierter Grundwasserfluss und seine Wirkung auf andere Triebkräfte

Topographisch-induzierter oder gravitativer Grundwasserfluss versteht sich als schwerkraft- bzw. höhenbedingte Grundwasserbewegung. Es ist die klassische Modellvorstellung des oberflächennahen Grundwasserflusses (GARVEN et al. 1984, TOTH 1962, 1963, FREEZE et al. 1966, 1967, 1968) in seinem Streben nach einem Systemgleichgewicht unter sich ändernden geologischen und hydrogeologisch-hydrologischen Randbedingungen (u.a. TOTH 1978). Es werden dabei verschiedene Größenordnungen topographisch induzierter Grundwasserfließsysteme unterschieden (lokal, intermediär und regional) (HANOR et al. 1988, TOTH 1962, 1963, FREEZE et al. 1966, 1967, 1968), eine Systematik die auch auf die Vorerzgebirgssenke angewendet werden kann (Abschnitt 4.2.2).

Topographie-induzierter Grundwasserfluss ist häufig mit einer advektiven Verdrängung von Porenlösungen durch meteorische Wässer verbunden. Er wird im wesentlichen vom Gradienten zwischen der Topographie und der Lage der Vorfluter bestimmt. Dementsprechend haben Hebungen/ Senkungen, z.B. aufgrund von gebirgsbildenden Prozessen bzw. Regressionen/ Transgressionen des Meeres entscheidenden Einfluss auf den topographisch-induzierte Grundwasserfluss. Änderungen dieser Randbedingungen können in Abhängigkeit von der Höhe und Wirkungsdauer des Gradienten Jahrtausende bis Jahrmillionen nachwirken.

Die Höhe des topographischen Gradienten bestimmt auch den Einfluss anderer Wirkungskräfte. Je geringer das topographische Potential desto stärker können z.B. Dichte- oder Konzentrations-induzierte Antriebsmechanismen wirken. Allerdings geht GARVEN (1995) davon aus, dass die nicht-topographisch induzierten Grundwasserbewegungen in ihrer Intensität i.d.R. um mindestens 2 Größenordnungen unter den topographisch-induzierten liegen. Dies belegt die deutliche Dominanz dieser Triebkraft gegenüber allen übrigen. Dichte-, Konzentrations- oder Druck-induzierter Grundwasserfluss spielen deshalb nur dann eine wesentliche Rolle wenn:

- die Wirkung des topographischen Gradienten sehr gering ist (flaches Relief, große Teufen) und/ oder
- andere Wirkungskräfte starke Gradienten aufweisen (starke Kompaktion, große Fluid-Volumenänderungen, deutliche Dichte und Konzentrationsunterschiede)
- geeigneten geologischen Bedingungen vorliegen (z.B. pelitische Gesteine bei Konzentrations-induziertem Grundwasserfluss, siehe unten)

Topographie-induzierter Grundwasserflusses ist deshalb auch in den permokarbonen Folgen der **Vor erzgebirgssenke** die dominierende, in den hangenden Lagen meist auch die einzige relevante, Triebkraft großräumiger Grundwasserbewegung. Dies wird durch relativ hohen topographischen Gradienten unterstützt. Die Wirkung nicht-topographisch induzierten Grundwasserflusses (z.B. Dichte-induzierter GW-Fluss) wird sich deshalb, wenn überhaupt, auf tiefere Bereiche deutlich unter 500m beschränken und/oder sich auf kleinräumige Bereiche mit höher mineralisierten Grundwässern beschränken. Zonen der Überlagerung beider Triebkräfte sind, wie auch für die Nordostdeutschen Senke postuliert (MAGRI et al. 2004), wahrscheinlich. Topographisch induzierter Grundwasserflusses kann in den reliefärmeren nordwestlichen Teilen der Vor erzgebirgssenke und insbesondere ihres Abstrombereiches an Einfluss verlieren, wird aber auch hier dominante Triebkraft bleiben. Die in Abschnitt 4.9 dargestellte Modellierung des weiteren Vor erzgebirgsraums im Senkenmaßstab setzt das Konzept des Topographie-induzierten Grundwasserflusses um. Eine Berücksichtigung von Dichteanomalien (z.B. aufgrund höher mineralisierter Grundwässer) findet bei geeigneten Randbedingungen als Modellansatz für sehr flache Senken mit flacher Morphologie bzw. für hangende Bereiche tieferer Senkenstrukturen Anwendung (z.B. BOUW et al. 2003).

Dichte-induzierter Grundwasserfluss/ Freie Konvektion

Änderungen in den Lösungsinhalte von Grund- und Porenwässern hervorgerufen durch Prozesse wie Minerallösung, Ausfällung und Mischungs-/ Reaktionsprozesse resultieren in Dichteänderungen, die bei entsprechendem Gradienten den Grundwasserfluss maßgeblich beeinflussen können.

Solcher Dichte- induzierter Grundwasserfluss angetrieben durch das Wirken von Auftriebskräften (buoyancy) kann als freie Konvektion aufgrund von Temperatur- und Dichte/Salinitätsgradienten bei (relativ) hohen Durchlässigkeiten beschrieben werden (BACHU 1995, BJORLYKKE et al. 1988, CATHLES 1981 u.a.). Obwohl theoretisch wohlbegründet, ist er in sedimentären Senken eher selten direkt nachgewiesen (HANOR 1987, BLANCHARD et al. 1985). RAFFENSPERGER (1997) führt einen solchen Nachweis indirekt an einem Beispielmmodell zur Uranerzgeneration im kanadischen Athabasca Basin und dem australischen McArthur Basin durch entlang von Störungen aufsteigende uranhaltige Chloridlösungen. Die Geschwindigkeiten dieses „buoyancy driven flow“ liegen bei rund 1m/Jahr.

Dichte-induzierter Grundwasserfluss oder freie Konvektion kann durch zunehmende topographische Gradienten überlagert und zerstört werden. Untersuchungen von BJORLYKKE (1988) zeigen, dass bei geringen Durchlässigkeiten topographisch-induzierte Triebkräfte, jene aus freier Konvektion meist überlagern/ dominieren. Aus diesem Zusammenhang leitet sich auch seine Teufenabhängigkeit ab. Mit zunehmender Teufe nimmt der die freie Konvektion störende Einfluss des topographischen Gradienten ab. Topographie-induzierter

Grundwasserfluss geht in Grundwasserfluss durch freie Konvektion über. Gleichzeitig verringert sich im allgemeinen jedoch auch die Durchlässigkeit, was freier Konvektion entgegenwirkt. So gewinnt mit weiter zunehmender Teufe eher Druck-induzierter Grundwasserfluss an Bedeutung (vgl. Abbildung 8). Aufgrund der für freie Konvektion erforderlichen sehr spezifischen Randbedingungskombinationen sind in sedimentären Senken oft keine durchgängigen Zonen freier Konvektion ausgebildet. Diese Annahme gilt z.B. für die Ungarische Senke (ALMASI 2003, 2001, TOTH 2003, TOTH et al. 2001) oder das Songliao Basin (XIE et al. 2003).

BRADLEY (1986) geht für die meisten tiefen Senkenstrukturen von einem Dichtegleichgewicht im Senkenmaßstab aus. Lediglich lokal führen danach Dichte-Inversionen zu Dichte-induziertem Grundwasserfluss, z.B. entlang von Störungen, und zur Ausbildung mehr oder minder stabiler Konvektionszellen.

Treten sehr unterschiedlich salinare und/ oder temperierte Wässer auf, kann Dichte-induzierte Grundwasserkonvektion den topographisch induzierten Grundwasserfluss jedoch auch oberflächennah überlagern (Abbildung 8). HANOR (2003, 1988, 1987) beschreibt eine solche bis mehrere Kilometer tiefreichende Konvektion im Untergrund der amerikanischen Golfküste, hervorgerufen durch Salzlösung, Dichtezunahme und Absinken meteorischer Wässer. Diese überlagert und entkoppelt sowohl den topographisch- als auch Druck-induzierten Grundwasserfluss (HANOR et al. 2003). WOOD et al. (1984) und BORIES et al. (1973) beschreiben die Ausbildung schichtgebundener Konvektionszellen variierender Geometrie (COMBARNOUS et al. 1975). BRADLEY (1986) hält dies jedoch für ein eher lokales Phänomen, da verschiedene Anforderungen erfüllt sein müssen. So tritt schichtgebundene Konvektion i.d.R. erst ab einem Schichteinfallen von mehr als 45° auf und setzt das Vorhandensein eines „hoch-konduktiven thermischen Stratums“ (BRADLEY 1986) zwischen gering durchlässigen Grenzschichten voraus. Thermisch induzierte Konvektion setzt weiterhin entsprechend hohe thermische Gradienten an den Grenzschichten voraus.

Die Relevanz freier Konvektion für die **Vorerrzgebirgssenke** wird kontrovers diskutiert. Allerdings wirken eine Vielzahl von Randbedingungen freier Konvektion entgegen. Dazu gehören ein starker topographischer Gradient, fehlende konzentrierte Quellen löslicher Salze und die begrenzte Verbreitung höher mineralisierter Grundwässer. Allerdings ist eine lokale Dominanz freier Konvektion für den Grundwasserfluss theoretisch möglich, z.B. bei Auftreten hoch mineralisierter Wässer auf gut durchlässigen Störungszonen (vgl. Abschnitt 4.6.3).

Dichte- und Topographie-induzierter Grundwasserfluss: Wechselwirkungen und Ansätze zur Berücksichtigung beider Phänomene

Grundwasserfluss wird in der Regel im Sinne des **Potential-Konzepts**, auf Grundlage eines Potentialfeldes, d.h. eines Grundwasserspiegels beschrieben. Im englischen/ amerikanischen Sprachgebrauch entspricht dies den „freshwater hydraulic heads“ oder „freshwater potentiometric surfaces“ (z.B. BACHU 1995). Streng genommen ist dieser Ansatz den Grundwasserfluss, insbesondere in komplexen Systemen, allein über den gemessenen Grundwasserspiegel zu definieren, jedoch inkorrekt. Viele Parameter der Grundwasserleiter, wie seine Permeabilität oder die Eigenschaften des Grundwassers bzw. Fluids, ändern sich häufig nicht nur regelmäßig und schichtbezogen sondern vielmehr nicht-kontinuierlich in alle Richtungen. Dieses wird bei der Projektion der Potentiale auf die Horizontale nicht exakt berück-

sichtigt. Allerdings sind die Abweichungen bei horizontalen Grundwasserleitern so gering, dass der Grundwasserfluss hier im allgemeinen über Grundwasserspiegel ausreichend genau beschrieben werden kann.

Größere Fehler bei der Ableitung von Fließrichtung und -stärke (ALKALALI et al. 2003, BACHU 1995) können bei Verwendung des Potential-Konzeptes für stärker einfallende inhomogene Grundwasserleitern bzw. bei der Beschreibung vertikalen Grundwasserstromes (BACHU et al. 2002) auftreten, Randbedingungen die in sedimentären Senken – so auch in der **Vor erzgebirgssenke** – zumindest lokal verbreitet sind. Neben dem Grundwasserspiegel spielt dabei auch die Salinität des Grundwassers, d.h. die Wirkung der räumlich oft stark variierenden Auftriebskraft (buoyancy), eine wichtige Rolle. Die Relevanz der Auftriebswirkung (dem Bestreben nach freier Konvektion) wird bestimmt von den Temperatur-/Konzentrations-/ Dichte- und Viskositätsgradienten, dem Einfallen des Grundwasserleiters (positive Korrelation) sowie der Stärke des wirkenden topographischen Gradienten (negative Korrelation). Die Auftriebskraft kann dem topographischen Gradienten entgegenwirken, diesen ablenken oder auch verstärken. LUSCZYNSKI (1961) fasste diesen Ansatz im „Environmental hydraulic head-Konzept“ zusammen. Allerdings führt in vielen Fallstudien der Mangel an geeigneten Daten zwangsläufig zur Auftriebswirkung häufig zur generellen Verwendung des Potential-Konzeptes, so auch im hier vorgelegten hydraulischen Modell (Abschnitt 4.9).

Der „driving force ratio“ (DFR) (DAVIES 1987, DORGARTEN et al. 1991, BACHU 1995, Definition siehe dort) kann als Maß der Relevanz der Trägheitskraft dienen (vgl. Anwendung im Alberta Basin, Anlage 1). DAVIES (1987) nennt relevante $DFR \ll 1$ bei vertikalem Grundwasserfluss und dominierender forcierter Konvektion, und $DFR \ll 0,5$ bei schräg einfallenden Grundwasserleitern. BACHU et al. (2002) halten dagegen einen allgemeinen Grenzwert des DFR zur Einschätzung der Relevanz der Auftriebskraft für ungenau und schlagen die Ermittlung einer „optimum reference density“ vor. Dabei handelt es sich um eine flächengewichtete durchschnittliche Dichte zur Ermittlung eines dichteabhängigen Grundwasserspiegels. Für die Umsetzung in numerischen Modellen können zunächst Permeabilitäten zugewiesen und dann Fluid-Eigenschaften und resultierende Geschwindigkeitsvektoren berechnet werden (BACHU 1995). Alternativ können anstatt von Grundwasserspiegel und relativer Dichte auch die Strömungsfunktionen ermittelt werden (FRIND et al. 1985 u.a.). Felddatenbasierte Studien stützen sich jedoch nach BACHU (1995) in der Regel auf Messgrößen wie Druck, Salinität, Temperatur und chemische Analysen und analysieren den Grundwasserfluss so letztlich meistens über Druckspiegelverteilungen. ALKALALI et al. (2003) setzte dieses Konzept an einem Aquifer im Western Canadian Sedimentary Basin um.

GARVEN et al. (1984) betont im Kontext lagerstättenbildender regionaler Grundwasserfließsysteme, die Bedeutung des Zusammenwirkens von tiefem gravitativen Grundwasserfluss (regionale Grundwasserfließsysteme), freier Konvektion (GARVEN et al. 2004) und Druck-induziertem Grundwasserfluss (SHARP 1978), ein Konzept das auch für den Vor erzgebirgssenkenraum geeignet ist.

Druck-induzierter Grundwasser- bzw. Fluidafluss

Ursachen Druck-induzierten Grundwasserflusses durch Ausgleichsbewegungen sogenannter „Overpressures“ (bzw. „Underpressures“) sind vielfältig (OSBORNE et al. 1997, PERSON

et al. 1996, NEUZIEL 1995, BETHKE 1989).

Der wichtigste Vorgang zur Erzeugung von „Overpressures“, zumindest während der Beckenabsenkung, stellt die allmähliche Kompaktion und Verfestigung der Sedimente bis hin zur Lithifizierung durch zunehmende Auflast dar (GARVEN et al. 2003, HARRISON et al. 1991) - Porenräume verringern sich, Fluida werden ausgetrieben (vgl. unten, 'Volumenänderungen und Overpressures'). Diese Prozesse werden von zahlreichen Quellen beschrieben (z.B. GARVEN et al. 2003, BETHKE 1985, CATHLES et al. 1983, JONES 1980, HOBSON 1961, PARKS 1924). BJORLYKKE (1983) nennt für den Bereich Druck-induzierter Fluidbewegung in Teufen zwischen 4000 und 9000m relative Aufstiegsraten der ausgetriebenen Fluida von 1 bis 6cm pro 100cm Versenkung. Sie erreichen also zunächst nicht die Oberfläche (BONHAM 1980).

Aber auch in späteren Stadien der Beckenentwicklung ist die Entstehung von „Overpressures“ nachgewiesen, die maßgeblichen Einfluss auf die Grundwasserdynamik der tieferen Grund- und Porenwässer bis in rezente Zeiträume haben. So postuliert TURNER et al. (2004) maximalen Aufbau von Fluida-Drücken durch tektonischen Stress während der Eingengung vorher extensiver Senkenstrukturen. ALMASI (2003) erklärt rezente Überdrücke in der Ungarischen Senke in Teufen bis maximal 3600m durch eine Intensivierung tektonischer intrakratonaler Kompression im regionalen Maßstab. Er schließt dagegen einen signifikanten Anteil thermischer, osmotischer, diagenetischer und gravitativer Ursachen, sowie freie Konvektion an der Überdruckbildung aus, wenngleich diese lokal bedeutend sein können.

Ein weiteres Szenario zur Entstehung von Druck-induziertem Grundwasserfluss stellen diagenetische Prozesse, z.B. im Zusammenhang mit Kohlenwasserstoff-Bildungen dar. TOTH (2003) beschreibt die Generation lokaler Überdruckregimes durch solche Prozesse in der Ungarischen Senke. Möglicherweise können so auch relativ flache Druckregimes erklärt werden, wie das von Xie et al. (2003) für das Songliao Basin in China beschriebene Unterdruckregime ab rund 1500m Teufe. HANSOM et al. (2005) weisen nach, dass Diagenese-prozesse in Verbindung mit Kohlenwasserstoffbildungen (hier Gas und Öl) ein höheres Druckpotential erzeugen können als Kompaktionsprozesse während der Absenkung die häufig lange bestehen bleiben. So konnten für das Delaware Basin Überdrücke aus dem Perm nachgewiesen werden.

Modellvorstellungen zu den dominierenden Triebkräften des Grundwasserflusses (z.B. MORSE et al. 1997, HANOR et al. 1990) gehen allgemein von einem druckdominierten Grundwasserfluss in Senken in Teufen ab 3-4 km aus (siehe oben/ Abbildung 8). Grundwasser- oder besser Fluidbewegungen in so großen Teufen haben entscheidenden Einfluss auf eine Reihe von Diagenese-prozesse im Gestein, die auf die Beschaffenheit der Fluida rückwirken (SCHOLLE et al. 1979, DOMENICO 1977, PETTIJOHN et al. 1972) und im Zusammenwirken mit anderen Triebkräften regionaler Grundwasserströme Grundlage von Mineralerzlagerstättenbildungen sein können (siehe oben und Abschnitt 4.1.4.2).

Für die Ausbildung und die Stabilität von Über- (bzw. Unter-)Drucksystemen ist jedoch die entsprechende Trennung dieser Sphären von den Einflussbereichen besser durchlässiger Topographie- oder Dichte-induzierter Grundwasserfließbereiche erforderlich. Hydraulische Fenster, z.B. aufgrund von Lithologiewechsel oder durch höher durchlässige Störungs- und Kluftzonen können durch den geschaffenen Kontakt zu lokalen Druck- und Salinitäts- oder thermischen Anomalien führen, wie im Bohaiwan Basin (China) durch XIE et al. (2006)

nachgewiesen.

Druck-induzierter Grundwasserfluss ist aufgrund der relativ geringen Teufenlage der permokarbonen Folgen der **Vorerzgebirgssenke** und des unmittelbar unterlagernden Grundgebirges als dominierende Triebkraft des Grundwasserflusses rezent sicherlich nur von untergeordneter Bedeutung. Die Untersuchungen in anderen, in Aspekten vergleichbaren Senken (z.B. Ungarische Senke, Songliao Basin, Delaware Basin; vgl. oben) zeigen aber, dass die Bildung und der Erhalt von Überdrücken in den tiefen geringdurchlässigen Bereichen der Vorerzgebirgssenke prinzipiell möglich ist. Zudem war die Vorerzgebirgssenke nach Abschluss der Senkenbildung im Verlaufe ihrer sehr differenzierten tektonischen Entwicklung mehrfach druckgenerierenden Prozessen wie tektonischen Impulsen ausgesetzt (Abschnitte 3 und 4.3.1), die maßgeblichen Einfluss auf die Druckverteilung und Grundwasserdynamik ausgeübt haben werden und lange nachwirkten. Darüber hinaus sind auch rezent geringfügige Stressregimes nachgewiesen (vgl. Abschnitt 4.3.1). Entlastung von Überdruckregimes, z.B. tektonisch induziert, können dabei zum Aufstieg/ zur oberflächennahen Positionierung höher mineralisierter Wässer in der Vorerzgebirgssenke geführt haben.

Tektonisch induzierter Grundwasserfluss

Postgenetische tektonische Impulse (in Bezug auf die Senkenbildung) können zu tektonisch induziertem Grundwasserfluss, sogenanntem „seismic pumping“ (OLIVER 1986, SIBSON et al. 1975), „squeegee-type-flow“ oder „tectonically induced flow“ (MACHEL 2000, OLIVER 1986, RICHARD et al. 1979) führen. Untersuchungen in der Ungarischen Senke (APPOLD et al. 2005, ALMASI 2001, 2003 und darin zitierte Quellen) belegen die Bedeutung regionaler gering intensiver tektonischer Aktivität für den Aufbau von Überdrücken in relativ geringen Teufen sedimentärer Senken, die dann u.a. Grundwasserbewegungen induzieren. Hier können Schlussfolgerungen für die VORERZGEBIRGSSENKE abgeleitet werden (vgl. oben).

Auch während der Senkenbildung kann tektonische Aktivität (syngenetisch) wesentlich zur Sedimentkompaktion beitragen, wobei die modellhafte Rekonstruktion solcher Prozesse äußerst schwierig ist (GE et al. 1994, 1992, MC PHERSON et al. 1996). KYSER et al. (2003) bezeichnet tektonisch induzierte hydraulische Gradienten als wichtigste Triebkraft von Fluidbewegungen in sedimentären Senken.

Wichtige Anhaltspunkte für den Nachweis tektonisch induzierten Grundwasserflusses bieten Untersuchungen zu Lagerstättenbildungsprozessen. So erklären GREGG et al. (1992) und FILIPEK (1992) die Entstehung von MTV-Lagerstätten durch regionale Grundwasserfließsysteme über Hunderte Kilometer aus dem Illinois- und Arkoma Basin, die durch tektonische Ereignisse im Karbon und Perm angeregt wurden.

In der Entwicklung der **Vorerzgebirgssenke** sind verschiedene Phasen tektonischer Aktivität mit in ihrer Ausrichtung und Intensität unterschiedlichen Stressregimes nachgewiesen (Abschnitte 3.3 und 4.3). Es ist wahrscheinlich dass diese, insbesondere in tieferen hydraulisch wenig leitenden Schichtenfolgen in denen ein Druckabbau nur sehr langsam möglich, Grundwasserbewegungen induziert haben (vgl. oben). Auch rezente tektonische Aktivität

(Abschnitt 4.3.1) könnte dort zu einem weiteren bzw. erneuten Druckaufbau beitragen.

Hydrodynamische Dispersion

Neben den rein advektiven Grundwasser- und Fluidabewegungen ist die hydrodynamische Dispersion von entscheidender Bedeutung für den Transport, die Streuung und damit letztlich für die Mischung von Grundwässern/ Fluida. Zur hydrodynamischen Dispersion gehört einerseits die durch Gradienten im chemischen Potential verursachte molekulare Diffusion, die mit abnehmender Durchlässigkeit des Gesteins an Bedeutung gewinnt.

Andererseits umfasst sie die Wirkung der mechanischen (kinetischen) Dispersion. Diese schwankt kleinräumig oft beträchtlich und ist in der Praxis nur sehr schwer bestimmbar. Für DOMENICO et al. (1990) ist die Abschätzung der Sedimentdispersivität deshalb eine entscheidende Schwachstelle bei der Ermittlung von Richtung und insbesondere der Geschwindigkeit von Mischungsprozessen.

HANOR (1994) geht bei entsprechenden Randbedingungen für gering durchlässige Gesteine (z.B. Dispersivität um 1, k_f um wenige mm/Jahr) von der Dispersion als dominantem Mischungsprozess aus. LAVASTRE et al. (2005) wiesen im Bereich toniger Gesteine des Pariser Beckens nach, dass hydrodynamische Dispersion an der vertikalen Verteilung chloridischer Grundwässer in den oberen 500m wesentlichen Anteil hat.

In der **Vorerzgebirgssenke** sind sowohl advektive als auch dispersive Grundwasserbewegungen bedeutsam. Herrschen in den känozoischen und psammitisch bis psephisch ausgebildeten permokarbonen Sedimenten advektive Fließprozesse vor, muss in den gering durchlässigen feinklastischen Gesteinen (Ton- und Schluffsteine, z.B. in Teilen der Leukersdorf-Folge) von einem wesentlichen Anteil dispersiver Grundwasserbewegung ausgegangen werden. Hydrodynamische Dispersion könnte wie anhand des Pariser Beckens diskutiert so auch für die Verteilung der höher mineralisierten Wässer in der Vorerzgebirgssenke von Bedeutung sein. Dies gilt insbesondere für die tiefen Senkenbereiche und Schichten mit geringer bzw. zugesetzter Klüftung.

Konzentrations- induzierter Grundwasserfluss

Hohe Lösungsgehalte in Grundwässern können einerseits aufgrund des Dichtekontrastes zu gering mineralisierten Wässern Grundwasserfluss hervorrufen (siehe oben). Konzentrationsgradienten lösen darüber hinaus Diffusionsprozesse aus. Dazu gehören einerseits Vorgänge molekularer Diffusion durch selektiv permeable Medien im Sinne einer Osmose mit resultierenden Änderungen u.a. der Konzentration der beteiligten Lösungen (siehe unten). Andererseits erfolgen bei Kontakt zweier unterschiedlich konzentrierter Lösungen (Grundwasser/Grundwasser, Grundwasser/Porenwasser oder Porenwasser/Porenwasser) ein direkter diffusiver Transport gelöster Stoffe in Richtung niedrigerer Konzentrationen. Es wird dabei generell von sehr niedrigen molekularen (und thermischen, vgl. unten) Diffusionsraten im Vergleich zur Absenkungsrate, entgegen der Versenkungsrichtung der Sedimente, ausgegangen. HANOR (1984) geht in Beispielrechnungen bei NaCl von einer diffusiv verursachten Aufstiegsgeschwindigkeit von $3,22 \cdot 10^{-5}$ cm/Jahr bei Versenkungsraten von $1,18 \cdot 10^{-2}$ cm/Jahr (Faktor 366) aus, wobei zeitlich und lokal deutliche Unterschiede auftreten können.

Dies legt nahe, dass Diffusionsprozesse vor allem in gering dynamischen Systemen mit sehr

geringen Durchlässigkeiten (und damit geringem advektiven Stofftransport) von Bedeutung sind (u.a. RANGANATHAN 1988).

Die Auswertung von Forschungsarbeiten in zahlreichen Senkenstrukturen zeigte, dass die Salinität von Grundwässern bei Abwesenheit von größeren Salzablagerungen oft, jedoch nicht immer, mit der Teufe korreliert. In diesen Fällen ist also mit einem sehr geringen Diffusions-induziertem Aufstieg von Grundwässern auszugehen. Jedoch wird diese Tendenz außerhalb extrem gering durchlässiger Gesteine durch andere Triebkräfte (Topographie, Dichte, Temperatur) überlagert. Davon kann auch für den **Vorerzgebirgssenkensbereich** ausgegangen werden. Problematisch ist hier jedoch die geringe Kenntnis zur Verteilung der höher mineralisierten Grundwässer.

Osmotische Prozesse mit resultierenden Konzentrations- und Volumenänderungen

In Gesteinen sehr geringer Durchlässigkeit, z.B. in Schluff- und Tonsteinen finden bei hohen Gradienten der Konzentration der Lösungsinhalte des Grundwassers bzw. der Porenlösungen Osmoseprozesse statt. Die daraus resultierenden Volumen- und Dichteänderungen (Veränderung der Auftriebskraft) können zu Druckaufbau/abbau und resultierendem Grundwasserfluss führen. Aufgrund der erforderlichen Randbedingungen ist dieser Prozess oberflächennah eher selten und lokal, mit zunehmender Teufe häufiger zu erwarten, prinzipiell auch in der Vorerzgebirgssenke.

Volumenänderung und Druckgradienten

Volumenänderungen und damit verbundene Druckgradienten bzw. Überdrücke („Overpressures“) im Grund- bzw. Porenwasser, können durch vielfältige Prozesse hervorgerufen werden und Auswirkungen auf die Wasserchemie und Hydrodynamik haben. Neben der Gesteinsverdichtung (Volumenverringering) während des Absenkungsprozesses (vgl. oben, Druck-induzierter Grundwasserfluss) sind Lösungs-, Kristallisations- und Transformationsprozesse mit Volumenänderungen verbunden.

So kann Wasser durch Hydratation von Anhydrit zu Gips gebunden werden. Allerdings wird dieses Wasser im Verlaufe der Beckenabsenkung wieder freigesetzt, so durch Dehydrierung von Gips zu Anhydrit bei Temperaturen zwischen 40 und 60°C, also z.B. in rund 1000 bis 1700m Teufe. Ein weiterer Prozess der Wasserfreisetzung ist die Dehydrierung von Tonmineralen (z.B. Umbildung von Smectit zu Illit) (HUANG et al. 1993), ein Prozess den AUDET (1995) und BETHKE (1986) als vermutlich bedeutsam einschätzen und der zur Herausbildung relevanter „Overpressures“ führen kann.

Die thermische Kontraktion oder Ausdehnung von Wasser führt zu weiteren Volumen- bzw. Druckänderungen, deren Folgen für die Grundwasserdynamik jedoch als gering eingeschätzt werden (OSBORNE et al. 1997, PERSON et al. 1996, NEUZIEL 1995, BETHKE 1989).

Volumenänderungen bzw. Überdrücke in vorgenanntem Sinne können in der Vorerzgebirgssenke für die kleinräumige Grundwasserströmung in den tiefsten gering durchlässigen Bereichen der permokarbonen Einheiten von gewisser Bedeutung sein. In den oberen Bereichen der Senke wird topographisch-induzierter Grundwasserfluss mögliche Druckregimes durch Volumenänderungen jedoch in aller Regel deutlich dominieren.

In sehr tiefen sedimentären Senken führen die Kohlenwasserstoffbildung sowie Öl-Gas Ü-

bergänge vermutlich zu Druckaufbau und Volumenänderungen im Gestein (OSBORNE et al. 1997). Solche Prozesse sind aufgrund der relativ geringen Teufenlage karboner Kohlen in der Vorerzgebirgssenke und ihres anthropogenen Aufschlusses, wenn nur von untergeordneter Bedeutung (Berichte über Druckwässer im Bergbau).

Temperatur-induzierter Grundwasserfluss

Temperatur-induzierter Grundwasserfluss steht in engem physikalischem Zusammenhang mit Grundwasserfluss aufgrund von Volumen- oder Dichteänderungen (siehe oben). Ursachen temperaturbedingter Grundwasserbewegungen bis hin zur Herausbildung hydrothermaler Systeme (Abschnitt 4.1.2) können sein:

- Temperaturzunahme aufgrund des geothermischen Gradienten
- thermische Diffusion
- Reaktionswärme
- Temperaturanomalien, z.B. durch magmatische Schmelzen

Temperatur-induzierter Grundwasserfluss kann nach FILIPEK (1992) eine Ursache für lagerstättenbildende regionale Grundwasserfließsysteme sein kann (z.B. Mississippi-Valley-Type Lagerstätten in SE-Missouri).

MAGRI et al. (2004) geht von Temperatur-induzierter freier Konvektion in der nördlich der Vorerzgebirgssenke gelegenen Nordostdeutschen Senke aus (Abschnitt 4.6.3). In diesem Zusammenhang wird dieses Phänomen auch für die **Vorerzgebirgssenke** diskutiert. Danach scheint Temperatur-induzierter Grundwasserfluss in den tieferen Senkenbereichen, zumindest lokal, möglich.

Auswirkungen von Inlandsvereisungen und Permafrost

Die pleistozänen Kaltzeiten führten wiederholt zur Eisbedeckung bzw. zu periglazialen Bedingungen auf der Nordhalbkugel, so auch in Mitteleuropa. Studien aus Europa (BOULTON et al. 1996, PIOTROWSKI 1997) und insbesondere Nordamerika (McINTOSH 2004, McINTOSH et al. 2002, GRASBY et al. 2000, WEAVER et al. 1995, SIEGEL 1991, BOND 1972) zeigen die hohe Relevanz dieser Vereisungszyklen für die rezenten hydrogeologischen Verhältnisse in sedimentären Senken.

So konnte der Einfluss von Inlandsvereisungen auf die Grundwasserchemie in sedimentären Senken vielfach nachgewiesen werden. Dabei führten einerseits versinkende gering mineralisierte Schmelzwässer zu hohen Grundwasserneubildungsraten, wiederholte Tau- und Gefrierprozesse im Eisvorland zur Anreicherung von Lösungsinhalten im Sickerwasser (Abschnitt 4.6.2).

Darüber hinaus führte die Auflast des Eises und die Infiltration großer Mengen von Schmelzwasser zu signifikanten Beeinflussungen der hydraulischen Regimes, die bis heute nachweisbar sind. GRASBY et al. (2005) (vgl. auch ebenda zitierte Quellen) beschreibt die Grundwasserverhältnisse im Western Canada Sedimentäry Basin als Ergebnis vielfacher Änderungen der hydraulischen und hydrochemischen Randbedingungen seit dem Pleistozän. So wurden die präglazialen Grundwasserregimes während der Vereisungen umgekehrt. In den Warmzeiten stellten sich dann wieder die ursprünglichen hydraulischen Verhältnisse ein,

bevor die nächste Kaltzeit eine erneute Umkehrung induzierte. Auf dieser Grundlage definiert GRASBY et al. (2005) die heutigen hydraulischen Verhältnisse als transient und verweist in diesem Zusammenhang auf die differenzierte Verbreitung höher mineralisierter Grundwässer, die durch das rezente hydraulische Regime allein nicht erklärt werden können. Dieses Szenario könnte einen weiteren Ansatz für die Erklärung der unregelmäßigen Verteilung höher mineralisierter Wässer in der **Vorerrgebirgssenne** bieten.

Zeitliche Entwicklung hydraulischer Regimes

Hydraulische Regimes sind bei Betrachtung geologischer Zeiträume deutlichen Schwankungen unterlegen. GALLOWAY (1984) und SCHWARTZ et al. (1988) verweisen dabei auf die große Bedeutung der paläohydraulischen Verhältnisse für rezente hydrodynamische Systeme.

So ist neben der Grundwasserbeschaffenheit ist auch das hydraulische Regime starken zeitlichen Veränderungen z.B. durch Diagenesevorgänge unterworfen (INGEBRITSEN et al. 2006). Historische hydraulische Regimes können, insbesondere in gering dynamischen Grundwasserfließsystemen wie sie in tiefen sedimentären Senken oft vorherrschen, auf heutige Fließsysteme nachwirken. So bedingen historisch generierte Drücke („Overpressures“, oft aufgrund diagenetischer Prozesse) häufig Grundwasserfließbewegungen die der rezenten hydrogeologischen Situation entgegenwirken, also mit dieser im Ungleichgewicht stehen. Tiefe Überdrucksysteme können dabei im Extremfall bis Hunderte Millionen Jahre nachwirken. ZAWISZA et al. (2005) unterscheiden für sedimentäre Senken mit Kohlenwasserstofflagerstätten unterschiedliche Entwicklungsstadien in Bezug auf die Wechselwirkungen bzw. Gleichgewichtseinstellungen zwischen Lagerstätte und infiltrierendem Grundwasser („juvenile“, „transient“ und „matre“). Diese Kategorisierung ist aufgrund des verschiedenen Ansatzes nicht unmittelbar auf die **Vorerrgebirgssenne** übertragbar. Im weiteren Sinne kann man am ehesten von einem eher „maturem“ hydraulischen Zustand der Vorerrgebirgssenne ausgehen, der u.a. durch jüngeren tektonischen Stress und paläoklimatische Veränderungen eine transiente Charakteristik aufweist.

Für die Identifikation möglicher fossiler hydraulischer Regimes bzw. „Bereiche konservierter Überdrücke“ in der Vorerrgebirgssenne ist dagegen die zeitliche Entwicklung von Überdrücken in relativ flachen Senken von Interesse. Da sich solche Regimes sehr viel schneller auf neue Randbedingungen einstellen sind insbesondere Entwicklungen im Känozoikum relevant. So sind z.B. einige aktive Quellgebiete/Oasen in Gebieten der arabischen Halbinsel ohne rezente Grundwasserneubildung Überbleibsel der letzten regenreicheren Kaltzeiten. ALMASI (2001) nennt für die bis maximal 3600m tiefen gering durchlässigen Tonsteine der Ungarischen Senke Abbauzeiten von Überdrücken in Zeiträumen von 2.000 bis 250.000 Jahre, in Extremfällen bis 1 Million Jahre. Der Erhalt älterer Druckregimes in tiefen feinklastischen Bereichen der **Vorerrgebirgssenne** ist also, wenngleich unwahrscheinlich nicht auszuschließen.

Hannemann et al. (1998) halten für den benachbarten wesentlich weiträumigeren und tieferen norddeutschen Senkenraum langzeitliche Meeresspiegelschwankungen als Ursache weiträumiger aufwärtsgerichteten Druckgradienten für möglich und begründen so auch das Auftreten oberflächennaher höher mineralisierter Wässer. Der Erhalt solch weiträumiger Über-

druckregimes in der **Vorerzgebirgssenke** scheint aber aufgrund der dafür zu geringen Senkentiefe, der Abgrenzung von den nördlich angrenzenden Senkenstrukturen, der großen Heterogenität der feinklastischen Schichtenfolgen und der intensiven tektonischen Störung des Gebirges jedoch sehr unwahrscheinlich. Ein solches Phänomen wird auch von MAGRI et al. (2004) für die nördlich gelegene Nordostdeutsche Senke ausgeschlossen.

Beobachtungen junger lokaler „Überdruckregimes“, möglicherweise aufgrund diagenetischer Prozesse konnten in der Vorerzgebirgssenke in tiefen Aufschlüssen im Bereich der Steinkohlengruben in Zwickau und Lugau Oelsnitz beobachtet werden (Druckwasseraustritte).

4.1.4 Geochemie von Grundwässern in sedimentären Senken: Charakteristik, Prozesse, Untersuchungsansätze

4.1.4.1 Herkunft von Salinität in Grundwässern sedimentärer Senken

Die chemische Zusammensetzung von Grundwässern leitet sich aus ihrer Herkunft und nachfolgenden Entwicklung/Diagenese ab (Abschnitt 4.1.4.2). Insbesondere letztere ist für viele sedimentäre Senken oft nur vage rekonstruierbar, obwohl Fortschritte in den Analyse- und Modellierungsverfahren in den letzten Jahren deutliche Fortschritte brachten (vgl. auch Abschnitt 4.1.4.3).

Gute Datengrundlagen zur Chemie von tiefen Grundwässern gibt es vor allem in Senkenstrukturen mit Erdöl/Erdgas- oder Erzvorkommen (insbesondere in den USA) oder in Gebieten mit geothermischer Nutzung (z.B. Ungarische Senke).

Gerade tiefere Grundwässer weisen oft hohe Alter auf, so dass die klimatischen und auch geologischen Verhältnisse zu Zeiten ihrer Bildung häufig wesentlich von den rezenten Bedingungen abweichen. Dies erschwert Rückschlüsse auf die Bildungsmechanismen dieser Grundwässer.

In vielen der besser untersuchten sedimentären Senken weltweit ist ein genereller Anstieg der Mineralisation des Grundwassers mit zunehmender Tiefe zu beobachten (z.B. im Gulf-, Illinois-, Alberta-, Michigan Basin, Songliao Basin). Allerdings sind in einigen Senkenstrukturen deutliche Abweichungen zu erkennen, so z.B. im Palo Duro- und San Joaquin Basin und in der Ungarischen Senke. Im Llano Basin sind in allen Teufen ähnliche Salinitäten anzutreffen (Diagrammdarstellungen, BRADLEY 1986). Solche Verteilungsmuster der Salinität sind häufig nicht durch einfache statische Randbedingungen erklärbar sondern weisen auf komplexe genetische und/ oder diagenetische Szenarien bzw. auf sehr differenzierte hydraulische Verhältnisse hin. Diese Differenzierung spiegelt sich sicher auch im Auftreten höher mineralisierter Grundwässer in der **Vorerzgebirgssenke** wider (Abschnitt 4.2.4).

Die Ursachen erhöhter Mineralisationen in tieferen Grundwässern sedimentärer Senkenstrukturen sind, in engem Bezug zu ihrer Bildungsweise (Abschnitt 4.1.2), auf folgende wesentliche Mechanismen oder deren Kombinationen zurückzuführen.

Die Bedeutung dieser Bildungsprozesse für die Grundwässer der Vorerzgebirgssenke wird in den Abschnitten 4.5 und 4.6 diskutiert.

Lösung von Gesteinsbestandteilen bzw. Mischung mit diagenetisch veränderten Porenwässern im Untergrund

Die Anreicherung der Lösungsinhalte von Grundwässern erfolgt durch eine Vielzahl diagenetischer Prozesse über Wechselwirkungen des Grundwassers mit dem Umgebungsgestein, mit diagenetisch veränderten Porenlösungen und Gasen. Dabei kann die Mineralisation, wenn nicht anderweitig angereichert, bis maximal zum Lösungsgleichgewicht ansteigen. Typisch und in vielen Senkenstrukturen nachgewiesen ist die Laugung von massiven Evaporiteinlagerungen wie Sylvinit, Halit, Karbonaten, Anhydrit oder Dolomit, z.B. im Bereich von Diapiren (z.B. verschiedene Rocky Mountains foreland basins, THORNTON et al. 2004). Eine wichtige Rolle können jedoch auch kleinere und feindispers verteilte Einlagerungen/Bindemittel in Sedimenten trockener Klimate, so auch im Rotliegenden der Vorerzgebirgssenke (SCHNEIDER 2006, 1999b, SCHNEIDER und RÖBLER 1995) sowie die Lösung von Gesteinsmineralen selbst spielen (Abschnitt 4.6). Untersuchungen in anderen Senkenstrukturen ohne massive Salzvorkommen zeigen, dass höher mineralisierte Grundwässer bzw. Fluide schon in relativ geringen Teufen u.a. auf die Lösung bzw. Alterierung von Gesteinskomponenten zurückgeführt werden können (z.B. Songliao Basin, <2000m Lösungsgehalte bis 9g/L, Teufe Xie et al. 2003).

Die Höhe der resultierenden Mineralisation ist abhängig von der Löslichkeit der Minerale, der Kontaktzeit, den Grundwassereigenschaften sowie von möglichen Mischungen/Verdünnungen durch zuströmende verschieden mineralisierte Wässer. Anthropogene Beeinflussungen wie das Einbringen von Gasen durch Verpressung (Kharaka et al. 2006) oder über Grubenbaue (Vorerzgebirgssenke) können solche Lösungsvorgänge stark beschleunigen. Gleichmaßen sind auch Abreicherungen des Lösungsinhaltes, z.B. durch Adsorption in pelitischen Lagen oder durch gravitative Anreicherungen in stagnierenden Bereichen (STORCH et al. 2000) möglich.

Tiefe Grundwässer können aufgrund ihrer meist langen Verweilzeiten im Untergrund beträchtliche Lösungsinhalte aufweisen und bei entsprechenden Druckgradienten, z.B. entlang von Störungszonen mit oberflächennahen Grundwässern kommunizieren (z.B. DUBLYANSKY et al. 2003, Basin and Range Provinz, USA).

Anreicherung durch Evaporation aus Oberflächenwässern

Die Anreicherung, Einschließung und Versinkung von mit Lösungsinhalten angereicherten Oberflächenwässern beschreibt z.B. HARDIE et al. (1970). Voraussetzung sind entsprechend lang andauernde geeignete aride Umweltbedingungen wie Klima, Bodenbeschaffenheit und Vegetation. MORSE et al. (1997) nennt das **Rotliegende Deutschlands** ein solches Milieu. Auch die hohen Lösungsgehalte in geringen Teufen des Songliao Basin werden u.a. auf Eindampfung von Formationswässern zurückgeführt (Xie et al. 2003).

Versinkung von Meereswasser/ Anreicherung durch Eindampfung von Meereswasser

Versinkung von Meereswasser in Schelfbereichen ist eine häufige Ursache für die Bildung höher mineralisierter Grundwasser. Zahlreiche Grundwässer in tiefen sedimentären Senken, insbesondere in den USA, Kanada und Australien werden auf infiltrierte marine Wässer zurückgeführt (z.B. THORNTON et al. 2004, KYSER 2004, JONES et al. 2003). Darüber hinaus kommt der Eindampfung und Versinkung von Meerwasser unter ariden Bedingungen (Verdunstung>Niederschlag), z.B. im Bereich von Sabkha-Environments eine gewisse Be-

deutung bei der Bildung hoch mineralisierter Grundwässer zu. Niedriger mineralisierte Wässer werden dabei aufgrund der geringeren Dichte (nach oben) verdrängt. Allerdings zeigen zahlreiche Praxisbeispiele, dass eine generelle Zunahme der Mineralisation mit der Teufe nicht immer gegeben ist (Abschnitt 4.1.3.2), und die Herkunft vieler höher mineralisierter Wässer deshalb nicht auf reliktsche marine Wässer (allein) zurückgeführt werden kann (vgl. folgende Referenzen). Dies gilt sicher auch für die Vorerzgebirgssenke.

Nach HOLLAND (1988) blieb im gesamten Phanerozoikum die Gesamtmineralisation des Meereswasser konstant ($Dichte=1,029\text{ g/cm}^3$), die Zusammensetzung im einzelnen kann jedoch Schwankungen unterlegen haben BRADLEY (1986). Allerdings weisen nach FRAPE (1988) und MCNUTT (1988) vergleichbare Fluida in präkambrischen Gesteinen sehr unterschiedliche Merkmale auf. Eine Identifikation fossiler mariner Wässer anhand chemischer Indikatoren ist prinzipiell möglich, z.B. $(Ca + Mg + Sr - SO_4 - HCO_3)/Br$, Na/Br und Cl/Br (Abschnitt 4.1.4.3).

Anreicherung von Lösungsgehalten unter Permafrost-Verhältnissen und durch Schmelzwässer

Unter Frost bzw. Permafrostbedingungen führt das Ausfrieren, ähnlich der Eindampfung, zu einer Anreicherung von Grundwasserlösungsinhalten in der zurückbleibenden Sole.

Die Beeinflussung von Grundwasserhydraulik und Grundwasserchemie durch Permafrostbedingungen und durch die Infiltration von Schmelzwässern ist für verschiedene sedimentäre Senkenstrukturen beschrieben worden, so in den Midcontinent sedimentary basins, z.B. Illinois, Michigan und Appalachian Basin (MCINTOSH et al. 2004) und im Western Canada Sedimentary Basin (GRASBY et al. 2005). Auch große Teile Nord- und Mitteleuropas, so auch die **Vorerzgebirgsregion**, waren im Pleistozän zeitweise von Eismassen bedeckt und/oder Permafrostgebiete (Diskussion in Abschnitt 4.6.2).

Anreicherung durch Membranfilterprozesse (Osmose) und Diffusion

Die Bildung höher mineralisierter Wässer durch Osmose bzw. reverse Osmose wird z.B. durch KOOI et al. (2003), GRAF (1982), COPLEN et al. (1973) und BREDEHOEFT et al. (1963) beschrieben. Voraussetzungen sind pelitische Sedimentgesteine wie Tonschiefer in entsprechender Menge (Volumenanteil) und geeigneter stratigraphisch-tektonisch und zeitlicher Positionierung. GRAF et al. (1966) beschreibt etwa die Entstehung von Na-Ca-Cl Solen im evaporitfreien Illinois Basin durch Membranfilterprozesse. HANOR (1983) und MANHEIM (1970) betrachten Membranfilterprozesse als Ursache für die Bildung von Solen in den meisten Fällen jedoch für unwahrscheinlich, da höher mineralisierte Wässer in zahlreichen Fallstudien auf der „Niedrig-Druck Seite“ der Membran auftreten, der Bildungsprozess dagegen ein erhöhtes hydraulisches Potential im Bereich der höher mineralisierten Wässer erfordert. Allerdings sind Druckregimes in sedimentären Senken häufigen Schwankungen unterworfen und müssen deshalb, in Bezug auf osmotische Prozesse, nicht mit den rezenten Konzentrationsverteilungen korrelieren (HANOR et al. 1988).

Die Lösungsgehalte von Grundwässer können durch Diffusionsprozesse, z.B. aus begrenzenden pelitischen Gesteinen mit hochkonzentrierten Porenlösungen beträchtlich steigen. ZHANG et al. (2007) diskutiert die Diffusion von NaCl-reichen Porenwässern aus Tonschiefern als Ursache hoher Salinität in Grundwässern des Great Artesian Basin in Australien.

Einfluss hochmineralisierter juveniler Wässer

Als Entgasungsprodukte oder Residualfluida magmatischer Schmelzen besitzen juvenile Wässer meist hohe Lösungsgehalte charakteristischer Zusammensetzung. Ein kontinuierlicher Eintrag von mineralisierten Fluiden (insbesondere mit CO₂) der unteren Erdkruste und des Mantels in die Fluida der oberen Kruste gilt als nachgewiesen (BARNES 1988, BURRUSS 1988). Auch in über Riftstrukturen angelegten Senkenstrukturen können juvenile Wässer zufließen bzw. starker temperaturinduzierter Grundwasserfluss erzeugt werden, wie rezent, z.B. im Bereich des Rheintalgrabens beobachtet werden kann (LAMPE et al. 2003). Der Bereich der heutigen **Vorerzgebirgssenke** war im späten Paläozoikum nach FISCHER (1990) u.a. in einem solchen Riftstadium bzw. vergleichbaren tektonischen Stressbedingungen ausgesetzt (Abschnitt 3.3).

Primär juvenile Wässer können sich durch die oben genannten Prozesse weiter anreichern.

4.1.4.2 Einfluss der Diagenese auf das Grundwasser und Gestein; Zeitfaktor

In sedimentären Senken sind eine Vielzahl von diagenetischen Prozessen beschrieben worden die, insbesondere während und nach der Beckenbildung (Absenkung), die physikalische und chemische Beschaffenheit von Grundwasser (und Gestein) nachhaltig beeinflussen können. (Grundwasser-) Diagenese versteht sich hier als eine physikalische oder chemische Entwicklung bzw. Veränderung des Grundwassers in Richtung eines Gleichgewichtszustandes. Sie wird dabei durch eine Reihe von Randbedingungen und Wechselwirkungen bestimmt (Abbildung 9).

Diagenetische Prozesse nehmen häufig Einfluss auf die Grundwasserdynamik und umgekehrt. So bestimmt nach WOOD (1988) das Grundwasserfließsystem häufig Ort und Art der Diagenese, z.B. entlang bevorzugter Grundwasserfließwege.

Zeitliche Entwicklung von Grundwasserchemie

Eine Haupttrandbedingung der Diagenese, insbesondere in Bezug auf tiefe Grundwässer, ist der Zeitfaktor. So hat die Verweildauer des Grundwassers im Untergrund und damit die Dauer seiner Wechselwirkungen mit diversen Einflussgrößen einen entscheidenden Einfluss auf die Grundwasserbeschaffenheit (Abbildung 9). Häufig ist mit zunehmender Dauer der Diagenese eine Zunahme der Grundwassermineralisation verbunden. Ausnahmen, z.B. aufgrund von Membran-Filterprozessen (Abschnitt 4.1.4.1), sind jedoch häufig.

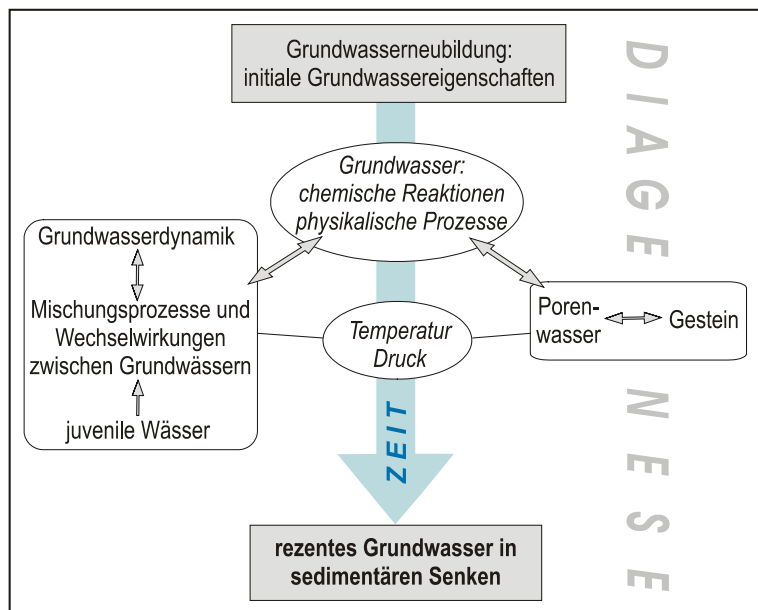
MING-KUO LEE (1997) simulierte diverse diagenetische Prozesse in Modellrechnungen anhand verschiedener Beispiele für sedimentäre Senkenstrukturen. In zahlreichen realen Senkenstrukturen erzeugt die Vielzahl und unterschiedliche Intensität der diagenetischen Prozesse und ihr gegenseitiger Einfluss aufeinander ein komplexes Bild ineinander greifender Prozesse. Diese sind dabei oft großen zeitabhängigen Veränderungen unterworfen. Anhand komplexer Modelle, so z.B. für das Pariser Becken (GONCALVES et al. 2003), wurde versucht die Interaktion verschiedener diagenetischer Prozesse über den Zeitraum der gesamten Senkenentwicklung abzubilden.

In Bezug auf die hydrogeologischen Eigenschaften von Gesteinsfolgen in sedimentären Senken führen diagenetische Prozesse so häufig zur zeitlichen Abfolge von Erhöhung und Verringerung von Porosität und Durchlässigkeiten, z.B. durch Lösung von Gesteinsbestandteilen

und spätere Prezipitation aus dem Grundwasser (z.B. NEWELL et al. 2003).

Die lange und differenzierte Entwicklung der **Vorerrzgebirgssenne** (Wechsel der Sedimentationsmilieus, tektonischen Regimes und klimatischen Verhältnisse), hatte sicherlich einen entscheidenden Einfluss auf die heutige Grundwasserbeschaffenheit in den tieferen geringer durchlässigen Schichten, die außerhalb des unmittelbaren Einflusses meteorischer Wässer liegen. Diagenetische Prozesse über lange Zeiträume sind deshalb vermutlich eine (von mehreren) Ursachen für die Bildung höher mineralisierter Grundwässer, wie sie vereinzelt im Vorerrzgebirgsbereich erschlossen sind. Die Wirkung der Anteile der unterschiedlichen diagenetischen Prozesse an der Grundwassermineralisation wird diskutiert (Abschnitte 4.2.1 und 4.5).

Abbildung 9 Diagenese tiefer Grundwässer sedimentärer Senken: Einflussfaktoren und Randbedingungen



In einer Vielzahl von Untersuchungen diagenetischer Prozesse in Senkenstrukturen spielen die folgenden Prozesse eine wesentliche Rolle. Sie werden auch für die Vorerrzgebirgssenne, als Quelle von Mineralisationen tiefer Grundwässer und als eine Triebkraft tiefer Grundwasserfließsysteme diskutiert (Abschnitte 4.1.3 und 4.2.2).

Sedimentkompaktion / Volumenverringierung unter allmählicher Auspressung von Porenwässern und -gasen und häufig (hydrostatischer) Druckaufbau in den Formationen

Lösungsprozesse in Bindemitteln und Körnern. So beschreiben BOLES (1987) und BOLES et al. (1987) die Lösung von Plagioklasen bei Temperaturen zwischen 80 und 120°C. An Korngrenzen finden häufig Drucklösungsprozesse statt. SCHNEIDER (1999b, 2006) hält eine solche Lösung von feindispersen Verdunstungsrückständen unter ariden Klimaverhältnissen und von verwitterten Vulkaniten des Rotliegenden als mögliche Quelle der Chlorid – bzw. Natriumgehalte in den höher mineralisierten Grundwässern in der **Vorerrzgebirgssenne** (Abschnitt 4.6.2). Lösungsprozesse können starke, zumeist positive, Auswirkungen auf die hydraulische Durchlässigkeit der Gesteine haben. So führt DOWNING et al. (1987) hohe Durchlässigkeiten im Old Red Sandstone im Midland Valley of Scotland auf solche Prozesse zurück. FRANCA et al. (2003) beschreibt für das Parana Becken in Südamerika die Bildung einer hydraulisch wesentlichen sekundären Porosität in Sandsteinen bis rund 250m Teufe durch die Lösung kalzitischer Bindemittel und Feldspäte durch meteorische Wässer („extensive meteoric diagenesis“). Er nennt dabei Durchsatzraten von 100 bis 500 Porenvolumina.

Solche sekundären Porositäten können in gröberklastischen Lagen (Mülsen- und Härtensdorf-Folge, Teile der Leukersdorf-Folge) insbesondere im Bereich von Störungszonen auch in der **Vorerrzgebirgssenne** von Bedeutung sein.

Mineralfällungen aus der Lösung, wie die Ausfällung von Bindemitteln/ Zementation führen dagegen häufig zu einer Verminderung der hydraulischen Durchlässigkeit von Gesteinen wie von DOWNING et al. (1987) für den Old Red Sandstone in S-Wales, Welsh Borderland und S-England beschrieben. BUSCHERT et al. (2004) beschreiben die großräumige diagenetische Zementierung von Porenräumen im östlichen Pariser Becken. BOLES (1987) und BOLES et al. (1987) nennen Ausfällungen von Dolomit bei Temperaturen zwischen 20 und 40°C, von Calcit zwischen 45 und 120°C. Solche Prozesse kommen also auch für die **Vorerrzgebirgssenne** in Frage. Sie beschreiben weiterhin die Rekristallisation von authigenem Kaolin zwischen 80 und 120°C und Alterationen wie Albitisierungsprozesse zwischen 100 und 120°C.

Umbildungen von Mineralen unter Freisetzung von Wasser (**Dehydrierungsreaktionen**) sind in tiefen Senken wichtige Quellen von Fluida und können eine Veränderung der Chemie von Porenlösungen/ Grundwasser durch Verdünnung bewirken (vgl. KYSER et al. 2003).

So tritt eine Dehydrierung von Gips zu Anhydrit bei Temperaturen zwischen 40 und 60°C, also z.B. in rund 1000 bis 1700m Teufe auf. BEKINS et al. (1994) und HUANG et al. (1993) beschreiben in diesem Zusammenhang die Illitisierung (Umwandlung von Smectit zu Illit) bei Temperaturen zwischen 100 und 140°C (RAMSEYER et al. 1986) und/ oder Versenkungstiefen von mindestens 2km (Perry et al. 1972) oder auch unter Einfluss hydrothormaler Lösungen (REINL 2000). Weiterhin sind Umbildungen primärer Plagioklase bereits in geringen Teufen verbreitet.

In der **Vorerrzgebirgssenne** ist aufgrund der relativ geringen Versenkungsteufe mit relativ geringen Umbildungsraten bzw. Stabilität vieler Minerale auszugehen. Die Freisetzung von Fluida durch Mineralumbildungen wird im Vergleich zu den aus der Kompaktion freigesetzten Mengen vermutlich eher gering sein.

Die Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Porenwässern und so letztlich auch von Grundwässern durch **Membran-Filterprozesse** (Osmose) kann in pelitischen Gesteinen, z.B. in Tonsteinen wie sie auch in der **Vorerrzgebirgssenne** vorkommen, von Bedeutung sein (z.B. KOOI et al. 2003, GRAF 1982, COPLEN et al. 1973, GRAF et al. 1966, BREDEHOEFT et al. 1963; vgl. Abschnitt 4.1.4.1).

Organische Materialien, feindispers z.B. in Tonsteinen oder konzentriert in Form von Pflanzenresten/Torfen/Kohlen, unterliegen im Verlauf ihres **Reifeprozesses** im Sediment vielfältigen physikalischen und chemischen Prozessen, die ihrerseits das umgebende Gestein sowie Poren- und Grundwasser beeinflussen. Dazu gehören **Volumen- und Temperaturänderungen, Entgasungen, Lösung von Zerfallsprodukten** und **Adsorption von Grundwasserinhaltsstoffen**.

Der für die Beschaffenheit des Grundwassers vielleicht wichtigste diagenetische Prozess ist die **Mischung von Grundwässern** mit verschiedenen Eigenschaften. Insbesondere tiefe, lange im Untergrund verweilende Grundwässer, wie sie in sedimentären Senken auftreten, kön-

nen seit ihrer Genese zahlreichen Mischungsprozessen unterworfen worden sein, die zu einem beständigen Wechsel der anzustrebenden physikalischen und chemischen Gleichgewichtsbedingungen führten. So ist die chemische Zusammensetzung rezent beobachteter Grundwässer Produkt häufig deutlicher klimatischer Schwankungen seit Abschluss der Senkenbildung (z.B. RISACHER et al. 2003). Im Ergebnis entstehen genetisch sehr differenzierte Grundwässer, deren Beschaffenheit nicht mehr auf einfache/ wenige Bildungs- und Diageneseprozesse zurückzuführen ist. Solche Grundwässer wurden in vielen sedimentären Senken weltweit beschrieben (vgl. Anlage 1). Sicher ist zumindest ein Teil der höher mineralisierten Grundwässer in der **Vorerzgebirgssenke** als Produkt langzeitlicher diagenetischer und klimatischer Entwicklungen (arides Milieu – Meeresbedeckung – glaziale Zyklen) solchen Mischwässern zuzuordnen.

In verschiedenen Senkenstrukturen wurden jedoch auch weitgehend isolierte höher mineralisierte Wässer nachgewiesen, die bis zu mehreren hundert Millionen Jahren kaum Mischungen mit anderen Wässern ausgesetzt waren (z.B. ANDREW et al. 2005).

Lagestättenbildung durch Grundwasserströmung in sedimentären Senken

Grundwassergebundene Diageneseprozesse in sedimentären Senken können zur Bildung diverser Lagerstätten führen. Sie entstehen durch Interaktion von Grundwasserfluss, Massentransport und Wärmetransport (GARVEN et al. 2004, RAFFENSPERGER 1997, BETHKE et al. 1988). Zu solchen Lagerstätten gehören die an regionale Grundwasserströme gebundenen Mississippi-Valley-Type-Lagerstätten (MTV) (Pb-, Zn-, Cu-Sulfide), deren Metalle aus den Sedimenten bzw. aus hoch mineralisierten Grundwässern konzentriert werden (z.B. Illinois-, Arkoma- und Alberta-Basin; GREGG et al. 1992, FILIPEK 1992, HITCHON 2006). In gut durchlässigen Bereichen freier Konvektion, so z.B. entlang von Störungen, können sich aus den Lösungsinhalten aufsteigender Grundwässer Lagerstätten bilden. Dazu gehören z.B. massive Uranerzlagerstätten im kanadischen Athabasca Basin und dem australischen McArthur Basin (RAFFENSPERGER 1997). Die Mineralisationen sind dabei stark abhängig von der Chemie, Hydraulik und Thermik des Grundwasserstromes. Solche Lagerstättenbildungen aufgrund von Grundwasserströmung sind im Bereich der **Vorerzgebirgssenke** nicht bekannt.

4.1.4.3 Ansätze zur Untersuchung von Grundwässern in sedimentären Senken

Aus der Vielzahl von Ansätzen die zur Untersuchung von Grundwässern in sedimentären Senken weltweit verwendet werden, sollen beispielhaft ausgewählte Verfahren und Indikatoren genannt werden, die weithin Anwendung finden und als Untersuchungsansätze für Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke interessant sein können (Tabelle 8). Wichtige Ziele solcher Untersuchungen an Grundwässern sind u.a.:

- Bestimmung von Herkunft, Entwicklung und Fließweg von Grundwässern
- Altersbestimmungen (stabile und radioaktive Isotope)
- Ableitung der Bildungsbedingungen (z.B. Temperatur, Isotopenverteilungen, chemische Zusammensetzung, Menge), u.a. zur Rekonstruktion der paläohydrologi-

schen/hydrogeologischen Verhältnisse

- Unterscheidung von Grundwässern untereinander
- Identifizierung der Beziehungen/ Wechselwirkungen zwischen Gestein/ Bindemittel, Porenwasser und Grundwasser, z.B. über Massenbilanzen und Bestimmung chemischer Gleichgewichte

Tabelle 8 Indikatoren zur Charakterisierung von Grundwässern in sedimentären Senken

Indikator/ Methode	Verwendung/Beschreibung	ggf. ausgewählte Re- ferenzen
Charakteristik Konate GW (marin)	kaum verändertes bis leicht erhöhtes radiogenes Sr im Vgl. zum Ausgangswasser (Meerwasser); Chemie und Isotopie im Gleichgewicht zur Mineralisation des GWL; Cl/Br gering; Lage im Bereich der Evaporationsgeraden (Meereswasser): $\text{Log}(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Sr}-\text{SO}_4-\text{HCO}_3 \text{ meq/L}) / \text{Br mg/L}$	
Charakteristik meteor. GW	erhöhtes radiogenes Sr im Vgl. zum Ausgangswasser (GWN); Chemie mglw., Isotopie nicht im Gleichgewicht zur Mineralisation des GWL; im Vgl. zu Calcit geringe $\delta^{18}\text{O}$ -Werte; Cl/Br höher als bei konnaten GW	
Hauptionen, Sr, Ba	komplexe Betrachtungen und Plots zur Ableitung von Herkunft, Bildungsbedingungen und Mischungen von GW in sedimentären Senken	ANDREW et al. (2005)
Chlorid	guter konservat. Tracer, solange keine spätere Lösung von Chlorid	MORSE et al. (1997)
$^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl} + \text{HI}^*$	Herkunft von Salinität von Grundwässern; Nachweis Diffusion	ZHANG (2007), LAVASTRE (2005)
Cl vs. ^{18}O	Herkunft der Mineralisationen/GW: Kurven- Aushaltung des ^{18}O -Toleranzbereiches für Oberflächen- und Meereswasser und Evaporite; Wässer ausserh. d. Bereiches=Evaporiteinfluss, Ableit. Menge Cl (Voraus.: kein Evaporationseffekt, sonst Korrektur ^{18}O über ^{14}C vs. ^{18}O)	SHOUAKAR-STASH et al. (2003), GLASBERGEN (1987), GLASBERGEN et al. (1982)
^{14}C , $^{14}\text{C}/^{18}\text{O}$	$^{14}\text{C}/^{18}\text{O}$: Korrektur des Evaporationseffekts bei Cl vs. ^{18}O – Plots; ^{14}C : Altersbestimmungen	BIRKLE et al., GUENDOUZ et al. (2003)
Br/Cl	Herkunft höher mineralis. GW: (1) aus Mischwäss. (meteor., marin) liegt Br/Cl meist bei 0,0025 - 0,005; (2) bei Lsg. von Salzen ist Br/Cl geringer (Cl nimmt rel. zu) als bei marinen Wässern, Bsp. Kalisalzgrube Ruhrgeb.: Br/Cl= 0,0012-0,002; (3) gilt auch für unterschiedl. alte Salze (Zechstein bis Devon, Holland)	GRASBY et al. (2005), SHOUAKAR-STASH et al., GUENDOUZ et al. (2003), CARPENTER (1978), GLASBERGEN (1987), HERBERT et al. (1986)
TDS vs. Br, Na/Br,	relative Br-Abreicherung in Richtung: Grundwasser/Meereswasser-gelöste Evaporite (Plots); auch Na-Ca-Cl-TDS Plots	GLASBERGEN (1987), FRAPE et al. (1984), XIE et al. (2003)
Störfaktor Br-Gehalt	Br Anstieg: wiederholte Lsg./Fällung von Halit; Br-Quellen wie sedimentiertes organisches Material	MEANS et al. (1987)
Störf. Na- Konzentration	Kation.-Konz. oft höher, Anion.-Konz. geringer als chem. Gleichgew.; Ursache: Ionenaustausch-Reaktionen aufgr. hoher Na-Aktivität gegenüb. Tonmin./Fsp.; Defizit korreliert pos. mit Na-Konz. und δD	PARKHURST et al. (1980)
Störf. Ultra- filtrationsproz.	können Isotopie (O- und H-Isotopenfraktionierung) beeinflussen	COPLEN et al. (1973)
O-Isotopie, Deuterium	Gehalte/Verteilung: Herkunftsbestimmungen (meteorisch, glazial), Massenbilanzen, Gleichgewichtsbetrachtungen zu Deutung des Verhältnisses zw. GW, Porenwasser u. Bindemittel/Gestein	GRASBY et al. (2005), SHOUAKAR-STASH et al., GUENDOUZ et al., ROSTRON et al. (2003)
Sr	Konzentrationen: Vergleich Sr im GW mit Gehalten in mgl. Ursprungswässern (meteor., marin)	
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Rb/Sr, Lau- nungstests	Hinweise zur chem. Entwicklung, Migration der GW und zu Wechselwirkungen zwischen Gestein und GW; ^{87}Sr entsteht auch radiogen durch Zerfall von ^{87}Rb ; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ im GW kann durch Interaktion mit Tonmineralen, Feldspäten, Glimmer beeinflusst werden, weniger durch andere Diagenese-Prozesse wie Dolomitisierung und Fällung	ANDREW et al. (2005)

Indikator/ Methode	Verwendung/Beschreibung	ggf. ausgewählte Referenzen
Sr allg.	typisch.: <u>ältere Solen</u> : höhere Sr-Konz., geringer radiogen; <u>Silikate</u> : geringere Sr-Konz., höher radiogen; <u>Karbonate/ Dolomite</u> : höhere Sr-Konz., geringer radiogen (bei wichtigen Ausnahmen)	McNUTT et al. (1987)
Lösungseinschl.	Untersuchung von Lösungseinschlüssen geben Hinweise auf Salinität u. Temperatur bei Bildung	

*HI = Hauptionen

Gase in Grundwässern sedimentärer Senken

In Grundwässern sedimentärer Senken können eine Vielzahl von Gasen gelöst sein. Ihr Eintrag erfolgt entweder atmosphärisch über die Grundwasserneubildung bzw. den Kontakt mit der Bodenluft der ungesättigten Zone (z.B. CO₂, N₂, O₂ und verschiedene Edelgase), durch chemische Reaktionen oder radioaktiven Zerfall im Grundwasser oder Kontaktgestein (z.B. H₂S, ³He, ⁴⁰Ar) oder aus den Bereichen der unteren Erdkruste oder dem Erdmantel (z.B. ⁴He, CH₄, höhere Kohlenwasserstoffe, CO₂).

Wesentlichen Einfluss auf die Grundwassereigenschaften und Umgebungsgestein kann der CO₂- und O₂-Gehalt des Grundwassers haben (Versauerung, Lösung von Stoffen). Die Lösung von Kalken durch CO₂-haltige Grundwässer ist aus vielen Karstgebieten bekannt (z.B. HÖLTING 2006). Anthropogener CO₂-Eintrag in sedimentäre Senken beeinflusst diverse diagenetische Prozesse (GUNTER et al 2004), so erhöht sich z.B. das Lösungsvermögen von Gesteinsbestandteilen und damit die Gewässersalinität (Kharaka et al. 2006, KASZUBA et al. 2005). Auch die Grubenbaue der ehemaligen Steinkohlenreviere in der **Vorerrzgebirgs-senke** stellten/ stellen mächtige Kontaktzonen zwischen CO₂/O₂ und Gestein dar und sind eine Quelle erhöhter Mineralisationen im dortigen Grundwasser.

Gelöste Gase sind wichtige Indikatoren für die Bestimmung der **Herkunft, Diagenese**prozesse und **Alter** von Grundwässern in sedimentären Senken (MAZOR et al. 1987). Eine besondere Rolle spielen dabei die atmosphärischen Edelgase Neon (Ne), Argon (Ar), Krypton (Kr) und Xenon (Xe). Sie sind für die Untersuchung von Grundwässern in sedimentären Senken besonders interessant, da sie weitgehend inert sind, in der gesättigten Zone in gelöster Form im Grundwasser erhalten bleiben und ihre Inputfunktion (Isotopenzusammensetzung und Konzentration) bekannt ist (MAZOR et al. 1987). Helium (He) ist sowohl als Zerfallsprodukt von Tritium (³He, Alters- und Herkunftsbestimmung) als auch als Entgasungsprodukt des Mantels (⁴He, Herkunftsbestimmung) von wissenschaftlicher Bedeutung. Auch instabile radioaktive Isotope der Edelgase, wie z.B. ⁸⁵Kr werden zu Altersbestimmungen verwandt.

Grundwässer in sedimentären Senken zeigen in Bezug auf ihren Salzgehalt, ihre Temperatur und dem ausgesetzten (hydrostatischen) Druck ein weites Spektrum von Eigenschaften. Das Lösungsvermögen von Gasen im Grundwasser schwankt in Abhängigkeit dieser Grundwassereigenschaften und des jeweiligen Gases beträchtlich. Generell verhält sich dabei die Löslichkeit umgekehrt proportional zum **Mineralisierungsgrad** des Grundwassers. So ist die Löslichkeit von Edelgasen in Grundwasser mit Salzkonzentrationen ähnlich denen von Meereswasser ca. 20% geringer als in gering mineralisierten Grundwässern (KÖNIG 1963), am empfindlichsten reagieren hier Kr und Xe.

Die Löslichkeit von Gasen im Grundwasser verhält sich proportional zu **Druck** und **Temperatur**. Edelgase wie z.B. Kr und Xe können deshalb als Indikatoren der klimatischen Ver-

hältnisse während der Grundwasserneubildung verwendet werde.

Aufgrund der genannten Verwendungsmöglichkeiten ist die Untersuchung gelöster Gase, insbesondere der Edelgase, in Grundwässern sedimentärer Senken weltweit ein wichtiger Forschungsschwerpunkt (Tabelle 9).

Tabelle 9 Charakterisierung von Grundwässern in sedimentären Senken mit Hilfe gelöster Edelgase

Gase	Verwendung	Beispiele/ Referenzen
^3He , ^{40}Ar	Vergleich zwischen Konzentration in GW und Porenwasser; Abgrenzung konnater und migrierender Wässer; Altersbestimmungen tiefer Senken-Fluida	BETHKE et al. (2004), MAZOR et al. (1987), Buntsandstein-Aquifere/ S-England (ANDREWS et al. 1979, 1982), Valles Caldera/ New Mexiko (KENNEDY 1985), Palo Duro Basin/ Texas (ZAIKOWSKI et al. 1987), Molasse Becken/ Österreich (ANDREWS et al. 1985), Northern Gulf of Mexico Basin (MAZOR et al. 1981)
^4He , ^{40}Ar (radiogen)	Altersbestimmung für sehr alte und tiefe Grundwässer; Abgrenzung Nahrungs- und Zehrungsbereiche; gutes Korrektiv für Altersbestimmung aus Strömungsmodellen (Problem der Simulation quasi stagnierender GW); sichere Abgrenzung von Grundwässern verschiedener Alter im Bereich 10 Tsd. bis > 400 Mio. Jahre möglich	
$^3\text{He}/^4\text{He}$	Abschätzung Anteile meteorischen und konnaten GW	MAZOR et al. (1987, 1991)
Ne, Ar, Kr, Xe	Ableitung der Infiltrationstemp. aus Konzentration	HERZBERG et al. (1979), ANDREWS et al. (1979), MAZOR (1972), OANA (1957)
	Abschätzung der Wechselwirkungen mit der Bodenluft; Korrektur durch Abgleich von Ne (wenig T-abhängig) mit Kr, Xe (wenig Wechselwirkungen mit Bodenluft)	HERZBERG et al. (1979), MAZOR (1972), ANDREWS et al. (1984)
Ne, Ar	Unterscheidung von evaporitischen Restlösungen und Solen aus Gesteinslösung	Palo Duro Basin (ZAIKOWSKI et al. 1987)
Ne, Ar, Kr, Xe	Deutung der Genese meteor. Grundwässer durch Edelgasanalyse auch für sehr alte, hochtemp. Wässer möglich	Grundwässer in tiefen Senkenstrukturen (MAZOR et al. 1987)
	oberhalb Siedepunkt (>2,5-3km Teufe) Verschiebung der Ausgangsverhältnisse der Isotopenverteilung; jedoch für atmosph. und radiogene Isotope gleichermaßen	MAZOR et al. (1984), MAZOR (1979)

4.1.5 Schlussfolgerungen für die Verhältnisse in der VES

Die Studie zu Ergebnissen hydrogeologischer Untersuchungen in sedimentären Senken weltweit und deren Interpretation kann die in der hydrogeologischen Analyse der Vorerzgebirgssenke (Abschnitte 4.2 bis 4.7) diskutierten Erkenntnisse sinnvoll ergänzen. Sie bietet eine Vielzahl von Lösungsansätzen, die weiter diskutiert werden sollten.

Dies betrifft insbesondere Prozesse in tieferen Senkenbereichen (>100m), da große Teile der Vorerzgebirgssenke dort hydrogeologisch kaum erschlossen sind. Details zu den nachfolgenden Punkten werden in den einzelnen Themenkomplexen diskutiert, Referenzen dort genannt (Abschnitte 4.1.1 bis 4.1.4). Ein Erkenntniszuwachs erfolgte danach insbesondere zu folgenden Schwerpunkten.

Bildungsszenarien höher mineralisierter Wässer (Abschnitte 4.1.2, 4.1.4.1 und 4.6.3)

Aus der Studie wird die Bedeutung von Mischungsprozessen für die Grundwässer sedimentärer Senken deutlich. Aufgrund der vielfältigen und sich überlagernden Antriebskräfte für

Fließvorgänge werden syngenetisch gebildete bzw. platzierte konate Wässer in besser durchlässigen, in das Strömungsgeschehen einbezogenen Schichten der Vorerzgebirgssenke, rezent kaum eine Rolle spielen. In feinklastischen quasi stagnanten Bereichen können sie jedoch residual vorkommen. Dies wird auch durch die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung bestätigt.

Die Möglichkeit der Anreicherung, Einschließung und Versinkung von mit Lösungsinhalten angereicherten Oberflächenwässern (z.B. in einem „Rotliegend-Environment“) sowie von Bindemitteln und Einlagerungen als Quelle höher mineralisierter Grundwässer wird bestätigt. Dies gilt auch für die Möglichkeit der Anreicherung durch Ausfrieren unter Permafrostbedingungen, allerdings ist hier in Bezug auf die Vorerzgebirgssenke ein Nachweis bisher schwer möglich. Ähnliches gilt für Osmose-Prozesse, wenngleich häufig als Ursache für Aufkonzentrierungen von Grundwässern in feinklastischen Gesteinen vermutet sind in-situ Nachweise (Identifikation der erforderlichen Bildungsbedingungen) selten. Möglicherweise kann dies auch als ein Hinweis auf die dynamische Entwicklung der Druckregimes (Umkehrung) gewertet werden.

Die Theorie der Entstehung höher mineralisierter Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke durch Versinkung von Meereswasser als allein verantwortlicher Bildungsmechanismus kann anhand praktischer Beispiele aus anderen Senkenstrukturen nicht unterstützt werden.

Ein rezenter „Aufstieg“ höher mineralisierter Wässer in der Vorerzgebirgssenke entlang gut durchlässiger tektonischer Strukturen ist weder wahrscheinlich noch nachgewiesen. Möglich ist eine frühere Platzierung oder Anreicherung höher mineralisierter Wässer in gering durchlässigen Bereichen. So ist davon auszugehen, dass tektonische Impulse im Verlaufe der differenzierten tektonischen Entwicklung der Vorerzgebirgssenke, z.B. während der Senkenbildung aber auch danach, solche Grundwasserbewegungen induziert haben. Dies betrifft insbesondere tiefere hydraulisch gering durchlässige Schichtenfolgen in denen ein Druckabbau nur sehr langsam möglich ist. Diese Ereignisse können auch für die Entlastung von diagenetisch aufgebauten Drücken durch Fluidabewegungen verantwortlich sein - Vorgänge die für vergleichbare sedimentäre Senkenstrukturen belegt sind.

Inwieweit rezente tektonische Aktivität, z.B. im angrenzenden Vogtland, zu einem Druckaufbau beitragen kann ist unklar.

Antriebskräfte von Grundwasserbewegungen (Abschnitt 4.1.3)

Die Studie zeigt die sehr differenzierte Verteilung von Antriebskräften von Grund- und Porenwasserbewegungen in Abhängigkeit von verschiedenen oft transienten Randbedingungen in sedimentären Senken. Die Anwendung der in der Literatur diskutierten Schemata auf die Verhältnisse in der relativ flachen Vorerzgebirgssenke suggeriert die weitgehende Dominanz topographisch induzierten Grundwasserflusses sowohl für lokale und intermediäre als auch für regionale Grundwasserbewegungen.

Ein Ausnahme können die tiefsten Senkenbereiche bzw. sehr gering durchlässige Bereiche bilden. In Anlehnung an Entwicklungen in anderen Senkenstrukturen führte der Aufbau von Druckpotential („Overpressures“) in den gering durchlässigen Bereichen der Vorerzgebirgs-

senke während der Senkenbildung und vermutlich noch lange darüber hinaus zu langsamen aber stetigen Grundwasserbewegungen und damit zu Platzierungen höher mineralisierter Wässer in höheren Schichten. Diageneseprozesse (wie Lösungs-, Kristallisations-, Transformations- und Osmoseprozesse mit resultierenden Volumenänderungen) haben dazu sicherlich beigetragen. Dies führt zu Interaktion mit topographisch induziertem Grundwasserfluss und begünstigt Mischungen höher mineralisierter Wässer mit gering mineralisierten meteorischen Grundwässern.

Von Interesse ist das Phänomen der in anderen Senkenstrukturen beobachteten Ausbildung von hydrothermalen bzw. freien konvektiv induzierten Konvektionsströmen, auch kleineren Maßstabes, z.B. in Störungsbereichen. Freie Konvektion setzt neben entsprechenden Gradienten der Dichte oder Temperatur auch ausreichend hohe Gesteinsdurchlässigkeiten voraus, Randbedingungen die das Auftreten freier Konvektion in der Vorerzgebirgssenke stark einschränken werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass topographisch induzierter Grundwasserfluss im Bereich der Vorerzgebirgssenke bzw. dem unterlagernden Grundgebirge in großen Tiefen deshalb häufig direkt in Druck-induzierten Grundwasserfluss übergeht.

Feldbeobachtungen wie Aufschlüsse höher mineralisierter Wässer und der Nachweis höher durchlässiger und tektonisch beanspruchter Bereiche in der Vorerzgebirgssenke, lassen jedoch die Ausbildung freier Konvektion, z.B. bei starkem Schichteinfallen in einigen Störungsbereichen möglich erscheinen. Hier sollte auch das Konzept der „Environmental hydraulic heads“ bei der Ermittlung von Fließrichtung und Intensität berücksichtigt werden.

Die Studie bestätigt die große Bedeutung dispersiven Grundwasserflusses in den tiefen und feinklastischen (gering durchlässigen) Schichtenfolgen. Dort kann Dispersion den dominanten Grundwassermischungsprozess darstellen, auch in der Vorerzgebirgssenke.

Diagenetische Prozesse

In der Vorerzgebirgssenke ist mit einer Vielzahl diagenetischer Prozesse zu rechnen. Zu den in Bezug auf das Grundwasser dominierenden Vorgängen gehören sicherlich Mischungen von Wässern, Lösungs- und Fällungsvorgänge sowie Wasserfreisetzungen durch Dehydrierung. In Abgleich mit Entwicklungen in anderen Senkenstrukturen kann in der Regel von einer Reduzierung der Durchlässigkeit der Schichtenfolgen durch Diageneseprozesse ausgegangen werden.

Untersuchungsmethoden

Für die Untersuchung von Grundwässern in sedimentären Senken stehen eine Reihe geeigneter Verfahren und Indikatoren, z.B. zur Ermittlung von Herkunft, Migrationsweg, Alter, Bildungsbedingungen, Entwicklung und Wechselwirkungen mit anderen Wässern zur Verfügung. Sie wurden in vielen sedimentären Senkenstrukturen weltweit erprobt. Dazu gehören klassische chemische Analysen und Auswertungsverfahren von Inhaltsstoffen (einschließlich Gase) aber auch die Bestimmung stabiler und radioaktiver Isotopen. Leider liegen solche Daten für den Bereich der Vorerzgebirgssenke, insbesondere für tiefere Grundwässer, nur in sehr geringem Umfang vor. Weitere Untersuchungen sind stark zu empfehlen.

4.2 Hydrogeologischer Bau und Hydrodynamik in der Vorerzgebirgssenke

4.2.1 Hydrogeologische Charakteristik und hydrogeologischer Bau

Die hydrogeologischen Verhältnisse im Vorerzgebirgssenkenraum zeichnen sich durch eine hohe Komplexität von Eigenschaften der beteiligten hydrogeologischen Einheiten und Strukturen und der sie koppelnden hydraulischen Mechanismen aus. Dazu gehören (vgl. Abschnitt 3.4):

- der überwiegend Grundwasser geringleitende bis hemmende paläozoische bis präkambrische Kluftgrundwasserleiter des Grundgebirges, welcher die VES umgibt/unterlagert
- die permokarbonische Senkenfüllung aus grundwasserleitenden bis hemmenden Sedimentgesteinen und – eingeschränkt – Vulkaniten. Sie bildet einen Kluftgrundwasserleiter, weist aber, insbesondere in einigen hangenden Horizonten, auch Doppelporositätseigenschaften auf
- Zechstein und Trias im Nordwesten des Gebietes in Richtung Pforte von Meerane
- das nur lückenhaft verbreitete, nur für das oberflächennahe lokale hydrogeologische Regime bedeutsame sedimentäre känozoische Deckgebirge, anthropogene Ablagerungen sowie die durch Verwitterungsprozesse beeinflusste oberflächennahe Auflockerungszone.
- eine alle prätertiären Folgen überprägende zeitlich, räumlich und in ihrer Intensität gestaffelte Tektonik, die zu Erosion, Schichtverlagerung und zur intensiven Störung des Gesteinsverbandes führte. Die resultierenden Hauptstörungsrichtungen verlaufen um NW-SE (herzynisch) und SW-NE (erzgebirgisch) (Abschnitte 3.3 und 4.3).

Eine Analyse der hydrogeologischen Verhältnisse in der Vorerzgebirgssenke erfordert die Beantwortung von vier wesentlichen Fragestellungen.

Erstens, wie können die hydrogeologischen Einheiten in der VES und ihrer unmittelbaren Umgebung charakterisiert und zu größeräumigen Einheiten zusammengefasst werden?

Zweitens, welchen hydraulischen Bezug haben die einzelnen hydrogeologischen Einheiten untereinander, insbesondere mit Blick auf den regionalen Maßstab?

Drittens, welche Aussagen in Bezug auf die Ausbildung von Grundwasserstockwerken können abgeleitet werden?

Und viertens, welche Auswirkungen hat dies auf die Ausbildung und den Maßstab von Grundwasserfließsystemen in der Vorerzgebirgssenke?

Hydrogeologische Charakteristik der geologischen Einheiten

Zur hydrogeologischen Beschreibung der hydrogeologischen Einheiten im Bereich der VES liegen eine Vielzahl von Untersuchungsergebnissen und Daten vor, die in Bezug auf Anzahl, Verteilung, Art der Erfassung Herkunft, Qualität, Verlässlichkeit und Maßstab stark variieren. Es erfolgte eine Auswertung hydrogeologischer Merkmale und Parameter der hydrogeologischen Eigenschaften auf Grundlage verschiedener Literatur und der aus den Informationssystemen der Landesämter entwickelten Aufschlussesdatenbanken unterschiedlichen Maß-

stabes in tabellarischer Form. Wichtige Quellen waren neben hydrogeologischen Übersichtsgutachten und Berichten der Kreise (VEB HYDRO 1972-1982, Beier et al. 1986 u.a.) des Hydrogeologischen Kartenwerkes (ZGI 1984) und der neuen landesamtlichen Kartierungswerke (HÜBSCHMANN 2006, HYK50 2006, HÜK200 2006) auch Dokumentationen aus dem Steinkohlenbergbau in Zwickau und Oelsnitz (BSA 1981, 1974, BLÜHER 1956, 1968 u.a.) und der WISMUT (G.E.O.S. 1996, HOFMANN et al. 1998, MÜLLER 1994, PAUL et al. 1998a, T&P 1995 u.a.). Darüber hinaus gingen Daten zahlreicher weiterer Quellen, insbesondere zu lokalen Maßnahmen und Tests, z.B. im Rahmen der sogenannten „Komplexuntersuchung“ (BRAUSE 1999) in die Auswertung ein. Die Ergebnisse sind in Anlage 3 tabellarisch dargestellt.

Die Auswertungen bildeten eine Grundlage für die Ableitungen von repräsentativen Parametern für die hydrogeologischen Einheiten (Tabelle 10 und Tabelle 11), die Bearbeitung der übrigen Schwerpunktthemen (Abschnitte 4.3 bis 4.7) und die Parametrisierung des hydraulischen Modells (Abschnitt 4.9.4.1, Tabelle 43). Sie dienten weiterhin als Referenz für die lokale Anpassung von hydraulischen Parametern im numerischen Modell während der Kalibrierung (Abschnitt 4.9.5).

Gruppengliederung

Die hydrogeologischen Übersichtsgutachten der Kreise (VEB HYDRO 1972-1982) verwendeten eine Gliederung von Gesteinen nach Gruppen entsprechend ihrer Klüftungsanfälligkeit und daraus resultierend ihrer Grundwasserführung. Diese Gliederung ist für eine hydrogeologische Charakterisierung in angepasster Form nach wie vor sinnvoll. Notwendigerweise stellt sie eine starke Verallgemeinerung dar und bietet sich deshalb eher für großräumige Betrachtungen an. Im Lokalmaßstab ist sie aufgrund der räumlich starken Schwankungen in der lithologischen und strukturellen Ausprägung der einzelnen Einheiten meist nicht geeignet. Das gilt insbesondere für tektonisch stärker beanspruchte oberflächennahe Bereiche (Auflockerungszone) sowie für Bereiche grobklastischer Einschaltungen.

Tabelle 10 Grundwasserführung in der Vorerzgebirgssenke, Gruppengliederung

(nach VEB HYDRO 1972-1982, zusammengefasst, ergänzt und verändert)

Kluftgrundwasser; z.T. Auftreten von Doppelporosität		
<i>klüftungsfreundliche Gesteine</i>		
Gruppe	Beschreibung	Transmissivitäten [m²/s] ^{*)}
Gruppe 1	<u>Konglomerate, Sand- und Schluffsteine (-Zwischenlagen), Dolomite</u> ▪ vor allem Gera-/ Mülsen-Folge, kontinentaler und mariner Zechstein, Trias ▪ Zeisigwaldtuff im Raum Zeisigwald bei Chemnitz	10 ⁻² bis 10 ⁻⁵
Gruppe 2	<u>Gesteine mit guter Grundwasserführung im Bereich von Störungs- u. Kluftzonen</u> ▪ ein Großteil der permokarbonen Sedimente im Ostteil der VES (nicht jedoch die vorwiegend pelitisch ausgebildeten Abfolgen) ▪ ein Teil des Grundgebirges im östlichen und mittleren Teil der VES (Quarzite, Quarzitschiefer, Kiesel- und Alaunschiefer, Diabase) ▪ Quarzporphyre und Melaphyre der Zwickau Schichten/ Planitz-Folge ▪ Zeisigwaldtuff außerhalb des Zeisigwaldes ▪ z.T. Gneisglimmerschiefer und Glimmerschiefer des Granulitgebirgsmantels ▪ Auflockerungs- und Zerrüttungszone der meisten permokarbonen Einheiten	10 ⁻³ bis 10 ⁻⁵

Kluftgrundwasser; z.T. Auftreten von Doppelporosität		
<i>klüftungsfreundliche Gesteine</i>		
Gruppe	Beschreibung	Transmissivitäten [m²/s]^{*)}
<i>z.T. klüftungsfreundliche Gesteine</i>		
Gruppe 3a	<u>Kompakte kristalline Gesteine des Vorerzgebirgssenkensrandes und des Untergrundes mit nur lokal und oberflächlich guter Wasserwegsamkeit</u> - im östlichen Teil der VES - entlang von Störungs- und Kluftzonen auch tieferreichende Grundwasser-Zirkulationen möglich - Granulite, Granite, z.T. Glimmerschiefer	10 ⁻⁵ bis 10 ⁻⁶
Gruppe 3	<u>Gesteine, wie in Gruppe 2, jedoch mit verstärkt tonig-schluffigem Anteil</u> Teile der Härtensdorf-Folge: Konglomerat-Sandstein-Schluffstein-Tonstein Wechsellagerung	um 10 ⁻⁶
<i>wenig klüftungsfreundliche Gesteine</i>		
Gruppe 4	<u>Geringe (1) bis fehlende (2) Grundwasserführung</u> (1) in der Verwitterungs- und Auflockerungszone (2) insbesondere in den pelitischen Abschnitten der Leukersdorf-Folge (u.a.) - Grundgebirge: Tonschiefer, Phyllite	10 ⁻⁶ bis 10 ⁻⁸
Porengrundwasser		
Gruppe 5	<u>Mittlere bis gute Grundwasserführung in den sandig konglomeratischen Lagen (1); geringe bis keine Grundwasserführung bei pelitischer Ausbildung (2)</u> (1) Quartäre Tal- Hang- und Terrassenschotter/-sande; Schmelzwassersande; Tertiäre Sande und Kiese (2) Quartäre Aue- und Hanglehme; Lößlehm; Tertiäre Lehme und Schluffe; anthropogene Ablagerungen	(1) 5*10 ⁻³ bis 10 ⁻⁴ (2) ≤ 10 ⁻⁵

^{*)} diese Angaben verstehen sich als Orientierungswerte; in Störungsbereichen sind Transmissivitäten deutlich oberhalb der genannten Werten möglich

Dort können z.B. auch wenig klüftungsfreundliche Gesteine (z.B. Pelite der Leukersdorf-Folge in Gruppe 4) hohe hydraulische Leitfähigkeiten aufweisen (vgl. Anlage 3 und Abschnitt 4.2.4). Um den gesamten Vorerzgebirgssenkensraum einzubeziehen, wurde die bisherige Gliederung entsprechend angepasst und die Gruppen 3a und 5 hinzugefügt (Tabelle 10).

Grundwasserstockwerksbau

Auf Grundlage dieser Gruppengliederung der Grundwasserführung von Gesteinseinheiten und der Interpretation der hydrogeologisch-hydraulischen Verhältnisse in den Teilgebieten der VES (Abschnitt 4.2.4) können für den Bereich der VES hydrogeologische Einheiten definiert werden. Diese Einheiten können dabei sowohl lediglich einen Teil einer Schichtenfolge repräsentieren als auch aus mehreren Schichten oder geologischen Einheiten zusammengefasst werden. Entscheidend war eine im Modellraummaßstab ähnliche hydrogeologische Charakteristik, welche die Zuordnung gemeinsamer hydraulischer Parameter rechtfertigte.

Die hydrogeologischen Einheiten mit zugeordneten hydraulischen „Leitparametern“ zeigt Tabelle 11. Im Bereich der permokarbonen Senkenfüllung und des känozoischen Deckgebirges entsprechen die hydrogeologischen Einheiten im wesentlichen stratigraphischen Horizonten, bilden also hydrostratigraphische Einheiten. Dennoch können einige stratigraphischen Einheiten mit wechselnden lithologischen Eigenschaften in weitere hydrogeologische Einheiten untergliedert werden. Dies betrifft z.B. die basalen gröberklastischen Bereiche der Leukersdorf- und Härtensdorf-Folge (Tabelle 11).

Tabelle 11 Hydrogeologische Einheiten und Modellvorstellung des Aufbaus der Grundwasserstockwerke (GWS) in der Vorerzgebirgssenke

Stockwerks- gliederung ¹⁾ GWL	Grundwasserleiter		Grundwassergeringleiter/hemmer Transmissivität T [m ² /s] ²⁾
	Hydrogeologische Einheiten in stratigraphischer Reihenfolge	Transmissivi- tät T [m ² /s] ²⁾	
Gruppe der hangenden GWS	Quartär Holozäne und pleistozäne Schotter und Sande pleistozäne Schmelzwassersande	>10 ⁻³ bis 10 ⁻⁵ (bei vorwieg. grobklast. Ausbildung)	Auelehme, meist als hangende quartäre Schicht Lößlehmdecke um 10 ⁻⁷
	Tertiär Sande (z.B. hangend. und liegender GWL im Raum Helmsdorf)	10 ⁻⁴ bis 10 ⁻⁵	durch Geringleiter lokal in mehrere GWS unterteilt (z.B. Anatastuf im Raum Helmsdorf)
	Auflockerungszone pemokarboner Folgen und des Grundgebirges	10 ⁻² bis 10 ⁻⁵	bei lehmiger Ausbildung GWGL 10 ⁻⁶ bis < 10 ⁻¹⁰
Gruppe der mittleren GWS	Mariner Zechstein, Trias (Pforte v. Meerane)	10 ⁻³ bis 10 ⁻⁴	
	Gera-/Mülsen-Folge/kont. Zechstein aufgelockerte hangende und psammi- tisch-psephitische liegende Folgen (oft über ganze Mächtigkeit GWL)	10 ⁻³ bis 10 ⁻⁵	lokal durch zwischengelagerte geringlei- tende pelitische Folgen in mehrere GWS untergliedert um 10 ⁻⁶
Gruppe der liegenden GWS	Leukersdorf-Folge aufgelockerte hangende Bereiche unregelm. grobklast. Einschaltungen Zeisigwaldtuff basale psammit.-psephitische Folgen	10 ⁻⁴ bis 10 ⁻⁵ um 10 ⁻⁵ 10 ⁻³ bis 10 ⁻⁵ um 10 ⁻⁵	Geringleiter vorherrschend, pelitisch bzw. pelitisches Bindemittel; Gruppe in mehre- re GWS untergliedernd 10 ⁻⁶ bis 10 ⁻⁸
	Planitz-Folge Ausstrichbereiche Tuffhorizonte unregelm. grobklast. Einschaltungen	10 ⁻³ bis 10 ⁻⁵ um 10 ⁻⁴ um 10 ⁻⁵	Geringleiter - insbes. im W der VES- deutlich vorherrschend, pelitisch bzw. pe- litisches Bindemittel; Gruppe lokal in meh- rere GWS untergliedernd 10 ⁻⁶ bis 10 ⁻⁸
	Härtensdorf-Folge Ausstrichbereiche basale Konglomerate (insbesondere im E der VES)	10 ⁻³ bis 10 ⁻⁵ um 10 ⁻⁴	Geringleiter - insbesondere im E der VES – vorherrschend; Gruppe lokal in mehrere GWS untergliedernd 10 ⁻⁶ bis 10 ⁻⁷
	Westfal Ausstrichbereiche	10 ⁻⁴ bis 10 ⁻⁵	Geringleiter deutlich vorherrschend 10 ⁻⁶ bis 10 ⁻⁹
	Hainichen Schichten	10 ⁻³ bis 10 ⁻⁴	meist ohne Hemmer/Geringleiter
	Flöha Schichten	10 ⁻³ bis 10 ⁻⁴	meist ohne Hemmer/Geringleiter
	Altpaläozoikum/Präkambrium des d. VES umgebenden Grundgebirges ⁴⁾ ; z.T. Kluftgrundwasserleiter	10 ⁻³ bis 10 ⁻⁵	zahlreiche Gesteinsformationen mit GWGL-Charakter (vgl. Abschnitt 3.2) und Tabelle 10)

Anmerkungen: ¹⁾ Modellvorstellung! Die Ausbildung der genannten GWS/GWS-Gruppen ist abhängig von der geologischen Verbreitung der Schichtenfolgen. Fehlen hangende Folgen (z.B. Quartär, Tertiär) fungieren liegende Einheiten als das entsprechend höhere GWS/GWS-Gruppe. So bilden in den Ausstrichbereichen des unteren Rotliegenden dessen hangende GWL das höchste GWS; vgl. auch Anmerkungen im Text ²⁾ Diese Angaben verstehen sich als Orientierungswerte; in Störungsbereichen sind erhöhte Transmissivitäten deutlich über den genannten Werten möglich ⁴⁾ Quarzite, Quarzitschiefer, Kieselschiefer, Granite (jüngerer Intrusivkomplex und Vergesungszonen), Rhyolite, (Grauwacken)

Für die Modellvorstellung vom großräumigem, regionalem Grundwasserfluss ist die Abgrenzung von Grundwasserstockwerken (GWS) notwendig. Hydrogeologische Einheiten können zu Grundwasserstockwerken zusammengefasst werden, wenn sie in enger hydraulischer

scher Verbindung miteinander stehen. Zwei Grundwasserstockwerke werden durch grundwasserhemmende Schichten voneinander getrennt. Verschiedene Grundwasserstockwerke zeichnen sich i.d.R. durch unterschiedliche hydrogeologisch/hydraulische Merkmale aus (nach HÖLTING 1992 u.a.). Eine Modellvorstellung der generellen Grundwasserstockwerksgliederung im Bereich der Vorerzgebirgssenke zeigt Tabelle 11.

Dennoch können lokal weitere Grundwasserstockwerke auftreten oder mehrere Stockwerke zu einem einzigen zusammengefasst werden. So sind durch Einschaltungen von geringleitenden oder hemmenden Horizonten innerhalb einer hydrogeologischen Einheit gelegentlich mehrere Grundwasserstockwerke ausgebildet (deshalb auch die Bezeichnung GWS-Gruppen in Tabelle 11), so z.B. innerhalb des Tertiärs im Raum Helmsdorf oder der Gera-/ Mülsen-Folge im zentralen Bereich der VES (vgl. Abschnitt 4.2.4). Gleichmaßen kann lokal eine hydraulische Kopplung verschiedener Grundwasserstockwerke auftreten, z.B. bei einer Verbindung zwischen rotliegenden GWL und den hangenden tertiären oder quartären GWL in Bereichen fehlender hemmender rotliegender Deckschichten oder wenn der Hemmer durch tektonische Beanspruchung lokal grundwasserleitende Eigenschaften annimmt. Dann bilden diese GWL ein gemeinsames GWS. Insbesondere aber können Störungszonen, vorzugsweise herzynischer (NW-SE) und erzgebirgischer (SW-NE) Orientierung für hydraulische Kurzschlüsse zwischen Grundwasserstockwerken sorgen. Sie stellen häufig tiefreichende Grundwasserbewegungsbahnen dar (Abschnitte 3.3 und 4.3) wie auch die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung belegen (Abschnitt 4.9.7).

4.2.2 Hydrodynamik

Auf Grundlage der Recherche, Auswertung und Interpretation hydrogeologischer Informationen für den weiteren Vorerzgebirgssenkenraum (Abschnitte 4.2 bis 4.6) sowie durch den Vergleich mit Senkenstrukturen weltweit (Abschnitt 4.1) wurde eine Modellvorstellung der Grundwasserdynamik für den Bereich der Vorerzgebirgssenke entwickelt. Diese Modellvorstellung war eine Grundlage der numerischen Modellierung und wurde gleichzeitig durch deren Ergebnisse rückwirkend angepasst.

Aus hydraulischer Sicht kann von verschiedenen teilweise sehr differenzierten Grundwasserfließsystemen (hydrodynamischen Systemen) ausgegangen werden, die mehr oder minder in Wechselwirkungen miteinander stehen. Ein Grundwasserfließsystem im hier diskutierten Sinne, grenzt sich durch einen deutlichen Durchlässigkeitskontrast und/oder räumlich verschiedene Verbreitungen (unterschiedliche Neubildungs- und/oder Entlastungsgebiete) von anderen Systemen ab. Dabei ist die Höhe der Durchlässigkeit der hydrogeologischen Einheiten eines Grundwasserfließsystems für die Definition von untergeordneter Bedeutung. Ein Grundwasserfließsystem beschreibt in der vorliegenden Arbeit also z.B. die hydrodynamischen Verhältnisse innerhalb eines Grundwasserstockwerkes, wobei jedoch kleinräumige, lokal begrenzte Stockwerksgliederungen oder Schichtenwässer nicht berücksichtigt werden. Dies ist wichtig, da z.B. die umfangreichen Untersuchungen des Untergrundes im Raum Zwickau (BRAUSE 1999, GUB 2001, HGC 2002, GUB (2003), LFUG 2006, Abschnitt 4.2.4.1 u.a.) anhand vieler Einzelbeispiele den engräumigen Wechsel der hydraulischen Verhältnisse, insbesondere im oberflächennahen Bereich, belegen (Abschnitte 4.2.1 und 4.2.4).

Dies wird z.B. bedingt durch:

- die hydraulische Verbindung zwischen Quartär und oberstem Rotliegenden (i.d.R. Leukersdorf-Folge) (vorhanden/nicht vorhanden)
- und im Zusammenhang damit die „Abdichtungsfunktion“ der rotliegenden Verwitterungszone
- die Intensität der tektonischen Überprägung des Rotliegenden (Klüftung, Störungen vorhanden oder nicht)
- die Wasserführung auf den tektonischen Elementen (hydraulisch aktiv/ nicht aktiv)
- die Verbindung der hydraulisch aktiven Bereiche untereinander (vorhanden/nicht vorhanden)

Für die Abgrenzung zweier Grundwasserfließsysteme voneinander ist andererseits keine strikte hydraulische Trennung notwendig, wenn andere Unterscheidungskriterien erfüllt sind (z.B. unterschiedliche Reichweiten).

Prinzipiell kann zwischen oberflächennahen und tiefen Grundwasserfließsystemen unterschieden werden.

Oberflächennahe Grundwasserfließsysteme

Bei den oberflächennahen Grundwasserfließsystemen handelt es sich um vorwiegend Topographie-induzierte Grundwasserbewegungen (vgl. Abschnitt 4.1.3). Sie zeichnen sich darüber hinaus durch den lokalen bis intermediären Maßstab ihres räumlichen Wirkungsbereiches aus. Die Ausbildung nur eines oder aber mehrerer paralleler - lokaler und intermediärer - Grundwasserfließsysteme variiert räumlich und ist abhängig vom Auftreten und den hydraulischen Eigenschaften der Gesteinsfolgen bzw. vorhandener Störungs- oder Klüftzonen (vgl. Abschnitte 4.2 und 4.3).

Lokale Grundwasserfließsysteme in der VES zeichnen sich durch geringe Teufen (Bereich des obersten Grundwasserstockwerkes) und kurze Reichweiten von oft nur einigen hundert Metern bis zu wenigen Kilometern aus. Sie entlasten in Vorfluter vierter (kleinere Bäche und Gründe), dritter (größere Bäche, z.B. Mülsenbach) und zweiter (Flüsse, z.B. Zwickauer Mulde) Ordnung.

Intermediäre oder sub-regionale Grundwasserfließsysteme in der VES erreichen mittlere Teufen von einigen zehner Metern bis zu mehr als hundert Meter im Bereich der Gera-/Mülsen-Folge. Sie erfassen damit auch tiefere Grundwasserstockwerke. Ihre Reichweiten betragen vermutlich einige Kilometer bis mehrere zehner Kilometer. Intermediäre Grundwasserfließsysteme entlasten in der VES zumeist in Vorfluter zweiter (Zwickauer Mulde, Pleiße, Zschopau), untergeordnet auch dritter Ordnung (Zwönitz, Mülsenbach).

Das hydraulische Modell (Abschnitt 4.9) belegt das Vorherrschen lokaler und intermediärer Grundwasserfließsysteme im weiteren Vorerzgebirgssenkenraum.

Die Wirkungsbereiche oberflächennaher Grundwasserfließsysteme vom Hangenden zum Liegenden zeigt Tabelle 12. Die Einordnung oberflächennaher Grundwasserfließsysteme in den Kontext hydrodynamischer Prozesse in der Vorerzgebirgssenke zeigt in schematischer Form Abbildung 10.

Tabelle 12 Wirkungsbereiche oberflächennaher Grundwasserfließsysteme

Wirkungsbereich	Verbreitung	Typ	Bemerkungen
Quartäre GWL	begrenzt; nur in einigen Tälern	lokal	i.d.R. separates Grundwasserfließsystem; z.T. zusammen mit Auflockerungszone; z.T. Anbindung an Störungsbereiche vermutet (z.B. Raum Zwickau);
Tertiäre GWL	begrenzt; auf Hochflächen	lokal	id.R. separates Grundwasserfließsystem oder mit Anbindung an Auflockerungszone; kann lokal 2 separate Grundwasserfließsysteme unterschiedlicher Reichweite ausbilden
oberflächennahe Auflockerungszone	flächendeckend	lokal	umfaßt alle permokarbonen Folgen und das umgebende anstehende Grundgebirge; mit hangenden känozoischen Folgen z.T. in gemeinsames Fließsystem eingebunden
Gera-/Mülsen-Folge¹⁾	westliche und mittlere Vorerzgebirgssenke	lokal und/oder intermediär	z.T. über gesamte Mächtigkeit/große Tiefenwirkung in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit und dem Auftreten von hemmenden Lagen
Leukersdorf-Folge¹⁾	begrenzt; nur obere Bereiche ausserhalb Verbreitung Mls-Folge	lokal und/oder intermediär	nur lokal obere Bereiche wenn diese entsprechend hydraulisch durchlässig sind und durch hangende Folgen nicht weiträumig „abgedichtet“ werden
Planitz- und Härtensdorf-Folge¹⁾	begrenzt; nur obere Bereiche ausserhalb Verbreitung Lkf-Folge	lokal und/oder intermediär	nur lokal obere Bereiche wenn diese entsprechend hydraulisch durchlässig sind und durch hangende Folgen nicht weiträumig „abgedichtet“ werden
Zwickau Schichten	zentrale u. westl. VES	-	i.d.R. hemmend oder geringleitend; kaum erschlossen
Flöha-, und Hainichen Schichten¹⁾	begrenzt; im äußersten Osten der VES	lokal und/oder intermediär	Randlage im Untersuchungsbereich; im Becken von Hainichen können die tieferen Schichtbereiche mglw. auch in regionale Grundwasserfließsysteme eingebunden sein
Kluftzonen und Störungen/ Störungsbereiche	begrenzt; nur oberflächennahe Bereiche; insbesondere im westl. und mittl. Teil der VES	lokal und/oder intermediär	können bei hohem Transmissivitätskontrast zum Nebengestein als eigenständige Grundwasserfließsysteme wirken; sie verbinden häufig GWL bzw. Grundwasserstockwerke miteinander und schaffen so Verbindungen zwischen Grundwasserfließsystemen

¹⁾ unterhalb Auflockerungszone

Tiefe Grundwasserfließsysteme

Tiefe Grundwasserfließsysteme beschreiben die Grundwasserdynamik im Liegenden intermediärer Grundwasserfließsysteme (vgl. oben). Grundwasser-, oder besser Fluidabewegungen im Untergrund, sind durch Studien an Senkenstrukturen weltweit bis in viele Kilometer Tiefe nachgewiesen (Abschnitt 4.1). Allerdings ist gleichermaßen belegt, dass die Fließgeschwindigkeiten mit zunehmender Tiefe stark abnehmen (u.a. WILSON et al. 1999, DOWNING et al. 1987) und i.d.R. schon in 1000 bis 2000m Teufe, häufig sogar eher, kein quantitativ relevanter Grundwasserfluss mehr stattfindet. Im Kontext geologischer Zeiträume kann aber auch ein solcher sehr langsamer Grundwasserfluss mit begleitenden diffusiven Prozessen für die hydraulischen und hydrochemischen Verhältnisse von Bedeutung sein (Abschnitte 4.1 und 4.6).

Von dieser Tendenz muss auch für die Grundwasserdynamik in tieferen Schichten des Vorerzgebirgssenkensraumes ausgegangen werden. Die Auswertung des numerischen Modells unterstützt diese Annahmen (Abschnitt 4.9). Direkte Kenntnisse zum Auftreten und zur Beschaffenheit tiefer Wässer in der VES beschränken sich auf Erkenntnisse aus Tiefbrunnen (z.B. bei St. Egidien, Frauenreuth) oder Neubohrungen (Zwickau-Schedewitz, Oelsnitz,

Crossen) und die zahlreichen meist jedoch nur ungenügend dokumentierten Austritte von Wässern in den Steinkohlengruben von Zwickau (z.B. Bereiche Friedrich-Nikolai Schacht I und Martin Hoop-Schächte) und Lugau/Oelsnitz (Teutonia Schacht AII, Werk Deutschland II) (Abschnitt 4.2.4, 4.5 und 4.6).

Es kann davon ausgegangen werden, dass das Grundgebirge im Liegenden der tieferen Bereiche der Vorerzgebirgssenke generell eine nur geringe Grundwasserführung aufweist (BLÜHER 1960 u.a. und Abschnitt 4.2.1) und diese nach der Teufe weiterhin stark abnimmt. Der Betrachtungsbereich möglicher tiefer Grundwasserfließsysteme in der VES soll sich deshalb auf regionale Fließsysteme mit Teufen bis maximal 2000 m beschränken. Dies ist auch für die Diskussion des Transports tiefer Grundwässer entlang von Störungszonen, wie z.B. in der von SCHRÄBER (1968) und STORCH ET AL. (1996) favorisierten Theorie eines Zustroms höher mineralisierter Wässer aus dem Thüringer Becken über die Pforte von Meerane in die Vorerzgebirgssenke, ausreichend (Abschnitt 4.6).

Für die tieferen Bereiche der Vorerzgebirgssenke, muss in Bezug auf regionale Grundwasserströme zumindest lokal auch der Einfluss Dichte-induzierten Grundwasserflusses (freie Konvektion) in die Diskussion einbezogen werden. In einigen vergleichbaren Senkenstrukturen weltweit konnte bereits in Teufen von rund 500m eine Dominanz Dichte-induzierten Grundwasserflusses gegenüber dem Topographie-kontrolliertem Grundwasserregime nachgewiesen werden, in anderen Senken ist dies erst in Teufen ab 2000m der Fall. Allerdings ist freie Konvektion an bestimmte Voraussetzungen in Bezug auf Gesteinsdurchlässigkeiten, Temperatur und Salinität des Grundwassers gebunden, die in der Praxis für komplexe Systeme kaum überprüfbar sind (Abschnitt 4.1).

Letztlich sind Konzentrations-induzierte Fluidabewegungen in sehr gering durchlässigen Bereichen des Permokarbons im Zusammenhang mit dem Auftreten höher mineralisierter Wässer und feinklastischer Gesteine (Tonsteine) denkbar (Abschnitt 4.1).

Die Reichweiten regionaler Fließsysteme betragen vermutlich einige zehner bis über hundert Kilometer. Aufgrund der mit der Teufe stark abnehmenden Durchlässigkeiten der Gesteine sind regionale Fließsysteme i.d.R. an große Störungs- und/oder Kluftzonen gebunden, die auch in größeren Teufen und über große Entfernungen Wasserwegsamkeiten aufweisen (Abschnitt 4.3). Sie sind damit auch für einen möglichen Grundwasserfluss aus bzw. in die Vorerzgebirgssenke von Bedeutung und können zu einer Erweiterung bzw. Einschränkung von unterirdischen Einzugsgebieten führen. Aufgrund der im allgemeinen sehr geringen Fließgeschwindigkeiten (siehe unten) ist ein Nachweis über Grundwasserbilanzierungen jedoch schwierig. Regionale Grundwasserfließsysteme können im Vorerzgebirgssenkenraum in die Vorfluter zweiter Ordnung wie Zwickauer Mulde, Pleiße oder Zschopau entlasten. Direkt nachweisbar ist dies für die VES nicht. Allerdings konnten mit dem hydraulischen Modell neben lokalen und intermediären auch regionale Grundwasserfließpfade vom südlichen Senkenrand bis in den Bereich der Lungwitztalzone berechnet werden (Abschnitt 4.9.7). In der Literatur wird ein solches Szenario für den Bereich der Zwickauer Mulde diskutiert (Abschnitte 4.3 und 4.6). Möglich ist prinzipiell auch eine „Durchströmung“ bzw. „Unterströmung“ der Vorerzgebirgssenke ohne wesentliche Speisung oder Entlastung des entsprechenden regionalen Grundwasserfließsystem. Wasseraustritte auf Störungen in tiefen Grubenbauen der Zwickauer und Lugau/Oelsnitzer Steinkohlenreviere könnten Anschnitte solcher Fließsysteme darstellen. Dies konnte durch Berechnungen mit dem hydraulischen Modell je-

doch nicht belegt werden.

In aller Regel ist bei tiefen regionalen und auch intermediären Grundwasserfließsystemen von geringen bis sehr geringen Fließgeschwindigkeiten und entsprechend langen Verweilzeiten auszugehen. Dafür sprechen z.B. Altersbestimmungen von Wässern auf Klüften bzw. Störungen im Zwickauer Raum, die „Anschnitte“ solcher Systeme repräsentieren könnten (Abschnitt 4.2.4.1). Altersbestimmungen an Grund- und Mischwässern in Oelsnitz (FELIX et al. 2006) bestätigen dies. Es kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass Teilbereiche regionaler Grundwasserfließsysteme zeitweise stagnieren und durch Änderungen des umgebenden Druckregimes, z.B. aufgrund langjähriger Niederschlagsschwankungen aber auch durch anthropogene Einwirkungen wie der Steinkohlenbergbau in der Vorerzgebirgssenne (Druckentlastung), wieder aktiviert werden können. Solche Quasi-Stagnationsbereiche werden durch die Berechnungen der hydraulischen Modellierung belegt.

Die Wirkungsbereiche tiefer, regionaler Grundwasserfließsysteme vom Hangenden zum Liegenden zeigt Tabelle 13.

Tabelle 13 Wirkungsbereiche tiefer, regionaler Grundwasserfließsysteme

Wirkungsbereich	Verbreitung	Bemerkungen
Gera-/Mülsen-Folge; Zechstein und Trias	westlicher/ nordwestlicher und zentraler Vorerzge- birgssenenraum	nur in den tiefsten Bereichen möglich wenn diese durch hemmende Lagen vom hangenden Grundwasserstockwer- ken abgegrenzt sind
Leukersdorf- Folge ¹⁾	weit verbreitet	nur tieferen Bereiche (im Bereich der Mls-Folge auch han- gende Bereiche) wenn diese im hangenden gegen interme- diäre Fließsysteme entsprechend hydraulisch abgedichtet sind
Planitz- und Härtens- dorf-Folge	begrenzt; nur obere Berei- che ausserhalb Verbrei- tung Lkf-Folge	in entsprechenden teufen wenn Schichten im hangenden gegen intermediäre Fließsysteme entsprechend hydraulisch abgedichtet sind
Zwickau Schichten	zentrale u. westl. VES	vermutl. – selbst in Störungsbereichen - kaum in Fließsys- teme eingebunden da i.d.R. hemmend oder geringleitend
Hainichen Schichten	im äußersten Osten der VES	Randlage im Untersuchungsbereich; die tieferen Schichtbe- reiche können mglw in regionale Grundwasserfließsysteme eingebunden sein
Grundgebirge	nördl. und südl. der VES; Senkenbasis	sehr geringe Fließgeschwindigkeiten, Durchlässigkeitskon- trast zu den permokarbonen Folgen der VES (N-S bis NE- SW Orientierung vermutet)
Kluftzonen und Stö- rungen/ Störungsbe- reiche	häufig, insbesondere im mittleren und westl. Teil der VES	bevorzugt herzynische (NW-SE) und erzgebirgische (SW- NE), untergeordnet N-S Richtungen; Hauptbewegungsbah- nen tiefer regionaler Grundwasserfließsysteme; Kommuni- kation mit den tieferen GWL

Die Einordnung regionaler Grundwasserfließsysteme in den Kontext hydrodynamischer Prozesse im Vorerzgebirgssenenraum sowie mögliche hydraulische Zusammenhänge zwischen den einzelnen Fließsystemen bzw. Grundwasserstockwerken über Kluft- und Störungszonen zeigt in schematischer Form Abbildung 10. Aus ihr wird auch deutlich wie regionale und intermediäre Grundwasserfließsysteme entfernte unterirdische Einzugsgebiete speisen oder zehren und damit die Gebietswasserbilanzen beeinflussen können. Solche Mechanismen werden in dieser Arbeit anhand realer größerer Einzugsgebiete diskutiert (Abschnitte 4.4 und 4.3.3). Die hydraulische Modellierung zeigt dabei den starken Einfluss der größeren Vorflu-

ter und störungsgebundenen Entlastungsbereiche auf die Grundwasserfließbahnen. Die allgemein hohen topographischen Gradienten im Modellraum verhindern zumeist die Ausbildung weitreichender regionaler Fließsysteme und bewirken eine Entlastung aus lokalen und intermediären Systemen in die Vorfluter (Abschnitt 4.9).

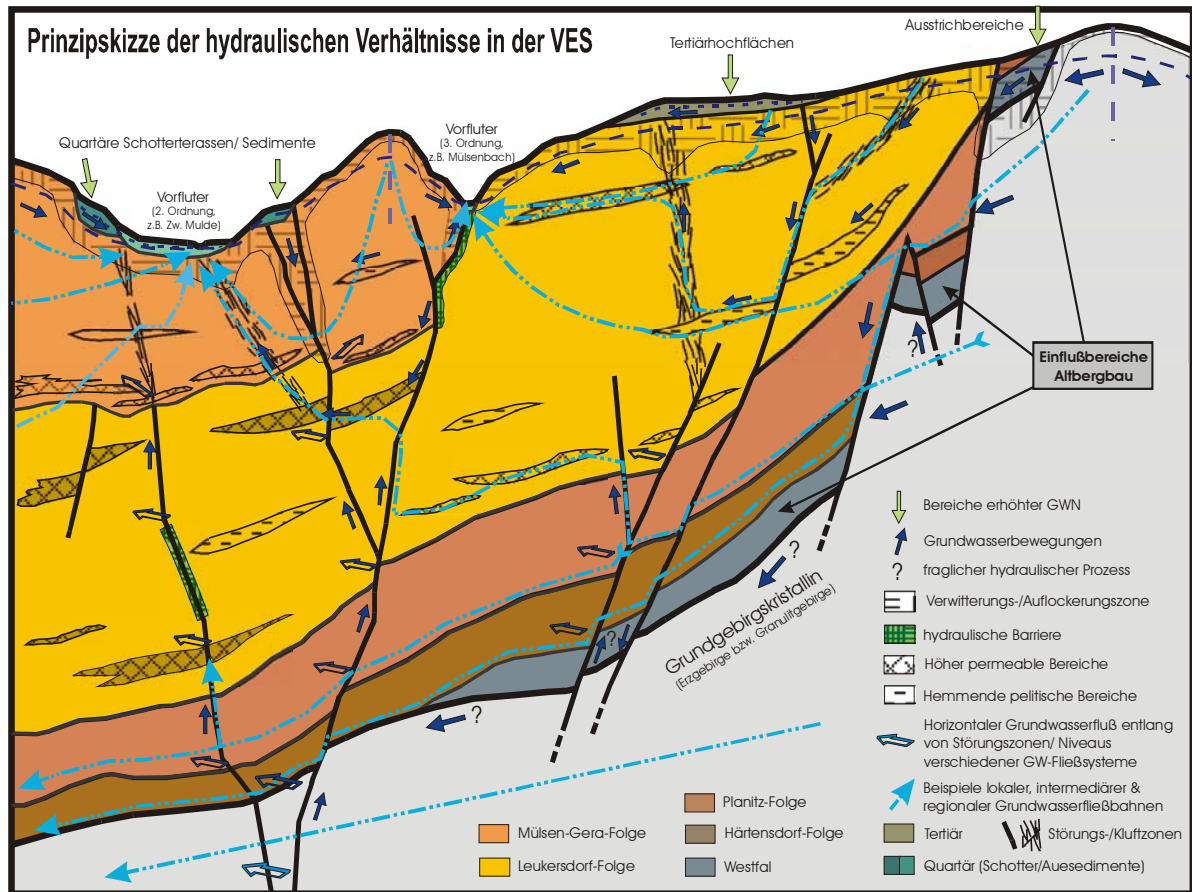


Abbildung 10 Prinzipskizze wichtiger hydrodynamischer Prozesse in der VES

Regionale und intermediäre Grundwasserfließsysteme sind zentrale Bestandteile der konzeptionellen hydrogeologischen Modellvorstellung u.a. als Grundlage der hydraulischen Modellierung (Abschnitt 4.7).

Zeitliche Entwicklungen hydrodynamischer (und hydrochemischer) Systeme

Die tektonischen (Abschnitt 3.3) und klimatischen Verhältnisse im Bereich der heutigen Vorerzgebirgssenke unterlagen seit der Anlage und Bildung der Senkenstruktur im Paläozoikum bis heute starken Schwankungen. So änderten sich die klimatischen und paläogeographischen Verhältnisse von niederschlagsarmen heißen Bedingungen im Perm, über Zeiten der Meeresbedeckung und niederschlagreichen subtropischen Klimas bis hin zu den alternierenden Kalt- und Warmzeiten des Quartärs, tektonische Regimes wechselten.

Diese Veränderungen der Randbedingungen der hydraulischen und hydrochemischen Systeme im Bereich der Vorerzgebirgssenke wirkten sich dabei zeitlich verzögert auf die Hydraulik und Chemie tieferer Grundwässer aus. Die Einstellung eines hydraulischen Gleichgewichtes auf vergangene hydraulische Szenarien/ Randbedingungen wird sich deshalb immer

mit inzwischen veränderten Randbedingungen überlagern.

In einer Reihe von der Vorerzgebirgssenke vergleichbaren Senkenstrukturen weltweit wurden umfangreiche Forschungsarbeiten zur Auswirkung sich verändernder hydraulischer Regimes durchgeführt (Abschnitt 4.1.3).

So lassen sich auch für den weiteren Vorerzgebirgssenkenraum Annahmen zur möglichen hydraulischen und hydrochemischen Entwicklung ableiten. Es kann wie erläutert davon ausgegangen werden, dass vergangene hydraulische Regimes und Grundwasserneubildungsszenarien insbesondere in den tiefen geringer durchlässigen Bereichen der Vorerzgebirgssenke nachwirken und die rezenten hydrogeologischen Verhältnisse mitbestimmen.

Aufgrund ihrer zeitlichen Nähe können die pleistozänen Vereisungen, die in ihren größten Ausdehnungen bis in den Vorerzgebirgsraum reichten (Abschnitt 4.6.2) für das rezente hydraulische Regime, insbesondere in Bezug auf die Verbreitung höher mineralisierte Grundwässer von Bedeutung sein. So könnte die Auflast der nördlichen vorgelagerten Inlandseismassen Grundwasserfluss in Richtung Vorerzgebirgssenke induziert haben. In diesem Zusammenhang sind möglicherweise auch höher mineralisierte thüringische Solen in den Vorerzgebirgssraum gelangt.

Die geringen aber differenzierten tektonischen Spannungen der jüngeren geologischen Entwicklung (Abschnitte 3.3 und 4.3.1) könnten dann die lokal oberflächennahe Positionierung dieser höher mineralisierten Wässer bewirkt haben. Direkte Nachweise für solche Annahmen liegen jedoch nicht vor.

4.2.3 Hydraulische Abgrenzung der Vorerzgebirgssenke vom Umland

Die oberkarbonen bis oberrotliegenden Schichtenfolgen der Vorerzgebirgssenke lagern mit deutlicher Diskordanz über altpaläozoischen bis präkambrischen Gesteinen, die sich in Bezug auf Alter, Lagerungsverhältnisse, Gesteinstyp, tektonische Beanspruchung und hydrogeologische Charakteristik deutlich von den jüngeren Vorerzgebirgsfolgen unterscheiden (Abschnitte 3 und 4.2.1). Es ist somit von einem starken hydraulischen Kontrast zwischen diesen grundlegend verschiedenen Gesteinskomplexen auszugehen. Die Kenntnis des hydraulischen Zusammenhanges zwischen den hydrogeologischen Einheiten VES und denen des umgebenden Grund- und Deckgebirges ist u.a. für Randbedingungs- bzw. Parametrisierungsvarianten des numerischen Strömungsmodells von Bedeutung. Es stehen jedoch kaum quantitative Angaben, z.B. Zu- und Abstrom in diesem Grenzbereich zur Verfügung. Zentrale Fragen sind die nach der tektonischen Ausbildung des Grenzbereiches und des Einflusses von Störungszonen auf die dortige Grundwasserdynamik sowie die Abschätzung des Durchlässigkeitskontrastes zwischen Grundgebirge und Molassestockwerk

Die tektonische Ausbildung des Grenzbereichs und der Einfluss von Störungszonen auf die Grundwasserdynamik

Die Beckeninitialisierung und Entwicklung über dem alten konsolidierten Fundament wurde von verschiedenen sich in ihrer Ausrichtung und Intensität ändernden tektonischen Regimes begleitet (Abschnitte 3.2, 3.3 und 4.3). Es ist daher wahrscheinlich, dass diese markante

Diskordanz zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen geologisch-strukturellen Einheiten (siehe oben) eine bevorzugte Bewegungsbahn für in ihrer Ausrichtung ähnlich orientierte tektonische Stressfelder darstellte. Sicher bekannt ist eine tektonische Ausbildung dieser Grenzfläche am südlichen Granulitgebirgsrand (Heraushebung des Granulitgebirges im Känozoikum, vgl. Abschnitt 3.3). Am Südrand der VES kann zumindest im Osten - zwischen Jahnsdorf bis östlich von Chemnitz - von einer tektonischen Grenze zum Erzgebirgskristallin ausgegangen werden (Abschnitt 4.2.4).

Direkte Hinweise zur Grundwasserdynamik lassen sich in den Senkenrandgebieten meist nur aus betriebenen Brunnen in den austreichenden Rotliegendfolgen ableiten. Hydraulisch aktive Störungen und Kluftzonen können so im oberflächennahen Bereich mehr oder weniger genau lokalisiert werden. Die oft hohe Ergiebigkeit dieser Brunnen im Senkenrandbereich lässt unterirdische Einzugsgebiete vermuten, die nach Norden (am Nordrand der Vorerzgebirgssenke) bzw. nach Süden (am Südrand der Vorerzgebirgssenke) in das angrenzende Grundgebirge hineinreichen. Die Bestimmung des Verlaufs der unterirdischen Wasserscheiden und der Fortsetzungen der hydraulisch aktiven Elemente im Grundgebirge ist dabei jedoch problematisch. Erstens gibt es aufgrund der generell geringen Grundwasserführung im Grundgebirge weniger tiefere Wasserfassungen als in der Vorerzgebirgssenke, und damit auch weniger Hinweise auf die Größe des zugehörigen Einzugsgebiets. Zweitens sind die sich aus der Vorerzgebirgssenke fortsetzenden Störungs- und Kluftbereiche hier weniger gut bekannt/kartiert.

Insbesondere die herzynischen Störungszonen (NW-SE Streichen) sind jedoch über den südlichen und nördlichen Beckenrand hinaus mehr oder minder sicher verfolgbar. Diese Störungen bzw. ihre begleitenden Klüfte/ Kluftzonen sind für ihre Grundwasserführung im Bereich der VES bekannt (Abschnitt 4.3). Förderbrunnen im Senkenrandbereich weisen häufig unerwartet hohen Ergiebigkeiten auf, die durch Grundwasserzustrom aus der VES allein kaum erklärt werden kann (Abschnitt 4.2.4). Daher kann z.B. entlang der Pöhlauer Sprünge, der RHV, der Störungszone im Chemnitz-Tal und der LTZ vermutlich von einem intensiven hydraulischen Zusammenhang zwischen VES und nördlichem Umland ausgegangen werden.

Der hydraulische Gradient im Grenzbereich und Kontraste in der Durchlässigkeit Grundgebirge/Molassestockwerk

Im mittleren Teil der VES kann entlang des nördlichen Senkenrandes zum Granulitgebirge, zwischen Grüna und Ebersbach, für den oberflächennahen GWL von einem der Morphologie folgenden Grundwassergefälle in Richtung Süden ausgegangen werden. Somit erfolgt hier bei ungestörten Verhältnissen ein Grundwasserzustrom aus dem Granulitgebirgsbereich nach Süden in die VES. Die unterirdischen Einzugsgebiete erweitern sich entsprechend nach Norden (vgl. auch Abschnitte 4.4 und 4.2.4). Für den sich östlich anschließenden in NE-Richtung umschwenkenden nördlichen Senkenrand sind in ihrer Richtung wechselnde, häufig senkrecht zum Senkenrand verlaufende Gradienten typisch. Sie werden maßgeblich durch die in diesem Raum in N-S Richtung verlaufenden Vorfluter Chemnitz und Zschopau bestimmt. Die Grenzen der VES spiegeln sich in diesem Gebiet kaum im Grundwassergefälle wieder. Dies wird auch die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung bestätigt.

Im westlichen Teil der VES öffnet sich die Senkenstruktur nach NW. Die Rotliegendfolgen gehen hier in Sedimente des Zechsteins und des Mesozoikums über. Der tendenziell nach

NW abfallende Grundwasserspiegel wird hier lokal durch den Verlauf der Pleiße und Zwickauer Mulde bestimmt. Am Übergang der Rotliegendfolgen in den Zechstein kann deshalb, entlang der herzynischen Störungen, die hier zur intensiv zerrütteten Gera-Jachymov-Zone gehören, von einem oberflächennahen Grundwasserstrom nach SE bzw. NW in die Zwickauer Mulde oder Pleiße respektive ausgegangen werden. Auch dies wird durch die Ergebnisse des hydraulischen Modells bestätigt. Im Bereich tieferer GWL ist, abgeleitet aus den heutigen topographischen Verhältnissen, ein Grundwasserabstrom aus dem westlichen Teil der Senke in Richtung NW (westsächsisches Hügelland/ Thüringer Senke) zu erwarten. Eben dort, im Bereich der Pforte von Meerane, die bis zur Zechstein-Transgression die natürliche Entwässerung der westlichen Vorerzgebirgssenke darstellte, wird ein solcher dem regionalen Druckgefälle nach NW folgender Abfluss jedoch kontrovers diskutiert (Abschnitt 4.6). SCHRÄBER (1968) und STORCH ET AL. (1996) favorisieren die Theorie eines Zustroms höher mineralisierter Wässer aus dem Thüringer Becken in die Vorerzgebirgssenke (also von NW nach SE). Die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung unterstützen diese Theorie nicht, sondern zeigen nördliche Fließrichtungen (NW bis NE) bzw. Grundwasserfluss in Richtung Pleiße und Zwickauer Mulde (Entlastung).

Entlang der Südgrenze der Vorerzgebirgssenke ist für tiefere Grundwasserleiter prinzipiell ein der Morphologie folgendes Grundwassergefälle nach Norden zu erwarten. Es erfolgt also ein Grundwasserzustrom in die VES. Die oberflächennahe Grundwasserdynamik kann in Abhängigkeit vom Verlauf des zugehörigen Vorfluters bzw. kleinräumiger morphologischer Verhältnisse von dieser Tendenz abweichen. Dies wird durch die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung bestätigt.

Für den südlichen Senkenrand, den nördlichen Rand im zentralen Teil der VES und die Senkenbasis insgesamt, stellen die den Senkenrand kreuzenden zumeist herzynisch (SE-NW) orientierten Störungs- und Kluftzonen präferentielle Bewegungsbahnen des Grundwasserflusses dar. Dieses Szenario ist aus Tiefbohrungen in zahlreichen vergleichbaren Senkenstrukturen bekannt (Abschnitt 4.1). Störungen werden hier, ob als oberflächlich ausstreichende oder synsedimentär angelegte Strukturen hydraulische Verbindungen zwischen dem Grundgebirge und der Molasse herstellen. Für die Gruben des Steinkohlenbergbaus bezeichnet BLÜHER (1960) zwar die im Karbon aufgeschlossenen Störungen als meist trocken, allerdings betrifft dies lediglich Bereiche mit mächtigeren Karbonvorkommen in denen Störungen häufig zusetzen. Ein direkter Nachweis relevanter Grundwasserbewegungen auf Störungszonen bzw. begleitenden Klüften aus dem Grundgebirge in die Vorerzgebirgssenke oder umgekehrt erfolgte bisher nicht. Es liegen dazu jedoch einige indirekte Anhaltspunkte vor (Abschnitt 4.3), die durch Ergebnisse großräumiger Bilanzierungen des unterirdischen Wasserhaushaltes verstärkt werden (Abschnitt 4.4).

Ein Grundwasserzu- bzw. abstrom über die Ränder der VES ausserhalb von Störungszonen ist stark anhängig von der Klüftung der Gesteine, Fließgeschwindigkeiten sind dort in aller Regel gering. Dies kann im Rahmen der hydraulischen Modellierung nachvollzogen werden.

Die Grundwasserführung im Grundgebirge ist, abgesehen von den besser geklüfteten quarzitischen und vulkanischen Folgen, gering. Die Gesteinsdurchlässigkeiten sind meist deutlich niedriger sind als die in der Vorerzgebirgssenke. So beträgt der Transmissivitätskontrast zwischen Grundgebirge und Rotliegendmolassen im Südwesten der VES (Reuth bis Pla-

nitz/Cainsdorf; geklüftete Diabase/Tuffe) rund eine Größenordnung, an den übrigen Beckengrenzen sogar 2 bis 3 Größenordnungen (ZGI 1984 u.a.). Nach BLÜHER (1960) ist aufgrund der geringen Grundwasserführung aus dem Untergrund der Vorerzgebirgssenke kaum ein wesentlicher Grundwasserzustrom zu erwarten, zumal im inneren Beckenbereich das Grundgebirge erst in beträchtlichen Tiefen (bis über 1000 m Teufe) ansteht. Geringe Zustrommengen und sehr langsame Fließzeiten an solchen Grenzflächen sind aus anderen Senkenstrukturen bekannt (Abschnitt 4.1).

4.2.4 Spezielle hydrogeologische Verhältnisse in den Teilgebieten

In diesem Abschnitt soll auf die hydrogeologischen Verhältnisse in den einzelnen Teilgebieten der Vorerzgebirgssenke spezieller eingegangen werden. Die Diskussion wird dabei insbesondere Erkenntnisse zu den hydraulischen Zusammenhängen zwischen den hydrogeologischen Einheiten unter besonderer Berücksichtigung der Bedeutung von Störungszonen herausstellen. Im Vordergrund steht also sowohl die Grundwasserdynamik als auch die Ableitung von hydraulischen Parametern für einzelne Horizonte und Störungs- bzw. Kluftzonen. In diesem Kontext gilt der Wirkung von Störungs- und Kluftzonen besondere Aufmerksamkeit und wird in Abschnitt 4.3 speziell behandelt.

Für die Beschreibung der grundwasserdynamischen Zusammenhänge im regionalen Maßstab sind Grundwassergleichenpläne der relevanten hydrogeologischen Einheiten von großer Bedeutung. Solche Pläne liegen für das oberste Grundwasserstockwerk teilweise, für die tieferen Grundwasserleiter/Grundwasserstockwerke nicht vor. Wichtigste bisherige Darstellungen im Regionalmaßstab finden sich für den oberen GWL im hydrogeologischen Kartenwerk der DDR (ZGI 1984) sowie die neuen landesamtlichen Kartierungen (HÜBSCHMANN 2006, HYK50 2006, HÜK200 2006). Letztere wurden soweit wie möglich in die Auswertungen einbezogen. Gebiete mit verbleibenden Kenntnisdefiziten sind z.B.:

- das Gebiet zwischen Rödlitzbach und Chemnitz
- der südliche Senkenrandbereich

Für die vorliegende Arbeit und insbesondere für die Kalibrierung des numerischen Modells wurde eine aktuelle Abfrage der Grundwasserstandsdatenbank des LfUG (ERNST 2006) vom Autor aufbereitet und ausgewertet (Abschnitt 2.5.1).

Im Ergebnis der Grundwassermodellierung wurden für verschiedene hydrogeologische Einheiten bzw. Modellschichten Grundwassergleichen berechnet und diskutiert (Abschnitt 4.9).

Den örtlichen Schwerpunkt der Betrachtungen bildet der zentrale Teil der Vorerzgebirgssenke inklusive des Raumes Zwickau. Hier wurde im Vergleich zu den übrigen Senkenbereichen gerade seit Anfang der 90er Jahre ein hoher Erkenntniszuwachs u.a. im Rahmen der sogenannten "Komplexuntersuchung zu Auswirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus im Raum Oelsnitz-Zwickau" (vgl. BRAUSE 1999 und entsprechende Teilberichte) und durch auf diesen Ergebnissen aufbauende Arbeiten erzielt (Literaturangaben vgl. Abschnitt 1 und nachfolgende Abschnitte). Diese Untersuchungen können dazu dienen, Anhaltspunkte zu den hydraulischen Mechanismen für andere, weniger gut untersuchte Bereiche der VES

abzuleiten. Die in der zentralen Vorerzgebirgssenke gelegenen gefluteten bzw. in Flutung befindlichen Grubenbaue des alten Steinkohlenbergbaus bieten darüber hinaus ein interessantes Untersuchungsfeld für die andernorts kaum aufgeschlossenen tieferen Rotliegendfolgen, das Grundgebirge und das Karbon.

Für den östlichen Teil der Vorerzgebirgssenke sowie den Großraum Chemnitz standen weniger geeignete Informationsquellen zur Verfügung. Hier wurde neben den einschlägigen großräumigen hydrogeologischen Bearbeitungen wie VEB HYDRO (1978-1982), ZGI (1984), HYK50 (2006) eine Auswahl weiterer Literatur berücksichtigt. Dabei boten sich insbesondere Forschungsarbeiten im Bereich Chemnitz an (vgl. folgende Abschnitte).

Die Ergebnisse aus der nachfolgenden Diskussion der speziellen hydrogeologischen Verhältnisse waren eine Grundlage für die hydrogeologische Analyse im regionalen Maßstab, die Bearbeitung der Schwerpunktthemen und das numerische Modelle.

4.2.4.1 Westlicher Teil der Vorerzgebirgssenke

Der westliche Teil der VES reicht von vom westlichen Senkenrandbereich entlang der Ortslagen Nöbdenitz im Norden, über Blankenhain und Teichwolframsdorf, nach Reuth im Süden bis in den Raum Zwickau.

Insbesondere das ehemalige Steinkohlenrevier Zwickau war seit Anfang der 90er Jahre Ziel zahlreicher detaillierter auch geologischer und hydrogeologischer Untersuchungen. Es liegt daher insbesondere für das Stadtgebiet von Zwickau ein verhältnismäßig guter Kenntnisstand zu den hydrogeologischen Verhältnisse vor (HGN 1996b, WASY 1998, BRAUSE 1999, BERRIOS 2004, LFUG 2006 u.v.a.).

Grundwasservorkommen im westlichen Teil der Vorerzgebirgssenke sind, im Liegenden der känozoischen Folgen, zumeist an Kluft- und Störungszonen gebunden. Die Grundwasserführung in normal geklüfteten Gesteinsbereichen ist deutlich geringer. Dies gilt sowohl für die grundwasserarmen Schichten des Karbon und unteren Rotliegenden als auch für die grundwasserreicheren Bereiche des oberen Rotliegenden (Leukersdorf-Folge und Gera-/ Mülsen-Folge). Letztere weisen im Bereich der Verwitterungszone bzw. in den konglomeratisch ausgebildeten Lagen, auch Doppelporositätseigenschaften auf. Die Störungsmuster bestehen zumeist aus steil einfallenden herzynischen (um NW-SE streichenden) und erzgebirgischen Störungen (um NE-SW), die Karbon und Rotliegendes, ganz oder teilweise, durchsetzen (Abschnitte 3.3 und 4.3).

Die Intensität und Reichweite der Wasserführung ist sowohl in den Störungs- und Kluftbereichen als auch in den gröberklastischen Lagen in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Störungsbahnen bzw. der Ausbildung und Größe der höherpermeablen Horizonte sehr unterschiedlich. Störungszonen führen häufig große Grundwassermengen, so das Brunnen bevorzugt in diesen Bereichen angelegt wurden (z.B. im Bereich der Oberhohndorfer Hauptverwerfung (OHV) oder des Brückenbergsprungs).

Weiterhin sind vor allem im Raum Zwickau quartäre Talsedimente von lokaler Bedeutung. Im Tal der Zwickauer Mulde führt die Lage dieser Sedimente über den stark zerrütteten und gestörten Gesteinen der Leukersdorf- und Gera-/ Mülsen-Folge sowie der starke Einfluss des alten Steinkohlenbergbaus zu sehr komplexen Grundwasserverhältnissen und einer noch immer nicht vollständig geklärten Grundwasserdynamik (BRAUSE 1999, GÖTTELMANN

et al. 1998, HGN 1996-1998, Storch 2001, LFUG 2006 u.a.).

Reliktisch auftretende tertiäre Sedimente haben meist nur Bedeutung für die Grundwasserneubildung, bilden jedoch im Raum Helmsdorf zudem ein wichtiges Grundwasserstockwerk.

Die für die Wasserhaushaltsbetrachtungen abgegrenzten Bilanzgebiete Pleiße (siehe unten) und Zwickauer Mulde i.e.S. (Abschnitt 4.4) umfassen fast den gesamten westlichen Bereich der Vorerzgebirgssenke sowie Anteile umgebenden Grundgebirges.

Im Bilanzgebiet der Zwickauer Mulde i.e.S. liegen neben der Grundwasserneubildung nach GEOFEM und dem Basisabfluss auch u.a. nach NASIM und GWD ermittelte Werte vor (Abschnitte 2.7.3 und 4.4.3). Dabei liegt der berechnete Basisabfluss mit 167 mm im Bereich der mit GWD u.a. (HGN 1996) bzw. NASIM u.a. (WASY 1998) berechneten Grundwasserneubildung von 156 bzw. 136-165 mm. Die mit GEOFEM 2004 berechnete Grundwasserneubildung für das Bilanzgebiet weicht mit 67 mm (langsame Komponente 51 mm) deutlich von diesen Werten ab. Dies ist u.a. auf Programmdefizite bei der Berücksichtigung der Lockergesteinsbedeckung in einigen Teileinzugsgebieten zurückzuführen (Abschnitt 2.7.3). Ein Abstrom von Grundwasser auf Störungszonen aus dem Bilanzgebiet kann auf Grundlage der Grundwasserbilanzierung nicht abgeleitet werden. Die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung lassen hier keine weiterführenden Schlüsse zu.

Erkenntnisse zu den regionalen grundwasserdynamischen Zusammenhängen im westlichen Teil der Vorerzgebirgssenke sind, z.B. in Form großräumiger Hydroisohypsenpläne / Stichtagmessungen nur aus ZGI (1984) und den Neubearbeitungen bekannt (HYK50 2006, HÜK200 2006). Für einige Gebiete, insbesondere entlang der Senkenränder liegen keine vergleichbaren Daten vor.

Südlicher Vorerzgebirgssenkenrand

Das sich südlich der Vorerzgebirgssenke anschließende Erzgebirgskristallin im Raum Hartenstein, Wildenfels und Wiesenburg besteht i.d.R. aus wenig klüftungsfreundlichen Gesteinen wie Tonschiefern und Phylliten (vgl. Abschnitt 3.2). Folgerichtig ist auch hier Grundwasser vor allem an zumeist herzynische oder N-S streichende Störungs-, Kluft- und Zerrüttungszonen als hydraulisch höher leitfähige Bereiche gebunden. Eine lokal erhöhte Gesteinsklüftigkeit und damit Grundwasserführung ist im Raum Schönfeld, Stenn und Planitz, in hier anstehenden Diabasen, Tonschiefern, Quarziten sowie Kiesel- und Alaunschiefern anzutreffen.

Über einen Grundwasserfluss entlang der genannten Störungen über den Senkenrand nach N in die Vorerzgebirgssenkeliegen keine konkreten Nachweise vor. Die hydraulische Modellierung belegt Grundwasserfluss über den Senkenrand hinaus, in Abhängigkeit vom Verlauf der Vorfluter. Insgesamt kann auch aufgrund des regionalen nach Nord gerichteten hydraulischen Gradienten und dem Verlauf der Grundwasserscheiden trotz des deutlichen Transmissivitätskontrastes zwischen Grundgebirge und Rotliegendem von einem geringen Grundwasserzustrom über Kluft- und Störungszonen in die Vorerzgebirgssenke ausgegangen werden (vgl. Abschnitt 4.2.3). Das hydraulische Modell unterstützt diese Annahme, sie ist durch Grundwasserhaushaltsbetrachtungen quantitativ jedoch nicht zu belegen.

Raum Zwickau

Die hydraulische Wirkung des die Stadt Zwickau unterlagernden Kluft- und Störungsnetzes im Rotliegenden und Karbon konnte im Rahmen vielfältiger Untersuchungen und Grundwassermonitorings (z.B. BRAUSE 1999, LFUG 2003, LFUG 2006)) zumindest ansatzweise geklärt werden. Trotz der im Bereich Zwickau relativ genauen Kartierung von Störungs- und -Kluftzonen (vgl. Anlage 6, GMS-Projekte) bleiben u.a. in Bezug auf die konkrete hydraulische Wirkung einzelner tektonischer Elemente Fragen offen. Dazu tragen neben der z.T. ungenügenden Dokumentation von Aufschlüssen (GÖTTELMANN et.al. 1998 und Folgearbeiten), die sehr komplexen hydrogeologischen Verhältnisse bei. Diese werden bestimmt von:

- einem hangenden quartären GWL bzw. stauenden quartären Auelehmen
- einer holozänen für die GWN wichtigen hydraulisch inhomogenen Zersatzzone des Rotliegenden als Basis des quartären GWL-Stockwerkes
- dem unterlagernden inhomogenen Kluftgrundwasserleiter der Leukersdorf-Folge bzw. dem Doppelporositätsgrundwasserleiter der Gera-/ Mülsen-Folge
- dem Einfluss natürlicher Störungs- und Kluftzonen, die im Festgestein bevorzugte wasserführende Strukturen darstellen, jedoch in ihrer Häufigkeit, hydraulischen Durchlässigkeit und Konnektivität auch kleinräumig starken Schwankungen unterworfen sind
- dem Einfluss anthropogener Grund- und Oberflächenwasserentnahmen (Pumpstationen Silberhof, Krebsgraben, Becherhebewerk in Bockwa) sowie insbesondere der starken Drainagefunktion der städtischen Abwasserkanäle für die Absenkungsbereiche Schedewitz und Innenstadt (LFUG 2006)
- den deutlich influenten Grundwasserverhältnissen entlang einiger Abschnitte der Zwickauer Mulde
- dem Einfluss anthropogener Wasserinfiltrationen aus dem Leitungsnetz des Zwickauer Wasserzweckverbandes
- den alten, in ihrer Lage und Verfüllung nicht immer vollständig bekannten Grubenbauen des Zwickauer Steinkohlenbergbaus. Es sind rund 1000 Schächte im Zwickauer Revier erwähnt (KAULFUß & MÜLLER 1996).

Der letztgenannte Faktor beeinflusst die Grundwasserverdynamik sowohl direkt, da Grubenbaue Wasserwegsamkeiten und hydraulische Verbindungen zum quartären Grundwasserleiter sowie zum Oberflächenwasser/ zur Zwickauer Mulde darstellen können (ARNOLD 1900, STUTZER 1935, BSA 1981, KAULFUß & MÜLLER 1996 u.v.a.).

So betrug nach Schätzungen von VEB HYDRO (1977) der Anteil von Oberflächenwasser aus Niederschlägen, der Zwickauer Mulde und quartärer Überdeckung - also ohne Anteil von Grundwasserneubildung - am gesamten Grubenwasseraufkommen des Zwickauer Reviers 70-95%. Grubenbaue sind darüber hinaus als Ursache für Setzungen, Rissbildungen und Kluftweitungen auch in ihrer indirekten Wirkung von Bedeutung (BRAUSE 1999, STEINKOHLN-A-V 1912 u.a.).

Die enge hydraulische Verbindung zwischen der Zwickauer Mulde, dem quartären und auch dem oberen Rotliegendgrundwasserleiter konnte zuletzt im Rahmen des im Raum Zwickau durchgeführten Grundwassermonitorings nachgewiesen werden. So zeigten während des Augusthochwassers 2002 sowohl quartäre (z.B. 52416013) als auch rotliegende Messstellen (52416014, Schluffstein) eine direkte Reaktion auf ansteigende Muldenwasserstände (LFUG

2003, GUB 2003). Die zeitliche Verzögerung in den rund 450 m von der Mulde entfernt liegenden Messstellen war dabei gering, im Bereich des Rotliegenden (Leukersdorf-Folge) etwas höher als im Quartär. Darüber hinaus konnten für den Bereich Zwickau, wie in LFUG (2006) noch einmal zusammenfassend dargestellt, Infiltrationen aus dem Quartär in das Rotliegende weitgehend ausgeschlossen werden. Neben den – selbst in Störungsbereichen – zu meist deutlich geringeren Durchlässigkeiten, liegen zudem die Grundwasserspiegel im Rotliegenden i.d.R. über denen des Quartär.

Angaben zu den hydrogeologischen Parametern der einzelnen geologischen Einheiten im Raum Zwickau enthält Abschnitt 4.2.1 und Anlage 3.

Indizien für die hydraulische Wirksamkeit herzynischer Störungszonen im Raum Zwickau

In GFE (1985) werden die Störungen im Bereich des Zwickauer Reviers noch als "nicht wasserführend" bezeichnet. Im Ergebnis u.a. der Arbeiten zur sogenannten "Komplexuntersuchung zu Auswirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus im Raum Oelsnitz-Zwickau" (vgl. BRAUSE 1999) und deren Folgearbeiten inklusive der vorliegenden Arbeit ergaben sich wichtige Aspekte, die dieser Aussage widersprechen und Hinweise auf mögliche hydraulische Szenarien liefern. Sie deuten darauf hin, dass einige große herzynische Störungen mit ihren erzgebirgischen Begleitstrukturen sehr wohl, vielleicht sogar in erheblichem Maße und über größere Entfernungen hydraulisch wirksam sind. Die Implementierung solcher hydraulisch aktiven Störungszonen im großräumigen hydraulischen Modell führte zu einer deutlich verbesserten Modellkalibrierung. Wenngleich kein Beweis kann dies ein Hinweis auf Richtigkeit der postulierten Wirkungsweisen tektonischer Elemente sein.

Die Untersuchungen zeigen jedoch auch dass zumindest im Zwickauer Raum die Bedeutung hydraulisch aktiver Störungszonen für den Wasserhaushalt der quartären Grundwasserleiter eher gering ist (z.B. LFUG 2003, GUB 2003). Die i.d.R. geringeren Durchlässigkeiten rotliegender Folgen, auch im Bereich von Störungszonen, führen zusammen mit geringleitenden bis hemmenden Eigenschaften der rotliegenden Verwitterungszone zu einer weitestgehenden hydraulischen Abgrenzung der Rotliegendgrundwässer vom quartären Grundwasserleiter. Durch die höheren Grundwasserspiegel im Rotliegenden ist deshalb lediglich eine quantitativ geringfügige Infiltration rotliegender Grundwässer in den quartären GWL, vorzugsweise im Bereich von Störungen zu erwarten. Dieses Szenario kann anhand des hydraulischen Modells gut nachvollzogen werden. In einigen Bereichen kommt es zu stärkerer Kommunikation. Dies betrifft z.B. den Bereich Bockwa wo kleinerräumige hydraulische Modellierungen auf einen Zustrom von Rotliegendgrundwasser in das Quartär hinweisen (BERRIOS 2004, LFUG 2006). Eine Sondersituation besteht im unmittelbaren Bereich der Zwickauer Mulde. Hier reagiert auch der obere Rotliegend-GWL verzögert auf Schwankungen des Muldenwasserstandes und – eingeschränkt – auch des quartären Grundwasserspiegels (siehe oben).

Hervorzuheben ist für den Raum Zwickau die um SE-NW streichende Oberhohndorfer Hauptverwerfung (OHV) und die sie begleitenden Parallel- und Querstörungen. Sie liefert sowohl im Stadtbereich Zwickau (z.B. mit ihrer Querstörung am Kornmarkt), als auch nordwestlich im Gebiet der IAA Helmsdorf (dort als Lauterbacher Störung bezeichnet) und

weiter im Pleißetal (vgl. folgendes Kapitel) Anhaltspunkte ihrer hydraulischen Aktivität. Erkenntnisse zur Hydraulik von Störungszonen aus dem Raum Zwickau sind, sofern die Beeinflussung durch den Bergbau abgegrenzt werden kann, auch auf andere genetisch gleichartige tektonische Strukturen in anderen Bereichen der Vorerzgebirgssenke anwendbar. Eine ausführliche Betrachtung der tektonischen Entwicklung, wichtiger tektonischer Elemente und ihrer hydraulischen Eigenschaften im Vorerzgebirgsmaßstab erfolgt in den Abschnitten 3.3 und 4.3. Folgende konkrete Indizien weisen auf eine hydraulische Aktivität herzynischer Störungen bzw. Kluftzonen im Raum Zwickau hin.

In Rotliegendbohrungen in Zwickau Schedewitz konnten oberflächennahe höher mineralisierte Grundwässer auf Störungen bzw. Klüften nachgewiesen werden.

In der Grundwassermessstelle GWM 701 in Schedewitz Malzinsel wurden zwischen 38 m und 76 m mehrere „hochsalinare“ Zuflüsse auf tektonischen Trennflächen aufgeschlossen. Obwohl diese von einander verschiedene und über den quartären liegende Grundwasserspiegel aufwiesen, konnten auch im Rotliegendgrundwasser zeitverzögert die Änderungen des Mulden- und Quartärgrundwasserstandes nachvollzogen werden (GUB 2001). Die liegende Planitz-Folge wies dagegen keine Grundwasserführung auf.

Auch in der Messstelle GWM 2/2001 im Bereich der Schneeberger Strasse konnten in der Leukersdorf-Folge oberflächennah Zuflüsse höher mineralisierter Wässer festgestellt werden (HGC 2002). Unterhalb von 90 m Teufe traten dann, selbst auf Störungs- bzw. Kluftbahnen kaum noch Zuflüsse auf. Interessant erscheint hier auch die deutlich erhöhte Temperatur einiger Grundwasserzuflüsse. So betrug die Temperatur des Mischwassers aus 15 m bis 60 m Teufe 14,5 °C. Bei einer geothermischen Tiefenstufe von 3 bis 3,5°/100m und Jahresdurchschnittstemperaturen von 8 bis 9°C, wären in dieser Teufe Grundwassertemperaturen von maximal 11°C zu erwarten. Dies könnte also auf Zuströme tieferen Grundwassers hinweisen. Darüber hinaus finden sich in beiden Messstellen Einträge anthropogener Schadstoffe (AOX), ein Hinweis auf eine hydraulische Verbindung zum hangenden quartären Grundwasserleiter (LFUG 2006).

Die von der WASY (1998) durchgeführten Untersuchungen u.a. zum Versinken von Muldenwasser im Stadtbereich Zwickau lassen, trotz aller Einschränkungen der Messergebnisse durch auftretende Störgrößen, einen effektiven Wasserverlust aus der Mulde in den/die GWL zwischen den Profilen 1 (Flusskilometer 92,43, südwestl. von Rosenthal) und 4 (Flusskilometer 88,05, nordöstl. von Schedewitz) im Bereich der Stadt Zwickau vermuten. Dies wurde durch weitere Untersuchungen bestätigt und konkretisiert (BERRIOS 2004, HGC et al. 1999, GUB 2003). Die Infiltration erfolgt sowohl in den quartären GWL aber auch in Rotliegendmessstellen konnte der Einfluss von Mulden- bzw. Quartärgrundwasser zweifelsfrei nachgewiesen werden (z.B. LFUG 2003).

Auch das Überlaufverhalten der Brunnen BL1 und BL2 in der Bockwaer Senke im Süden Zwickaus wird nachweislich durch eine, vermutlich indirekte, hydraulische Anbindung dieser Brunnen an den quartären GWL bzw. an die Mulde beeinflusst. Diese Anbindung wird über Grubenbaue, geklüftetes und verwittertes Rotliegendes und/oder Störungs- bzw. Kluftzonen realisiert (GÖTTELMANN et al. 1998 u.a.).

Zur Ermittlung von Abflusswegen von Grundwasser aus dem Stadtbereich Zwickau, mögli-

cherweise auch über Störungen/Klüfte des Rotliegenden, wurden in den letzten Jahren verschiedene Untersuchungen durchgeführt.

Untersuchungen zu einem Tracerversuch im Bereich Schwedewitz im SW Zwickaus (HGC & HGN 1999) lassen die Existenz einer entlastenden permeablen Zone südlich des Zwickauer Stadtzentrums möglich erscheinen. Dafür spricht der fehlende Nachweis von Uranin im abstromig gelegenen Schacht 15 des Abwassersammlers, trotz hoher Uraninkonzentrationen im Bereich des anstromig gelegenen Brunnen 13. Dies weist auf eine hydraulisch aktive Struktur zwischen Brunnen 13 und Schacht 15. Hierbei könnte es sich um eine hydraulisch aktive Störung handeln. Weiterhin konnte in diesem Bereich während der Abriegelung des Grundwasserzuflusses in Schacht 14 kein Druckaufbau am Zufluss beobachtet werden. Eine Entlastung des Grundwasserzuflusses über eine permeable Zone, also z.B. eine Kluft- oder Störungszone wäre möglich.

Ein Grundwasserhaushaltsuntersuchungen (Abschnitt 4.4.3) und Modellvorstellungen bzw. geohydraulische Modellrechnungen (HGN 1997, HGC & HGN 1999, GUB 2003, BERRIOS 2004) erwiesen sich auch ohne einen Grundwasserabstrom über rotliegende Störungen plausibel. Andererseits konnte diese Möglichkeit, z.B. im Bereich der weiteren Innenstadt, auch nicht ausgeschlossen werden. Darüber hinaus lässt die große Schwankungsbreite in der Grundwasserbilanz (z.B. Zustrommenge aus der Mulde) Raum für solche Annahmen.

Wichtigste Drainageelemente der Grundwasserdepressionen in der Zwickauer Innenstadt und in Schedewitz sind u.a. nach Untersuchungen von GUB (2003) jedoch zweifellos die Abwasserkanalsysteme der Stadt. Wenngleich diese also den Hauptanteil an Grundwasser in diesen Bereichen abführen, würden sie damit auch eine quantitativ deutlich geringere Drainagewirkung rotliegender tektonischer Strukturen überlagern.

So lässt die Geometrie der Hydroisohypsen im Bereich der Innenstadt Zwickau keine linearen Drainagestrukturen erkennen, die auf hydraulisch aktive grundwasserableitende Störungen oder Kluftzonen hinweisen (GUB 2003). Allerdings können die störungsgebundenen Abstrommengen auch zu gering sein um sich beim vorliegenden Auflösungsgrad des Hydroisohypsenplanes abzubilden.

Ein Grundwasserabstrom über einen alten Flussarm der Zwickauer Mulde nördlich des Stadtzentrums wie als Möglichkeit durch BRAUSE (1999) postuliert konnte durch weitere Untersuchungen (GUB 2003) ausgeschlossen werden.

Ein Abstrom von Quartärgrundwasser entlang der Oberhohndorfer Hauptverwerfung im Bereich Schedewitz (GWM 768 bzw. GWM 2/2001) konnte dort lokal ausgeschlossen werden (HGC 2002).

In der Baugrube am Kornmarkt wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit aus Schichten der Leukersdorf-Folge Wasserprobennahmen zur Altersbestimmung mit Tritium durchgeführt. In ca. 15 m Tiefe traten erstmals größere Wassermengen auf (Summe für die gesamte Baugrube 10-15 m³/h). Sie stammen wahrscheinlich aus den meist NE-SW (erzgebirgisch) streichenden steil mit 50° bis 90° nach NW einfallenden geöffneten Zerrungsklüften (KATER 1999). Dabei konnten Grundwässer sehr unterschiedlichen Alters (Alter der Hauptanteile zwischen wenigen Jahre bis deutlich mehr als 55 Jahre) und unterschiedlichen chemischen Charakters beobachtet werden (Abschnitt 4.5). Ihr gemeinsames Auftreten auf engstem Raum (20 m Radius) kann nur durch hydraulisch voneinander unabhängige wasser-

führende Störungen bzw. Kluftzonen erklärt werden. Bei den beprobten Wässern handelt es sich um Mischwässer aus älteren tritiumfreien Grundwässern und jungen meteorischen Wässern. Die Anteile jüngerer und älterer Komponenten sind dabei sehr unterschiedlich. Die Abwesenheit von Tritium in einer der Grundwasserproben weist auf ein hohes Alter von mindestens einigen Jahrzehnten, möglicherweise auch deutlich mehr, hin.

Die Vermutung, dass es sich um Wässer auf einer Kluft- oder sogar Störungszone handelt, konnte auch durch geologisch-strukturelle und morphologische Argumente verstärkt werden, die nach KATER (1999), SCHNEIDER (1999), HGN (1998) und RENNER (1998) übereinstimmend auf eine NE-SW (erzgebirgisch) verlaufende flächige Struktur hinweisen.

- plötzliche Veränderung des Schichteinfallen eines kartierten Aschentuffhorizontes
- lineare Hebungsstruktur ermittelt durch Höhenmessungen an den Pfeilern
- Harnische auf Kluftflächen
- sichtbare NE-SW streichende Kluft mit punktuell austretendem Grundwasser
- Zwei aus Luftbildinterpretation abgeleitete NE-SW verlaufende Geländeknicke im Bereich Kornmarkt

Obwohl eine Störung (Schichtversatz) selbst nicht beobachtet werden konnte, lassen die genannten Anhaltspunkte zumindest eine hydraulisch aktive Kluftzone oder Parallelstörung zwischen größeren in ihrer Lage ungefähr bekannten herzynischen Störungszonen, der Oberhohndorfer Hauptverwerfung (OHV) im W und dem Brückenbergsprung im E, vermuten.

Die oben aufgeführten Argumente stellen keinen direkten Beweis für einen wesentlichen Grundwasserfluss entlang herzynischer Störungen (hier im besonderen entlang der OHV) im Raum Zwickau dar. Sie zeigen aber dass:

- zahlreiche Nachweise (höher mineralisierten) Grundwassers auf Kluft- und Störungszonen des Rotliegenden im Zwickauer Raum vorliegen
- Zumindest lokal Indizien für eine hydraulische Verbindung zwischen rotliegendem und quartärem Grundwassern bzw. Oberflächenwasser vorliegen
- vorliegende Wasserbilanzen und Grundwassermodelle einen Grundwasserfluss z.B. entlang herzynisch orientierter tektonischer Elemente im Zwickauer Raum nicht ausschließen können
- Hinweise auf einen Grundwasserfluss über herzynische Störungen aus dem Raum Zwickau nach NW in das Pleißetal vorliegen (siehe unten)
- für das dem Zwickauer Raum nahegelegene Bilanzgebiet Koberbach Grundwasserbewegungen entlang herzynischer Störungen anzunehmen sind (Koberbachtal-Störung) (siehe unten)
- die hydraulischen Verhältnisse entlang ein und derselben Störungszone stark variieren können und auf engstem Raum unterschiedliche Druckspiegel und stark schwankende Gesteinsdurchlässigkeiten auftreten. Dies wird durch die Betrachtung von Fließpfaden und Fließgeschwindigkeiten im Rahmen der vorliegenden Modellierung bestätigt. Allerdings ist das Modell aufgrund seines großräumigen Charakters für die Betrachtung kleinmaßstäblicher Fließvorgängen nicht geeignet/ kalibriert.

Das Pleißetal, Helmsdorf-Crossen und der Nordwesten der Vorerzgebirgssenke

Aus Brunnennutzungen und der Auswertung von Hydroisohypsen (Orientierung und Dichte) im Tal der Pleiße wird der starke Einfluss insbesondere herzynischer tektonischer Strukturen auf die Grundwasserdynamik deutlich. Sie stellen mit ihren erhöhten hydraulischen Leitfähigkeiten die Hauptbewegungsbahnen des aus dem Raum Zwickau im SE zufließenden Grundwassers dar (VEB HYDRO 1979, ZGI 1984).

Dies konnte für das Bilanzgebiet Koberbach, einem Teilgebiet des Bilanzgebietes Pleiße, im NW der Vorerzgebirgssenke anhand von Wasserbilanzrechnungen belegt werden. Ein Vergleich der mit dem Programm GEOFEM 2004 ermittelten Grundwasserneubildung von 78 mm mit dem Basisabfluss von nur rund 13 mm weist hier auf einen Abstrom von Grundwasser (Einschränkung des unterirdischen Einzugsgebietes gegenüber dem oberirdischen) nach SE in Richtung Pleiße, vermutlich entlang der herzynisch verlaufenden Störung im Koberbachtal, mglw. auch entlang der Störung von Niederalbertsdorf hin (Abschnitt 4.4.3.3). Diese Annahme wird durch die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung bestätigt.

Die Grundwasserneubildung für das Bilanzgebiet der Pleiße beträgt nach GEOFEM 2004 rund 74 mm mit einem Anteil der langsamen Komponente von 61 mm. Gleichzeitig konnte ein Basisabfluss aus dem Gebiet von rund 53 mm berechnet werden. Die Differenz könnte z.B. durch einen Grundwasserabstrom auf herzynischen Störungen nach NW (Einschränkung des unterirdischen gegenüber dem oberirdischen Einzugsgebiet) aus dem Bilanzgebiet hinaus erklärt werden (vgl. Abschnitte 2.7 und 4.4.3.3). Die hydraulische Modellierung zeigt dagegen Möglichkeiten eines Zustromes von Grundwasser in das Bilanzgebiet aus Süd bis Südost und von Nordwest.

Im NW des Untersuchungsgebietes geht die Vorerzgebirgssenke mit der Pforte von Meerane in die Zeitz-Schmöllner Mulde über (Abschnitt 3). Die Pforte von Meerane ist eine alte Erosionsrinne, entlang welcher die Vorerzgebirgssenke bis zur Zechstein-Transgression entwässerte. Im Bereich dieser Rinne verläuft heute eine etwa 10 km breite hydraulisch wirksame Scherzone als Teil der Gera-Jachymov-Zone (SCHRÄBER 1983). Diese Scherzone bildet die nordwestliche Fortsetzung der vorerzgebirgischen herzynischen Störungsschar zwischen der Oberhohndorfer Hauptverwerfung (OHV) im W und der Rödlitzer Hauptverwerfung (RHV) im E. Nach STORCH ET AL. (1996) prägen hier eine sich engräumig ändernde Lithologie und komplexe tektonisch überprägte Lagerungsverhältnisse den geologischen Bau, verbunden mit hydraulischen Kurzschlüssen zwischen den Grundwasserleitern. Im Bereich der Pforte von Meerane sind zwei Abfolgen hydrogeologischer Einheiten von Bedeutung.

- ein liegendes Grundwasserstockwerk triassischer und permischer Festgesteine
- die oberflächennahe Auflockerungszone mit einer lokal auftretenden bis 5 m mächtigen quartäre Lockergesteinsdecke fluviatiler Sande und Kiese (vgl. Abschnitte 4.2.1 und 4.2.2)

Nach VEB HYDRO (1979) und STORCH et al. (1996) sind Störungen in diesem Bereich grundwasserführend, wobei ein Grundwasserstrom nach SE in Richtung Tal der Zwickauer Mulde und Vorerzgebirgssenke vermutet wird. Für den hangenden GWL ist nordwestlich der

Grundwasserscheide zwischen Zwickauer Mulde und Pleiße von einem nordwestlich gerichteten Grundwasserfluss zur Pleiße auszugehen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten darüber hinaus verschiedene Anhaltspunkte, die auf einen SE-NW gerichteten Grundwasserfluss auf herzynischen Störungen (z.B. den Pöhlauer Sprünge, der Lungwitztalzone (LTZ), OHV und RHV), möglicherweise im Niveau tieferer Grundwasserstockwerke, hinweisen herausgearbeitet werden (vgl. oben und Abschnitte 4.6 und 4.4).

Diese Annahmen können qualitativ durch die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung bestätigt werden.

Raum Helmsdorf-Crossen

Eine hydrogeologische Sonderstellung im W der Vorerzgebirgssenke nimmt das Gebiet um Helmsdorf, Dänkritz und Crossen nördlich von Zwickau ein. Neben den mächtigen anthropogenen Ablagerungen u.a. aus der bergbaulichen Aufbereitung wie Tailings und Halden sowie Deponien stehen hier tertiäre Sedimente mit Mächtigkeiten bis 40 m an. Sie bilden als Liegend- und Hangend-Kieskomplex zwei separate GWL aus. Darüber hinaus ist hier – im Gegensatz zum sich südwestlich anschließenden Zwickauer Raum – flächendeckend die Gera-Mülsen-Folge verbreitet.

Im Bereich der IAA Helmsdorf weisen fast alle größeren herzynischen und erzgebirgischen Störungen, darunter auch die OHV, im Bereich der Gera-Mülsen-Folge erhöhte hydraulische Leitfähigkeiten auf (PAUL 1998c, PAUL et al. 1998a, G.E.O.S. 1996). Erkenntnisse aus einer Vielzahl von Bohrungen seit Anfang der 90er Jahre lassen erkennen, dass die Wasserführung im Rotliegenden im wesentlichen über Kluft- und Störungszonen erfolgt, wobei die hydraulischen Eigenschaften räumlich stark variieren können (ZWEIG 1999 u.a.). Im Bereich Helmsdorf-Crossen sind höher mineralisierte Wässer erschlossen worden (u.a. MÖCKEL 2007).

Anthropogene Einflüsse aus Sickerwässern der IAA Helmsdorf auf das Grundwasser im Bereich der Lauterbacher Störung, einer Teilstörung der OHV, nordwestlich der Absetzanlage (VEB HYDRO 1977) belegen eine Grundwasserbewegung entlang dieser Störung nach NW in Richtung Pleißetal. Auch in anderen störungsgebundenen Grundwässern in diesem Raum sind anthropogene Einflüsse nachweisbar (PAUL et al. 1998a). Herzynische Störungen im Raum Helmsdorf weisen mittlere Transmissivitäten zwischen $2 \cdot 10^{-4}$ und $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (PAUL 1998b) bzw. k_f -Werte von rund $3 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ (G.E.O.S. 1996) auf (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Die gute Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften von tektonischen Elementen im Raum Helmsdorf ist – trotz aller Unterschiede im geologischen Bau – auch für die Beurteilung der wenige Kilometer südöstlich gelegenen, häufig zu den selben Störungssystemen gehörenden, Störungen im Zwickauer Raum von Bedeutung. Generell muss allerdings für die im Bereich der Gera-Mülsen-Folge ausgebildeten Störungszonen in Helmsdorf eine höhere Durchlässigkeit erwartet werden als in den zugehörigen Störungsabschnitten in Zwickau (i.d.R. Leukersdorf-Folge). Geht man von der Annahme aus, dass die Transmissivitäten im Bereich Zwickau entlang gleicher Störungselemente (z.B. OHV) selbst um rund eine Größenordnung unter jener in Helmsdorf liegen, ist weiterhin die Möglichkeit eines Grundwasserflusses entlang insbesondere herzynischer Störungen gegeben (vgl. unten). Solche Überlegungsansätze für einen Grundwasserfluss aus dem Bereich Zwickau/Tal der Zwickauer Mulde entlang her-

herzynischer Störungen - hier vor allem der OHV - über das Gebiet Helmsdorf/Dänkriz in das Einzugsgebiet der Pleiße und möglicherweise darüber hinaus liegen auch aus anderen Quellen vor (z.B. VEB HYDRO 1979, BRAUSE 2000). Regionale weitreichende Grundwasserfließsysteme können durch die hydraulische Modellierung nicht belegt. Zumindest für die preferentiellen Fließwege kann dort eine relativ schnelle/ engräumige Entlastung in die Mulde oder Pleiße beobachtet werden. Allerdings sind weiterreichende Fließsysteme mit deutlich geringeren Fließgeschwindigkeiten in nordwestliche Richtung zu erwarten.

Fazit und Schlussfolgerungen

Die hydrogeologischen Verhältnisse im westlichen Teil der Vorerzgebirgssenne werden, abgesehen von den quartären Ablagerungen im Tal von Zwickauer Mulde und Pleiße, von den Kluftgrundwasserleitern des Rotliegenden bestimmt. Dabei sind Störungs- und Kluftzonen von maßgeblicher Bedeutung, sowohl für den lokalen als auch intermediären und regionalen Grundwasserfluss. Die hydraulische Wirkung dieser tektonischen Strukturen kann wie folgt zusammengefasst werden.

- Zahlreiche herzynische Störungen im westlichen Teil der VES sind nachweisbar – zumindest in Teilabschnitten - hydraulisch wirksam. Grundwasserfluss findet bevorzugt entlang dieser Strukturen statt.
- Viele Indizien weisen darauf hin, dass die Grundwasserfließrichtung auch auf Störungs- und Kluftzonen zumindest im oberen Kluftgrundwasserleiter in Richtung des nächstgelegenen großen Vorfluters, hier also der Pleiße oder Zwickauer Mulde gerichtet ist (lokales Grundwasserfließsystem, vgl. Abschnitt 4.2.2). Dies wird durch hydraulische Modellierungen bestätigt.
- Grundwasserfluss entlang von Störungen kann dennoch für die Gebietswasserbilanz, vor allem kleiner Einzugsgebiete, bedeutend sein. Anhaltspunkte dafür liegen z.B. für das Bilanzgebiet Koberbach vor.
- Unterirdische Einzugsgebiete werden also durch die Wirkung hydraulisch aktiver Störungs- bzw. Kluftzonen gegenüber den oberirdischen Einzugsgebieten ausgedehnt bzw. eingeschränkt. Neben dem Bilanzgebiet Koberbach könnte dies auch für das Bilanzgebiet Pleiße sowie Teileinzugsgebiete der Zwickauer Mulde zutreffen. Für letztere ist ein Nachweis bzw. Ausschluss aufgrund der starken hydraulischen Inhomogenität der entsprechenden Störungszonen sowie der anthropogenen Einflüsse auf die Gebietswasserbilanzen des Zwickauer Raumes schwierig (vgl. oben und Abschnitt 4.4.2).
- Für einen über die Einzugsgebiete von Mulde und Pleiße hinaus gehenden durchgehend nordwestlich oder südöstlich ausgerichteten Grundwasserfluss auf herzynischen Störungen gibt es jedoch keine sicheren Nachweise.
- Dabei müsste es sich dann um an tiefere Grundwasserstockwerke gebundene intermediäre, möglicherweise auch regionale Grundwasserfließsysteme entlang großer herzynischer Störungen (z.B. Oberhohndorfer Hauptverwerfung) handeln. Dafür gibt es bisher jedoch nur Anhaltspunkte (z.B. Bilanzdefizite, Altersunterschiede der Grundwässer auf Störungen; siehe oben). Die hydraulische Modellierung ergibt zumindest in Bezug auf die preferentiellen Fließwege meist kurze Fließwege.

Die hydrogeologischen Verhältnisse im westlichen Teil der Vorerzgebirgssenne können

aufgrund der zahlreichen Untersuchungen im Raum Zwickau für die oberflächennahen Grundwasserleiter und tektonischen Strukturen relativ gut beschrieben werden. Demgegenüber ist die hydraulische Wirksamkeit von Störungszonen im Bereich tieferer GWL und ihre Bedeutung für den intermediären und regionalen Grundwasserfluss noch ungenügend geklärt.

Neben den, im Zusammenhang mit der Ausweisung der unterirdischen Einzugsgebiete empfohlenen Maßnahmen kann ein Erkenntniszuwachs erzielt werden durch:

- Errichtung von Mehrfach-Grundwassermessstellen entlang herzynischer Störungsbereiche, z.B. der Oberhohndorfer Hauptverwerfung/Lauterbacher Störung zur teufenabhängigen Probenahme
- Reaktivierung vorhandener bzw. Anlage neuer Referenzmessstellen im benachbarten ungestörten Gestein
- Durchführung mittel- und langfristiger Tracerversuche über genannte Messstellen
- weitere teufenabhängige Untersuchungen stabiler und radioaktiver Isotope, Haupt- sowie ausgewählter Neben- und Spurenelemente an den genannten Messstellen (vgl. KOLITSCH 1999)
- Abflussmessungen im Bereich der Pleiße (evtl. weitere in der Zwickauer Mulde) und ausgewählter Zuflüsse zur Ermittlung von Versinkungen über Störungsbereichen
- Abgleich der Feldversuchsergebnisse mit Gebietswasserbilanzen/Ergebnissen aus Wasserhaushaltsmodellen
- Abgleich der Ergebnisse aus Feldversuchen und Wasserhaushaltsmodellen mit Ergebnissen aus kleinräumigen numerischen Grundwassermodellen

4.2.4.2 Zentraler Teil der Vorerzgebirgssenke

Die zentrale Vorerzgebirgssenke erstreckt sich von Zwickau im Westen bis Chemnitz im Osten. Der Bereich Zwickau wird in Abschnitt 4.2.4.1 diskutiert. Die zentrale Vorerzgebirgssenke weist neben Gebieten mit hohem Aufschlussgrad, respektive gutem hydrogeologischen Kenntnisstand wie dem Mülsengrund, Rödlitzbachgebiet oder Lungwitzbachgebiet Bereiche mit geringerer Informationsdichte auf. Dazu gehören das Gebiet zwischen Rödlitzbach und Chemnitz und der südliche Senkenrandbereich.

Mülsengrundgebiet

Der Untergrund des westlich der Zwickauer Mulde gelegenen Mülsengrundes wird im Hangenden aus den Konglomeraten und Sandsteinen der Gera-Mülsen-Folge aufgebaut, die hier, lokal zusammen mit liegenden Leukersdorf-Folge den wichtigsten GWL bildet. Die quartären Talsedimente des Mülsenbaches spielen nur eine untergeordnete Rolle. Aufgrund ihrer reichen Vorkommen und der hohen Brunnendichte aus Trink- und Brauchwassernutzungen bilden die Rotliegendgrundwässer des Mülsengrundes eine wichtige Grundlage zur Charakterisierung typischer Rotliegendgrundwässer in der Vorerzgebirgssenke (Abschnitt 4.5) Dem Mülsengrundgebiet kommt aufgrund der dortigen hohen Aufschlussdichte rotliegender Grundwässer durch Trinkwasser- und Brauchwasserbrunnen eine besondere Bedeutung zu.

Die Gesteine der hier sehr mächtigen Leukersdorf-Folge (bis max. 700 m) reagieren aufgrund ihrer vorwiegend pelitischen Ausbildung plastisch auf geringe und mittlere tektonische Beanspruchung, sind daher nur gering geklüftet und so zumeist geringleitend oder hemmend (GWGL bis GWH). Ausnahmen bilden die konglomeratisch bis sandig ausgebildeten liegenden und hangenden Abschnitte der Leukersdorf-Folge sowie tektonisch stärker beanspruchte Bereiche, die eine mittlere bis gute Grundwasserführung aufweisen (GWL).

Mit zunehmender Teufe weisen jedoch selbst größere Klüfte und Störungen aufgrund von Verlehungen häufig eine dichte Versiegelung auf. Deshalb kann nach VEB HYDRO (1972) u.a. von einer Abnahme der Grundwasserleitereigenschaften mit der Teufe und einer allgemein guten Absperrung der hangend auflagernden Gera-/ Mülsen-Folge gegen "aufsteigende salinare Tiefenwässer" ausgegangen werden. Ein solcher Vorgang wird für den Bereich Mülsengrund auch auf Grundlage weiterer Anhaltspunkte eher ausgeschlossen (siehe unten und Abschnitt 4.6).

Die Gera-/ Mülsen-Folge ist auch im Bereich Mülsengrund meist psephitisch bis psammitisch ausgebildet und aufgrund einer gewissen Sprödigkeit recht klüftungsfreudig. Eine ergiebige Grundwasserführung ist meist an tektonische Strukturen gebunden. Die Grundwaserdynamik wird folgerichtig von hydraulisch leitfähigen Kluft- und Störungszonen bestimmt. Dabei sind wie auch im übrigen Untersuchungsgebiet erzgebirgische (NE-SW bis ENE-WSW) und vor allem herzynische (NW-SE bis NNW-SSE) Störungs- und Kluftzonen von Bedeutung, im Bereich Mülsengrund z.B. die Pöhlauer Sprünge. Die Störungszonen mit den sie parallel begleitenden Kluftschwärmen und Zerrüttungszonen erreichen nach VEB HYDRO (1972) Ausdehnungen von durchschnittlich 100 bis 200 m Breite. Die Störungs- und Kluftdichte ist auch im Gebiet Mülsengrund stark schwankend und wie ihre räumliche Verbreitung nur z.T. bekannt. Unklar bleibt so im Bereich des Mülsenfeldes, dem Revierabschnitt des ehemaligen Steinkohlenbergbau, die Fortsetzung einiger im Karbon aufgeschlossener Störungen und Kluftzonen. Große Störungen bzw. Störungszonen und ihre Querstörungen setzen sich jedoch in aller Regel bis an die Oberfläche fort. Ihr Ausstreichen wird durch den Verlauf größerer Täler gekennzeichnet, so z.B. der 2. Pöhlauer Sprung durch den Mülsengrund. Detailkartierungen im Raum Zwickau (Abschnitt 4.2.4.1) zeigen jedoch, dass die Störungsbahnen im Karbon und Rotliegenden oft ein unterschiedliches Einfallen zeigen, und sich auch innerhalb des Rotliegenden ändern können.

VEB HYDRO (1972) geht von meist mehreren wasserführenden Kluftsystemen mit z.T. unterschiedlichen Grundwasserdruckflächen auf ein und derselben Störungszone aus, die mit den anliegenden Vorflutern kommunizieren. Demgegenüber spricht SZYMCZAK (2000) für den Mülsengrund von lediglich einem Grundwasserstockwerk, d.h. von einer im wesentlichen einheitlichen Grundwasserdruckfläche aus. Allerdings weisen verschiedene Anhaltspunkte auf die Existenz hydraulisch getrennter GWL, zumindest in Teilbereichen des Mülsengrundes hin. So kommt an Teilen des 2. Pöhlauer Sprunges entlang der Trennfläche zwischen abgeschobener grundwasserleitender Gera-/Mülsen-Folge und gering leitenden Peliten der Leukersdorf-Folge aufgrund des Permeabilitätskontrastes zu Stauquellaustritten, wie z.B. am Tiefbrunnen WW Erlmühle Zwickau. Hydraulisch getrennte tiefere GWL sind hier insbesondere östlich des Pöhlauer Sprunges im Bereich der unteren Leukersdorf-Folge wahrscheinlich.

Auch hydrochemisch sind Raum Mülsengrund zwei Grundwasserstockwerke nachweisbar, die in ungestörten Bereichen kaum Vermischungen aufweisen (vgl. Typ 1 und Typ 2 in Ab-

schnitt 4.5). In tieferen Bereichen von Störungs- und Kluftzonen im Mülsengrundgebiet tritt häufig höher mineralisiertes, im oberflächennahen Bereich geringer mineralisiertes Grundwasser auf. Diese Mineralisation ist u.a. auf Lösungsvorgänge aus dem umgebenden Gestein über längere Zeiträume zurückzuführen (vgl. Abschnitt 4.6). Die Trennung beider Grundwassertypen erfolgt durch Abdichtung der Störungen durch aufquellende tonige Komponenten im mittleren Bereich der Leukersdorf-Folge. Dies gilt nicht bei lokal geringeren Mächtigkeiten bzw. bei psammitisch/psephitischer Ausbildung der Leukersdorf-Folge.

Das Auftreten von „Solen“ (zum Begriff vgl. Abschnitt 2.1) wie in historischen Unterlagen erwähnt, kann heute für Grundwässer der Gera-/Mülsen-Folge und oberen Leukersdorf-Folge nicht nachvollzogen werden (VEB HYDRO 1972). Es ist in diesen Wässern generell kein nennenswerter Tiefenwassereinfluss nachweisbar, wohl aber die enge Verbindung zu tagesnahem Grundwasser der Auflockerungszone.

Tiefe, hoch mineralisierte NaCl- Wässer, wie sie in den zentralen Bereichen der Steinkohlenreviere von Zwickau-Oelsnitz auftreten, sind im oberflächennahen Bereich nicht zu erwarten. Die dichte tonige Zusetzung der großen, tiefreichenden Störungszonen verhindert gleichermaßen das Aufsteigen wesentlicher Mengen hoch mineralisierter Wässer in die oberen GWL (Abschnitt 4.6). Dies kann auch für die bergbaubeeinflussten Bereiche des Mülsenfeldes weitestgehend ausgeschlossen werden.

Ergebnisse aus jüngste Untersuchungen zum Wasserhaushalt (ZWEIG 2007) standen zum Zeitpunkt der Recherche noch nicht zur Verfügung.

Grundwasserhaushaltsberechnungen ergaben für das Bilanzgebiet Mülsenbach einen Basisabfluss von rund 93 mm. Die nach verschiedenen Methoden (Abschnitt 2.7) berechnete zugehörige Grundwasserneubildung schwankt dagegen zwischen 94 (GEOFEM 2004), 123 (GEOFEM 2003) und 150 bzw. 198 mm (GEOFEMLAW bzw. NASIM) nach WASY (1998). Ein hohes Abflussdefizit ist also nur beim Vergleich mit der GWN nach WASY (1998) zu erkennen (Abschnitt 4.4.3). Sind letztere Berechnungen korrekt, könnte dies auf einen Grundwasserabfluss aus dem Bilanzgebiet, also auf eine Einschränkung des oberirdischen gegenüber dem unterirdischen Einzugsgebiet hinweisen, wie im Bereich westlich Mülsen-St.Jacob vermutet (Abschnitt 4.4.2) hinweisen. Ein solcher Grundwasserfluss ist sicher an hydraulisch aktive Störungszonen, hier die Pöhlauer Sprünge, gebunden. Diese können in höheren Bereichen bei hohen Durchlässigkeiten beträchtliche Mengen transportieren (Abschnitt 4.3) und weisen in größeren Teufen bei geringen Fließgeschwindigkeiten z.T. beträchtliche Reichweiten (vgl. Abschnitt 4.2.2). Ein solcher Abstrom aus dem Bilanzgebiet des Mülsenbach wird durch die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung bestätigt (Abschnitt 4.9).

Lungwitztalzone (westlicher Lungwitzbach) und Rödlitzbach

Auch im Bereich der hydraulisch gut leitfähig Lungwitztalzone (LTZ), wird das Grundwasserregime in entscheidendem Maße von den tektonischen Verhältnissen bestimmt. Die LTZ ist in ihrem zentralen Teil zwischen St. Egidien und Oberlungwitz als E-W Kluftsystem parallel zur Granulitgebirgsrandstörung angelegt und schwenkt im W in herzynisches, im E in erzgebirgisches Streichen um. Ob es sich bei der LTZ um eine Störungszone oder lediglich um eine weitreichende Kluftzone handelt ist aufgrund bisher nicht belegter wesentlicher Versetzungsbeträge der Gesteinsfolgen entlang dieses tektonischen Elementes unsicher. Die

LTZ wird von herzynischen, rheinischen und erzgebirgischen Querstörungen begleitet, die im Kreuzungsbereich mit der LTZ häufig erhöhte hydraulische Leitfähigkeiten aufweisen (VEB HYDRO 1982b, Verfasser u.v.a.).

Die im Bereich der LTZ vorrangig anstehende Leukersdorf-Folge weist häufig Doppel-Porositätseigenschaften auf. Sie bildet, gemeinsam mit der Gera-/ Mülsen-Folge soweit diese verbreitet, mehrere Grundwasserstockwerke (STORCH ET AL. 1996). Aufgrund der sehr komplexen Lagerungsverhältnisse und der heterogenen kleinräumig wechselnden Lithologie ist die Aushaltung einzelner Grundwasserleiterhorizonte nicht möglich. Nach S in Richtung zentrale Vorerzgebirgssenne/Ortslage Lichtenstein nimmt die Mächtigkeit und somit die Bedeutung der hangenden Gera-/ Mülsen-Folge zu.

Die LTZ ist die zentrale Druckentlastungszone für mehrere anliegende unterirdische Teileinzugsgebiete. Diese Funktion konnte durch die hydraulische Modellierung belegt werden. Danach entlasten sogar Grundwässer aus dem Bereich des südlichen Vorerzgebirgssennenrand in die Lungwitztalzone. Die Störungen bzw. Kluftzonen im Bereich des Lungwitztals wirken sowohl hemmend (Grundwasserbarriere) als auch leitend. Besonders hohe hydraulische Leitfähigkeiten sind in Störungskreuzen mit Transmissivitäten zwischen $2 \cdot 10^{-4}$ bis $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ nachgewiesen (BEIER et al. 1986). Zahlreiche Brunnen / Wasserfassungen befinden sich entlang der parallel und quer zur Lungwitztalzone verlaufenden Kluftzonen. So fungiert z.B. eine SSW-NNE verlaufende Querstörung im Oberlungwitzer Stadtteil Steinberg als Teilentlastungszone (Bereich Fassung 12.12.4. in VEB HYDRO 1982b).

Auch das nördlich von Lichtenstein von SE auf die LTZ treffende Rödlitzbachtal stellt eine Druckentlastungszone dar, wobei die dem Tal folgende Rödlitzer Hauptverwerfung jedoch hier, in ihrem nördlichsten Abschnitt, weniger stark hydraulisch wirksam ist. Im Bereich der Gera-/ Mülsen-Folge im Raum Lichtenstein schwanken die Transmissivitäten erfahrungsgemäß meist zwischen 3 bis $8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, wobei an den Fassungen 13.2. und 13.7. im SE von Lichtenstein um eine Größenordnung geringere Transmissivitäten ermittelt wurden. An den Fassungen 10.1. (zwischen Lichtenstein und St. Egidien) und 10.2. (westlich von St. Egidien) konnte ein die grundwasserhemmende Wirkung zweier erzgebirgisch streichender Querstörungen beobachtet werden (VEB HYDRO 1982b).

Aufgrund der komplizierten tektonischen Situation weist dieses Gebiet eine komplexe hydraulische Situation auf. Die starke tektonische Durchbewegung der Rotliegend-Sedimente führte zur Ausbildung eines Kippschollenmosaik. In diesem Kontext kam es zur Abschiebung der Gera-/ Mülsen-Folge auf der Leukersdorf-Folge und zur Schaffung tektonisch bedingter geologischer Grenzen (Abschnitte 3.3 und 4.3.1). Die, auch nach der Teufe, oft hohe Durchlässigkeit der Rödlitzer Hauptverwerfung in ihren nördlichen und mittleren Abschnitten führt dort zur Ausbildung mächtiger Grundwasserstockwerke (siehe nachfolgender Abschnitt).

Die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung belegen die starke hydraulische Aktivität des Kreuzungsbereiches Rödlitzer Hauptverwerfung/ Lungwitztalzone.

Grundwasserhaushaltsuntersuchungen für das Bilanzgebiet Lungwitzbach zeigen ein gute Übereinstimmung der nach GEOFEM 2003 ermittelten Grundwasserneubildung von 106

mm mit dem Basisabfluss (103 mm). Allerdings berechnet die aktuelle GEOFEM Version 2004 eine GWN von lediglich 77 mm. Alle Werte liegen jedoch deutlich unter der GWN nach NASIM u.a. (WASY 1998) die mit Werten zwischen 145 und 175 mm vermutlich als zu hoch einzuschätzen ist (vgl. Abschnitt 4.4.3.2). Geht man dennoch davon aus, dass letztere korrekt sind, könnte ein solches Defizit zum Basisabfluss durch einen Grundwasserabfluss aus dem Bilanzgebiet entlang der großen Störungs- bzw. Kluftzonen Lungwitztalzone, 2. Pöhlauer Sprung und Rödlitzer Hauptverwerfung (RHV) erklärt werden. So vermutet C&E (2001) auf Grundlage elektrischer Widerstands- und radiometrischer Messungen einen oberflächennahen Grundwasserabfluss entlang der Rödlitzer Hauptverwerfung nach NW. Dies führt praktisch zu einer Einschränkung des unterirdischen gegenüber dem oberirdischen Einzugsgebiet. Dieses Defizit kann durch einen etwaigen Zustrom in das Bilanzgebiet aus südlicher Richtung, z.B. entlang der RHV und anderer Störungen nicht ausgeglichen werden. Der Rödlitzbach folgt fast über die gesamte N-S Erstreckung der Vorerzgebirgssenkke dem Ausstrich der Rödlitzer Hauptverwerfung. Hier kommt es sehr wahrscheinlich zur Versickerung einer unbekannten Menge von Flusswasser. Dies könnte zum einem Defizit des Basisabflusses beitragen (siehe oben).

Inwieweit ein weiter reichender Abfluss von Grundwasser über intermediäre oder regionale Grundwasserfließsysteme über die genannten tektonischen Strukturen aus dem Bilanzgebiet Lungwitzbach hinaus nach NW in Richtung Pforte von Meerane stattfindet ist unbekannt. Die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung lassen zumindest keinen wesentlichen Abstrom aus dem Bilanzgebiet Lungwitzbach erkennen.

Weiterhin kann ein gewisser Grundwasserzustrom in die Lungwitztalzone - und damit in das Bilanzgebiet Lungwitzbach - aus Bereichen nördlich der oberirdischen Einzugsgebietsgrenze des Bilanzgebietes vermutet werden. Dies würde eine Ausweitung der unterirdischen Einzugsgebiete entlang der um N-S orientierten Querstörungen nach N deutlich über die Granulitgebirgsrandstörung voraussetzen (vgl. Anlage 4). Für diese Annahme spricht, dass im unmittelbar nördlich angrenzenden Granulitgebirgsbereich Gesteine mit in den oberflächennahen Abschnitten stark gestörter Lagerung und zerrütteter grusig-lehmiger Verwitterungszone sowie hydraulisch aktive Störungszonen verbreitet sind (VEB HYDRO 1982b u.a.). Eine Abschätzung der zufließenden Grundwassermengen ist auf Grund fehlender Kenntnisse über die hydraulische Wirkung dieser Gesteinskomplexe nicht möglich. Die Anwendung der hydraulischen Modellierung lässt dagegen keine signifikanten Zuströme aus Bereichen nördlich der Bilanzgebietsgrenze erkennen.

Die im Bereich der Lungwitztalzone und des unteren Rödlitzbaches sehr komplexen hydraulischen Verhältnisse sind bisher nur unzureichend untersucht. Bekannt ist die hohe hydraulische Wirksamkeit der LTZ und der Rödlitzer Hauptverwerfung (wie durch das hydraulische Modell bestätigt). Defizite bestehen vor allem in der lückenhaften Kenntnis der lithologischen und tektonischen Situation sowie der quantitativen Komponente des aus den Bilanzbetrachtungen abgeleiteten nordwestlich bis westlich gerichteten Grundwasserflusses entlang dieser Kluftzonen bzw. Störungen. Wenig bekannt sind darüber hinaus die strukturellen Gegebenheiten im unmittelbar nördlich angrenzenden Granulitgebirgsbereich und deren Einfluss auf einen Grundwasserzustrom aus nördlicher Richtung. Zukünftige Arbeiten im Bereich des Bilanzgebietes Lungwitzbach sollten insbesondere einschließen (vgl. auch Maß-

nahmen in Abschnitt 4.2.4.1):

- Untersuchungen zur Geometrie der Grundwasserströmungsfelder (Monitoring)
- teufenabhängige Parameterermittlung zur Charakterisierung der GWL und Grundwasserhemmer (GWH)
- Geologisch-tektonische und hydrogeologische Kartierungen zur Erfassung von hydraulisch aktiven Störungen im nördlich anstehenden Grundgebirge
- Errichtung von Grundwassermessstellen zur Erfassung und Beschreibung hydraulisch wirksamer Bereiche im nördlichen Grundgebirgsbereich
- Untersuchungen zum Infiltrationsverhalten des Rödlitzbachs in den Untergrund

Raum Oelsnitz-Lugau-Oberlungwitz

Auch im Raum Lugau-Oelsnitz- Oberlungwitz wird die Grundwasserdynamik maßgeblich von tektonischen Strukturen bestimmt. Wie in den übrigen Teilen der Vorerzgebirgssenne sind auch hier herzynische Strukturelemente als dominante hydraulisch leitende bzw. hemmende Elemente von besonderer Bedeutung. Zusätzliche Erkenntnisse dazu brachte hier vor allem der alte Steinkohlenbergbau in Lugau-Oelsnitz.

In den Entlastungszonen der Täler, so z.B. am Oberlauf des Rödlitzbachs, im Bereich östlicher Lungwitzbach und Hegebach, treten häufig gespannte Grundwässer auf. Entlang auch nach der Teufe gut durchlässiger Störungen ist die Ausbildung eines mächtigen hangenden Grundwasserstockwerkes zu beobachten Ursache ist die hydraulische Verbindung zwischen dem quartären Talgrundwasserleiter bzw. dem Grundwasserleiter der oberflächennahen Auflockerungszone und den oberen Grundwasserleitern der liegenden Festgesteine. Dies betrifft z.B. die mittleren und nördlichen Bereiche der Rödlitzer Hauptverwerfung.

Der hydrogeologische Stockwerksbau ausserhalb von Störungszonen ist deutlich differenzierter. Leider liegen hier nur unzureichend Informationen vor da die Mehrzahl erkenntnisbringender Grundwassernutzungen an eben solche Störungsbereiche gebunden sind.

Wasserhaushaltsbetrachtungen für das Bilanzgebiet Würschnitz (Abschnitt 4.4.3.3) ergaben einen Basisabfluss von rund 76 mm. Die mit GEOFEM 2004 ermittelte Grundwasserneubildung über dem Bilanzgebiet lag mit 86 mm nur geringfügig, jene nach GEOFEM 2003 mit 109 mm deutlicher darüber. WASY (1998) ermittelte u.a. unter Verwendung des Wasserhaushaltsmodells NASIM (vgl. Verfahren 2 in Abschnitt 2.7.3) für einige Teileinzugsgebiete der Würschnitz Werte zwischen 91 und 210 mm. Dieses mehr oder minder deutliche Defizit des Basisabflusses gegenüber der GWN könnte auf eine Einschränkung des unterirdischen gegenüber dem oberirdischen Einzugsgebiet hinweisen. Diese Einschränkung könnte über einen Abstrom von Grundwasser im NW des Bilanzgebietes über die Rödlitzer Hauptverwerfung und/oder die sich östlich anschließenden herzynischen Störungen/Störungszonen realisiert werden. In dieses Bild fügen sich auf Grundlage elektrischer Widerstands- und radiometrischer Messungen getroffene Annahmen ein, die von einem oberflächennahen Grundwasserabfluss entlang der Rödlitzer Hauptverwerfung nach NW ausgehen (C&E 2001).

Die Erkenntnisse aus der großräumigen hydraulischen Modellierung legen einen solchen Abstrom von Grundwasser nahe, z.B. im weiteren Bereich der vermuteten südöstlichen Fortsetzung der Plutoverwerfung. Ein geringer Teil der Grundwasserneubildung trägt, zusammen mit Zuflüssen aus dem Bilanzgebiet Lungwitzbach, zur Auffüllung der noch in Flutung be-

findlichen Steinkohlengruben des Lugau-Oelsnitzer Reviers beitragen. Von einem Abstrom von Grundwasser nach Süd ist aufgrund des regionalen nach S ansteigenden Druckgradienten nicht auszugehen.

Die Wirkung weitreichender Grundwasserfließsysteme bleibt nicht auf einen möglichen nordwestlich gerichteten Abstrom beschränkt. Zuströme von Grundwasser und damit eine Erweiterung der unterirdischen Einzugsgebiete sind auch aus Süden aus dem Erzgebirgskristallin möglich. Inwieweit solche über den südlichen Senkenrand verlaufenden Störungs- und Kluftzonen Wasserwegsamkeiten darstellen ist von der hydraulischen Durchlässigkeit dieser, in der Regel herzynisch ausgerichteten tektonischen Elemente, insbesondere im Grundgebirge abhängig. Indizien gibt es insbesondere für den Raum Jahnsdorf. So sind dort, in den Erzgebirgsphylliten einige ergiebige, artesische Kluft-, bzw. Störungsbereiche durch Bohrungen aufgeschlossen. Dabei gehören z.B. herzynische Strukturen bei Dorfchemnitz oder im Tal der Zwönitz bei Zwönitz sowie Kreuzungsbereiche herzynischer und erzgebirgischer Strukturen, z.B. bei Affalter. Eine hydraulische Bedeutung dieser Störungen im Sinne intermediärer oder sogar regionaler Fließsysteme (vgl. Abschnitt 4.2.2) konnte bisher jedoch nicht nachgewiesen werden. Das im hydraulischen Modell simulierte Grundwasserregime lässt einen solchen Zustrom zumindest zu.

Gebiet östlich der Rödlitzer Hauptverwerfung: Raum Hohndorf - Oelsnitz

Die Leukersdorf-Folge wird westlich der Rödlitzer Hauptverwerfung entlang dieser um ca. 200 m abgeschoben, so dass hier Gesteine der Gera-/Mülsen Folge anstehen. Daraus resultiert ein Transmissivitätskontrast von ein bis zwei Größenordnungen zwischen Störungsbahn/ Gera-/Mülsen-Folge und der östlich anstehenden Leukersdorf-Folge. Dies zeigt sich in der Ausbildung einer hydraulischen Barriere entlang der Rödlitzer Hauptverwerfung im Bereich Hohndorf-Waldesruh. Der Grundwasserstau verursacht zahlreiche artesische Grundwasseraustritte entlang kleinerer hydraulisch aktiver Kluftscharen und Störungszonen herzynischer und erzgebirgischer Ausrichtung. Schwerpunkte sind die Entlastungszonen der anliegenden Täler wie Brunnen z.B. im Rödlitzbachtal bei Rödlitz und im Hegebachtal südwestlich von Oelsnitz zeigen. Durch Pumpversuche entlang der Rödlitzer Hauptverwerfung ermittelte Transmissivitäten zeigen Werte zwischen $1,5$ und $3,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Brunnen 9.6. nahe Vereinigtfeld Schacht südl. Hohndorf) und 4 bis $7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ im Rödlitzbachtal (VEB HYDRO 1982a). Trotzdem ist die hydraulische Wirksamkeit vieler - in Bezug auf die Rödlitzer Hauptverwerfung - Parallel- und Querstörungen, ob als Grundwasserfließwege oder Grundwasserbarrieren, noch weitestgehend ungeklärt. Dies betrifft u.a.

- die erzgebirgische Querstörung bei Rödlitz
- die Verlängerung der Ortmannsdorfer Spalte nach Ost (erzgebirgisch)
- zahlreiche vermutete herzynisch verlaufende Störungen westlich der Rödlitzer Hauptverwerfung

Raum Oelsnitz-Lugau-Niederwürschnitz-Neuwürschnitz

In diesem tektonisch stark gestörten und vom historischen Steinkohlenbergbau geprägten Gebiet stehen Gesteine der Leukersdorf-Folge und, am südlichen Senkenrand, der Härtensdorf-Folge an. Störungen verlaufen hier über die Einzugsgebietsgrenzen der Zwickauer Mulde im N und der Würschnitz im S hinweg. Dies führt zu vielfältigen hydraulischen Verbindungen zwischen den unterirdischen Einzugsgebieten. Von einer Verschiebung der Ein-

zugsgebietsgrenzen entlang hydraulisch leitfähiger Störungen nach S, in Richtung des weniger gut durchlässigen Grundgebirges ist lokal auszugehen (vgl. Abschnitte 4.2.3 und 4.4.2). Die Rödlitzer Hauptverwerfung besitzt hier wohl nicht mehr jene Barrierewirkung wie im nördlich angrenzenden Raum. Im Bereich des alten Steinkohlenbergbaus ist aufgrund der schlechten hydraulischen Kopplung einzelner Störungen und der generell geringen Grundwasserführung im Karbon die Grundwasserergiebigkeit der Störungssysteme eher gering. Dies belegen auch niedrige Transmissivitäten und relativ geringe Zuflussmengen bei Schachtabteufungen (VEB HYDRO 1982a).

Im Lugau-Oelsnitzer Revier wurden bei Schachtabteufungen und Vortrieben in Tiefen von +10 bis –220 mNN, Zutritte von höher mineralisierten Grundwässern (Solen, Salzwässer und Brackwässer, vgl. Begriffsdefinition in Abschnitt 2.1) aus Gesteinen der Härtensdorf-Folge, Planitz-Folge und der tieferen Leukersdorf-Folge dokumentiert (vgl. Abschnitt 4.2.1 und Anlage 3). Das Auftreten höher mineralisierter Grundwässer im unteren Rotliegenden wurde auch durch die neue Tiefbohrung in Oelsnitz bestätigt (FELIX et al. 2006, 2007)

Raum Erlbach-Ursprung-Leukersdorf-Jahnsdorf-Niederdorf

Für dieses Gebiet, östlich des Lugau-Oelsnitzer Steinkohlenreviers, lagen keine Daten zur hydraulischen Aktivität von Störungen vor.

Die tektonische Anlage des südlichen Vorerzgebirgsrandes, gilt zumindest für den Bereich Jahnsdorf (Niederdorf im Westen und nördliches Adorf im Osten) als sicher (Abschnitt 4.2.3). Hier ist auch für die den Rand querenden zumeist herzynischen Störungen hydraulische Wirksamkeit zu erwarten.

Darüber hinaus vermutet VEB HYDRO (1982a) störungsgebundene "aufsteigenden Grundwässer" aus dem Bereich des Rotliegenden und des Erzgebirgskristallins. Bei den störungsgebundenen Grundwässern handelt es sich jedoch sicherlich um aus dem Erzgebirgskristallin von S anströmende Grundwässer, die im Bereich zugesetzter Rand- bzw. Querstörungen auf Grund des Durchlässigkeitskontrastes austreten bzw. sich entlang gut durchlässiger tektonischer Zonen sammeln. Das es sich dabei um, wie mglw. angedeutet und in älterer Literatur erwähnt, „aufsteigende Tiefenwässer“ handelt muss jedoch bezweifelt werden (Abschnitt 4.6). Ein ergiebiges störungsbedingtes Grundwasservorkommen tritt im Kreuzungsbereich von Senkenrand und herzynischem Störungssystem im Bereich des Leukersdorfer Porphyrtuffs auf.

Die Grundwasserdynamik des Raumes Oelsnitz-Lugau-Oberlungwitz wird deutlich von hydraulisch aktiven herzynischen „Hauptstörungen“ und begleitenden erzgebirgischen sowie anders orientierten Querstörungen bestimmt. Trotz zahlreicher Aufschlüsse infolge des alten Steinkohlenbergbaus sowie durch diverse Grundwassernutzungen auf Störungen in den Talzonen bleiben viele hydraulische Zusammenhänge ungeklärt. Dazu gehören u.a. die:

- Klärung der hydraulischen Wirksamkeit von parallel oder quer zur Rödlitzer Hauptverwerfung verlaufenden Störungen als präferentielle Grundwasserfließwege oder –barrieren.
- Lokalisierung und Quantifizierung des Grundwasserflusses entlang von Störungen zwischen den Einzugsgebieten der Würschnitz und der Zwickauer Mulde
- Grundlegende Untersuchungen zum Verlauf und zur hydrogeologischen Relevanz von Störungen im Raum Niederdorf/Jahnsdorf bis Erlbach/Ursprung, östlich des Lugau-Oelsnitzer Steinkohlenreviers

4.2.4.3 Östlicher Teil der Vorerzgebirgssenke

Der östliche Teil der Vorerzgebirgssenke umfasst die Ortslage Chemnitz sowie die sich östlich anschließenden Bereiche. Die Entwässerung des Gebietes erfolgt im E zur Zschopau, im Zentralteil zur Chemnitz und im W zur Zwickauer Mulde.

Einen Überblick über wichtige hydrogeologische Einheiten im östlichen Teil der Vorerzgebirgssenke und ihre Grundwasserführung gibt Tabelle 14. Zu weiteren Angaben zu den hydrogeologischen Eigenschaften und hydraulischen Parametern vgl. auch Abschnitt 4.2.1 und Anlage 3.

Tabelle 14 Grundwasserführung der geolog. Einheiten der östlichen Vorerzgebirgssenke

(nach VOGEL 1992, verändert)

Hauptgruppe	Grundwasserführung		Untergruppe	Geologische Einheit bzw. Folge/Teilfolge	Transmissivität [m^2/s] (Orientierungswert)
A	gut bis sehr gut; auf Klüften und im Porenraum		A1	Zeisigwald-Tuff (Obere Leukersdorf-Teilfolge)	10^{-3} bis 10^{-5}
B	mittel bis gut; in mittel bis stark klüftigem Gestein		B1	Hainichen-Schichten Flöha-Schichten	10^{-4} bis 10^{-5} (oberflächennah bis 10^{-3})
			B2	Härtensdorf-Folge	10^{-4} - 10^{-3} (ZGI 1984 u.a.) (Ausstrichsbereiche), sonst 10^{-5}
			B3	Planitz-Folge	oberflächennah allg. 10^{-3} - 10^{-5} (ZGI 1984 u.a.)
			B4	psammitisch-psephitische Bereiche der Leukersdorf-Folge	10^{-4} bis 10^{-5} (ZGI 1984 u.a.)
C	fehlend oder lokal gering; in wenig klüftungsfreundlichen Gesteinen		C1	Tonschiefer und Phyllite (Ordoviz. bis Kambrium); andere kristalline Gesteine des die VES umgebenden Grundgebirges	$<10^{-5}$ (vgl. Tabelle 10)
			C2	Schluff- und Tonsteine der Unteren Leukersdorf-Folge	$<10^{-5}$ bis 10^{-6} (ZIMMERMANN 1998 u.a.)
D	quartäre Lockergesteine	gut bis sehr gut	D1	Tal- und Terrassenschotter; lokal glaziale Kiese auf Hochlagen; Auflockerungszone	meist $<10^{-2}$ bis 10^{-4} allg. 10^{-3} - 10^{-5}
		gering bis fehlend	D2	Auelehne (keine Grundwasserführung) Auffüllung	$<10^{-6}$ i.d.R. $\leq 10^{-5}$

Auch im östlichen Teil der Vorerzgebirgssenke sind die wesentlichen Grundwasservorkommen an Kluft- und Störungszonen sowie an die oberflächennahe Auflockerungszone gebunden. Känozoische Sedimente sind nur lokal von Bedeutung. Dabei handelt es sich im wesentlichen um Quartärablagerungen der größeren Flüsse Chemnitz, Zschopau/Flöha und Mulde/Triebisch. Sie werden z.T. auch wasserwirtschaftlich, z.B. zur Grundwassergewinnung genutzt. Darüber hinaus sind tertiäre Hochflächensedimente für die Grundwasserneubildung von Bedeutung. Die Mächtigkeit der meist lehmig-steinigen Verwitterungsdecke schwankt nach VEB HYDRO (1978) zwischen 0 und 3 m. Dieser Verwitterungshorizont

sowie lokal in morphologischen Senken auftretende Schwemmsedimente, Gehängelehme, Hangschuttdecken und im N auch Lößlehmauflagerungen können bei entsprechender Mächtigkeit Einfluss auf die GWN haben.

Erkenntnisse zu den regionalen grundwasserdynamischen Zusammenhängen im östlichen Teil der Vorerzgebirgssenke sind, z.B. in Form großräumiger Hydroisohypsenpläne / Stichtagmessungen aus ZGI (1984) und den landesamtlichen Neubearbeitungen (HYK50 2006, HÜK200 2006) bekannt. Für einige Gebiete, z.B. entlang des Vorerzgebirgssenkenrandes liegen keine zuverlässigen vergleichbaren Daten vor.

Lokal sind durch Detailuntersuchungen, z.B. aus Bauvorhaben, Grundwassererschließungen im Großraum Chemnitz und aus Sanierungs- und Forschungsvorhaben genauere Kenntnisse verfügbar. Dazu gehören z.B. Arbeiten des SOLARIS Projektes Chemnitz (ZIMMERMANN 1998 u.a.) und die zahlreichen Untersuchungen im Bereich der Deponie "Weisser Weg" in Chemnitz (KRÄMER 2000, EULENBERGER 1994, TUNGER 1991 u.v.a.). Diese bestätigen, dass die Grundwasserdynamik im Kontext des regionalen Druckgefälles auch im Ostteil der Vorerzgebirgssenke maßgeblich von tektonischen Strukturen bestimmt wird. Es lassen sich in regionalem Maßstab Hauptfließrichtungen des Grundwassers nachweisen, wobei Störungen, Kluft und Zerrüttungszonen präferentielle Fließwege darstellen. Lokal können auf Grundlage von Detailuntersuchungen (z.B. oben genannte Projekte) verschiedene Grundwasserstockwerke nachgewiesen werden. Deren Ausbildung ist jedoch aufgrund der sehr wechselhaften Lithologie und Tektonik starken räumlichen Änderungen unterworfen, was eine einheitliche Darstellung erschwert. Lokale Störungen des Grundwasserstockwerksbaus durch hydraulische Verbindungen zwischen hydrogeologischen Einheiten verschiedener Grundwasserstockwerke des Permokarbon sind bei entsprechender Tektonik auch nach VOGEL (1992), EULENBERGER (1994) u.a. zu erwarten. Die Diskussion der Grundwasserstockwerksbildung in der Vorerzgebirgssenke und ihre Einbindung in Grundwasserfließsysteme im Vorerzgebirgsmaßstab sind Bestandteil der Abschnitte 4.2.1 und 4.2.2.

Auch für den östlichen Teil der Vorerzgebirgssenke ist davon auszugehen, dass die Grundwasserdynamik von den zahlreichen tektonischen Schwächezonen im Zusammenwirken mit lokalen, intermediären und regionalen hydraulischen Druckregimes bestimmt wird. Dabei entlasten die oberflächennahen rotliegenden bzw. quartären Grundwasserleiter in die nächstgelegenen Talvorfluter. Die nach der Teufe i.d.R. abnehmende Klüftigkeit führt nach VEB HYDRO (1978) in weniger gut grundwasserleitenden Gesteinen, insbesondere in den meisten kristallinen Folgen des umgebenden Grundgebirges, zu einem verstärkten oberflächennahen hypodermischen Abfluss im Bereich der Verwitterungszone.

Generell weist die östliche Vorerzgebirgssenke, speziell das Gebiet östlich der Chemnitz, eine geringere tektonische Überprägung und resultierend, eine allgemein geringere Grundwasserführung als die Bereiche westlich der Chemnitz auf.

Die oberflächennahe Grundwasserdynamik wird in der östlichen Vorerzgebirgssenke vom Relief bestimmt. Die unterirdischen Einzugsgebiete entsprechen also i.d.R. den zugehörigen oberirdischen Einzugsgebiete. Wesentliche Abweichungen zwischen beiden sind entlang von Störungszonen sowie im Kontaktbereich unterschiedlich gut durchlässiger Gesteine, z.B. entlang des Senkenrandes zu erwarten. Eine solche Differenzierung ist jedoch aufgrund der sehr begrenzten Datenlage nur selten und nur lokal möglich und nicht auf größere Einzugsgebiete einheitlich anwendbar (vgl. Abschnitte 2.7.2 und Anlage 4).

Wasserhaushaltsberechnungen (vgl. Abschnitt 4.4.3.3) ergaben für den Basisabfluss (Abschnitt 2.7) über dem Bilanzgebiet Chemnitz 9,5 mm. Die nach GEOFEM 2004 ermittelte Grundwasserneubildung lag dem gegenüber bei 64 mm (davon 53 mm langsame Komponente), die nach GEOFEM 2003 bei 111 mm (39 mm).

KRÄMER (2000) nennt für Siedlungsgebiete am östlichen Stadtrand von Chemnitz eine Grundwasserneubildung zwischen 47 und 63 mm, für dünn besiedelte Bereiche im Raum Zeisigwald 79 bis 111 mm.

Der im Vergleich zur berechneten Grundwasserneubildung deutlich geringere Basisabfluss ist unter anderem auf anthropogene Faktoren wie eine Überschätzung der tatsächlichen GWN aufgrund einer unterschätzten Versiegelung, Versinkung von Flusswasser und anthropogene Wasserentnahmen zurückzuführen. Darüber hinaus könnte dieses Defizit auch auf einen Grundwasserabstrom entlang von Störungszonen aus dem Bilanzgebiet hinaus hinweisen. Prädestiniert sind dafür die als hydraulisch aktiv bekannte Störung im Chemnitztal sowie Störungen bzw. Kluftzonen in der Lungwitztalzone im Bereich der Ortslagen Wüstenbrand und Grüna (vgl. Abschnitt 4.4.3.3). Berechnungen mit dem großräumigen hydraulischen Modell können diese Annahme weder unterstützen noch ausschließen.

Für das am westlichsten gelegene Bilanzgebiet Zschopau wurde nach GEOFEM 2000 eine Grundwasserneubildung von 67 mm (Anteil langsame Komponente 24 mm) berechnet. Der Anteil des Rotliegenden an der Gesamtfläche des Bilanzgebietes beträgt rund 80%. Die übrigen 20% umfassen im wesentlichen kristalline Gesteine des Erzgebirges.

Südliches Vorland (Erzgebirgskristallin)

Im südlichen Randbereich der Vorerzgebirgssenke zwischen Adorf und Euba, treten vor allem wenig geklüftete Tonschiefer und Phyllite mit lokalen kleinräumigen Einschaltungen gut geklüfteter Gesteine wie Quarzitschiefern und Epibasiten auf. Aufgrund des sehr begrenzten Auftretens gut klüftiger Gesteine ist die Grundwasserführung insgesamt gering. Sie werden nach ihrem hydraulischen Charakter deshalb der Gruppe 3a in Tabelle 10 zugeordnet. Vorhandene Kluft- und Störungszonen sind häufig tonig-mylonitisch zugesetzt und daher kaum grundwasserleitend. Allerdings erwähnt WASTERNACK (1958) in diesem Raum erzgebirgisch streichende Zerrüttungszonen und herzynische Störungen mit z.T. steilem Einfallen, die potenziell Grundwasserbewegungsbahnen darstellen können, so z.B. im Raum Kleinolbersdorf-Altenhain-Euba. Dies gilt sicherlich für die Kreuzungsbereiche dieser tektonischen Strukturen, insbesondere im Bereich der oberflächennahen Auflockerungszone sowie in den Talbereichen (VEB HYDRO 1978, Verfasser). In letzteren ist eine hydraulische Anbindung an die gut leitfähigen quartären Flussschotter gegeben. Dies kann – ein entsprechendes Druckgefälle vorausgesetzt - auch zur Speisung von Kluft- und Störungsbereichen in den liegenden Phylliten und Tonschiefern führen (vgl. oben und Abschnitt 4.4.3.3).

Eine wesentlicher Grundwasserfluss über den Vorerzgebirgsrand hinaus nach S ist aufgrund der Geländemorphologie, des regionalen hydraulischen Gefälles – soweit bekannt und der geringen hydraulischen Leitfähigkeit der im südlichen Vorland anstehenden kristallinen Gesteine (siehe oben) unwahrscheinlich. In umgekehrter Richtung ist entlang von Störungs- und Kluftzonen die über den Beckenrand hinwegsetzen ein gewisser Grundwasserfluss in die Vorerzgebirgssenke möglich. Dies betrifft vor allem die bis Adorf im Osten wohl tektonisch

ausgebildete Kontaktzone zwischen Erzgebirgskristallin und Rotliegendem mit den begleitenden tektonischen erzgebirgisch und herzynisch ausgerichteten Strukturen. Eine Migration größerer Grundwassermengen wird jedoch nicht erwartet. Dies wird durch die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung bestätigt. Für diese Annahme spricht außerdem die große Differenz in den Schüttungen der Quellgebiete in diesem Raum, die auf ein geringes mittleres Grundwasserdargebot schließen lassen. Es beträgt nach HYDRO (1978) lediglich 3-6 % der Niederschlagsmenge. Die Grundwasserneubildungsmenge ist hier folgerichtig, im Vergleich zum zentralen und westlichen Teil der Vorerzgebirgssenke, gering (siehe oben und Abschnitt 4.4.3).

Nördliches Vorland (Granulitgebirge)

Das nördliche Vorland der östlichen Vorerzgebirgssenke erhebt sich morphologisch leicht über die Vorerzgebirgssenke hinaus.

Es wird aus den Granuliten, Gneisen, Gneisglimmerschiefern, Gabbros und Serpentinitten des Granulitgebirges und den Glimmerschiefern, Phylliten, Ton- und Grauwackenschiefer sowie Epibasiten seines inneren und äußeren Schiefermantels aufgebaut (vgl. Abschnitt 3.2). Hydrogeologisch können diese Gesteine im wesentlichen der Gruppe 3a, und damit also den "z.T. klüftungsfreudigen Gesteinen" zugeordnet werden (vgl. Tabelle 10 in Abschnitt 4.2.1). Sie weisen nach VEB HYDRO (1978) eine geringe bis mittlere Grundwasserführung bei geringer bis mäßiger (Granulite, z.T. Glimmerschiefer) Klüftung auf. Eine Ausnahme bilden einige Gesteine, die unmittelbar an die Vorerzgebirgssenke grenzenden äußeren Schiefermantels, hier insbesondere die phyllitischen Gesteine, die erfahrungsgemäß eine sehr geringe Klüftung mit resultierender sehr geringer Grundwasserführung (Gruppe 4 in Tabelle 10) aufweisen.

Neben den quartären Ablagerungen der größeren Täler ist auf den nördlichen Hochflächen eine weit verbreitete 2 bis 4 m mächtige Lößdecke für die Grundwasserneubildung von Bedeutung

Lokal sind im Bereich der oberflächennahen Auflockerungszone gute Wasserwegsamkeiten nachgewiesen. Die hydrogeologischen Gesteinseigenschaften des unverwitterten Gesteins, hier insbesondere die Klüftung, werden maßgeblich von der strukturellen Ausbildung der Gesteine infolge tektonischer Beanspruchung bestimmt. Dabei stellt die Granulitgebirgsrandstörung, zumindest lokal, ein hydraulisch aktives Element dar (siehe unten). Ebenfalls von Bedeutung sind herzynisch und erzgebirgisch orientierte Störungen, im Bereich des inneren Schiefermantels und des Granulits außerdem N-S Richtungen (Abschnitte 3.3 und 4.3). Entlang dieser Störungs- und Klüftzonen ist eine gute Grundwasserführung, auch mit tiefer reichender Grundwasserzirkulation bzw. tieferen Grundwasserfließsystemen möglich (vgl. Abschnitte 4.2.2, 4.2.3 und 4.2.1 / Anlage 3)

Verschiedene Indizien meist als Ergebnis tektonischer/hydrogeologischer Kartierungen und von Grundwassernutzungen weisen auf die (wechselhafte) hydraulische Aktivität tektonischer Elemente im Norden der östlichen Vorerzgebirgssenke hin.

Die tektonischen Verhältnisse im Bereich des Schiefermantels westlich des Pleißbach-Gebiets bis in den Raum Hohenstein-Ernstthal bestätigen die Vermutungen nach VEB HYDRO (1978), wonach aufgrund einer höheren tektonischen Beanspruchung hier eine gewisse Grundwasserführung auftritt. So zeigen herzynische Störungen zwischen Limbach-

Oberfrohna/Röhrsdorf und Gröna eine gute Grundwasserführung. Dies betrifft sowohl das Einzugsgebiet des oberen Pleißbachs mit zahlreichen ergiebigen Wasserfassungen als auch die Granulitgebirgsrandstörung selbst. Hier dürfte ein gewisser Grundwasserfluss nach S, mglw. auch über das oberirdische Einzugsgebiet hinaus, in die Vorerzgebirgssenke erfolgen. Andererseits lassen Grundwasserbilanzbetrachtungen auch einen Grundwasserabfluss nach NW, sicher entlang von Störungen im Bereich des Chemnitztales, möglich erscheinen (siehe oben).

Demgegenüber sind weiter östlich entlang der Ortslagen Rabenstein-Draisdorf-Auerswalde-Zschopautal, im Grenzbereich der Rotliegendfolgen zur Phyllithülle des Granulitgebirges, die Transmissivitäten, selbst entlang von Störungszonen bei unbedeutender Grundwasserführung zumeist sehr gering.

Im Grenzgebiet zwischen innerem Schiefermantel und Granulit sind über die oberirdischen Einzugsgebiete hinausreichende hydraulische Verbindungen entlang von Störungen und tektonischen Zerrüttungszonen bekannt. So z.B. entlang der Route Langenberg-Oberfrohna-Hartmannsdorf-Burgstädt-Markersdorf-Clausnitz, wie dies z.B. Grundwassernutzungen bei Burgstädt und Clausnitz auf dem tektonischen Kontakt zwischen Granulit und Gneis sowie Brunnen bei Hartmannsdorf im Kreuzungsbereich dieser Struktur mit einer herzynischen Störung zeigen. Nach VEB HYDRO (1978) sind für diesen Bereich des nördlichen Vorerzgebirgskenvorlandes aus Kluftdiagrammen zudem N-S Richtungen besonders häufig zu erkennen. Auch hier nimmt die tektonische Zerrüttung insbesondere in Kreuzungsbereichen von Störungen bzw. in den Tälern zu, so z.B. im Chemnitz-Tal und im Bereich westlich der Chemnitz bei Limbach-Oberfrohna/Langenberg.

Bereich des Rotliegenden/Karbons der östlichen Vorerzgebirgssenke

Der östliche Teil der Vorerzgebirgssenke stellt im Vergleich zu den südlich und nördlich angrenzenden kristallinen tektonisch-geologischen Einheiten des Erzgebirges und des Sächsischen Mittelgebirges einen Bereich hoher hydraulischer Aktivität dar.

Der oberste GWL wird aus den Sedimenten des Quartärs und der liegenden Verwitterungszone des Rotliegenden gebildet (Tabelle 15). Lokal sind auch die hangenden Bereiche des unterlagernden kluftwasserführenden Festgesteins hydraulisch eingebunden. Dieser GWL steht, wie aus den Ergebnissen des Grundwassermonitorings des Sondermessnetzes Chemnitz und aus lokalen Bauvorhaben ersichtlich (LFUG 2003), in direktem hydraulischen Kontakt mit den Fließgewässern. Lokal muss in Abhängigkeit vom Wasserstand der Chemnitz im Bereich der Talaue von influenten Grundwasserfließverhältnissen ausgegangen werden. Hydraulisch entkoppelt sind dagegen Reste älterer Schotterterrassen entlang der höheren Talhänge, die lediglich für die Grundwasserneubildung und den hypodermischen Abfluss von Bedeutung sind.

Residuale eiszeitliche Kiese bilden auf Hochflächen, teilweise zusammen mit dem aufgelockerten Rotliegenden, lokale GWL.

Die permokarbonen Einheiten weisen hier, zumindest oberflächennah, generell eine mittlere bis gute Grundwasserführung auf. Dies zeigt sich u.a. in einem im Vergleich zum südlich und nördlich angrenzenden Grundgebirge hohen und relativ konstanten Grundwasserdargebot. Jedoch schwankt, wie für Kluftgrundwasserleiter typisch, die Grundwasserführung und hydraulische Anbindung der Festgesteinsgrundleiter, z.B. an den oberen quartären GWL, lo-

kal beträchtlich. Dies spiegeln auch die Messdaten von zwei im Porphyrtuff des Rotliegenden verfilterten Grundwassermessstellen des Sondermessnetzes Chemnitz wider (LFUG 2003). So zeigt Messtelle 5143S0026 eine direkte Reaktion sowohl auf Trockenperioden (Jahreswechsel 2000/2001) als auch auf Niederschlags- bzw. Hochwasserereignisse (Juli 2001 und August 2002). Messtelle 5143S0025 reagierte dagegen lediglich auf das sogenannte Jahrhunderthochwasser vom August 2002.

Im Unterschied zu den zentralen und westlichen Senkenteilen treten im Osten auch die Hainichen- und Flöha Schichten auf (vgl. Abschnitte 3.2, 4.2.1 und Tabelle 14 und Tabelle 15). Hydrogeologisch bedeutsam ist weiterhin eine in die Planitz-Folge eingelagerte weit verbreitete Quarzporphyredecke die Mächtigkeiten zwischen 6 und 10 m aufweist, sowie die basalen konglomeratischen Bereiche der Härtensdorf-Folge.

Die Leukersdorf-Folge ist bzgl. ihrer Grundwasserführung eine der wichtigsten hydrogeologischen Einheiten in diesem Raum, wobei dem Zeisigwaldtuff in der oberen Teilfolge die größte Bedeutung zukommt. Er weist, zumindest im Bereich des Zeisigwaldes und südlich davon, eine vergleichsweise hohe hydraulische Leitfähigkeit mit Doppelporositäts-Eigenschaften auf (Parameter vgl. Anlage 3 und KRÄMER 2000). Die Leukersdorf-Folge insgesamt weist im Osten der Vorerzgebirgssenke eine vorwiegend psammistisch/psephitische Ausbildung auf. Eine Ausnahme bildet der westliche und südwestliche Teil sowie ihre unterste Teilfolge, wo sie vorwiegend pelitisch ausgebildet ist und der Gruppe 4, "wenig klüftungsfreundlich", in Tabelle 10, Abschnitt 4.2.1 bzw. Tabelle 14 zugeordnet wird. In den übrigen Bereichen kann sie aufgrund ihrer erhöhten hydrogeologischen Bedeutung und im Gegensatz zu ihrer vorwiegend pelitischen Ausbildung im zentralen und westlichen Teil der Vorerzgebirgssenke als insgesamt "klüftungsfreundlich" der Gruppe 2 in Tabelle 10 bzw. der Gruppe B („mittlere bis gute Grundwasserführung“) in Tabelle 14 zugeordnet werden.

Gesteine der Mülsen- Folge treten im Ostteil der Vorerzgebirgssenke nur vereinzelt in den westlichsten Teilen mit geringen Mächtigkeiten bis 50 m auf.

Die wichtigen hydrogeologischen Einheiten im Ostteil der Vorerzgebirgssenke zeigt Tabelle 15.

Über die generell gute Grundwasserführung der permokarbonen Einheiten hinaus, stellen auch im Osten der Vorerzgebirgssenke Störungs- und Klüftzonen bevorzugte und oft überaus leitfähige Wasserbewegungsbahnen dar. Sie sind, wie auch in den übrigen Senkenteilen, meist herzynischer und erzgebirgischer Orientierung und setzen zumindest teilweise über den südlichen, vermutlich tektonisch angelegten, Beckenrand (z.B. Störung zwischen Gablenz und Adelsberg) und die Granulitgebirgsrandstörung im N (z.B. Störung im Chemnitztal) hinweg. Die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung liefern hier Anhaltspunkte für einen kleinräumigen Grundwasserfluss über die den VES-Rand hinaus. Dabei verlieren die tektonischen Strukturen jedoch im Erzgebirgskristallin und, in geringerem Maße im Schiefermantel des Granulitgebirges, deutlich an hydraulischer Wirksamkeit und Tiefenwirkung.

Tabelle 15 Hydrogeologische Einheiten des Permokarbon und Quartär im Raum Chemnitz

(aus RICHTER 1994, verändert und ergänzt)

Stratigraphie (-Folge)	Aufbau	Mächtigkeit im Raum östliches Chemnitz [m]		Grundwasserleiter/ Grundwassergeringleiter
Quartär (Chemnitz)	Auffüllung	bis mehrere Meter		GWGL/GWH
	Hang- und Auelehme	0-5		
	Chemnitz Schotter	(?) bis wenige Meter		GWL
	glaziale Kiese	lokal auf Hochflächen		lokaler separater GWL
	Auflockerungszone			GWL/ GWGL
Obere Leukersdorf	Zeisigwaldtuff (Doppel-Porositäts-GWL)	ca. 20 bis über 90	(Leukersdorf-Folge bis über 400)	Oberer GWL
Untere Leukersdorf	Schluff- und Tonsteine	ca. 30		GWGL/GWH
Planitz	Grüna-Tuff und Rochlitz-Ignimbrit	0-30 (100 im NE der VES)		GWL/ GWGL
Obere Härtensdorf	Ton- und Schluffsteine	bis 250		GWGL/GWH
Untere Härtensdorf	Konglomerate			Unterer GWL
(ausserhalb Raum Chemnitz)				
Flöha Schichten	Konglomerate, Sandsteine, Schiefertone	(max. 60)		GWL
Hainichen Schichten		(max. 400)		GWL

Nördliche Vorerzgebirgssenke: Bereiche Wiesenbach/Kappelbach und Pleißbach

Die sich in Zeit und Raum ändernde tektonische Beanspruchung der Gesteine des Permokarbons der Vorerzgebirgssenke sowie des nördlich angrenzenden Schiefermantels des Granulitgebirges (Abschnitt 3.3) führte zur Herausbildung struktureller Merkmale die hydraulischen Eigenschaften im Nordosten der Vorerzgebirgssenke maßgeblich bestimmen.

Die Heraushebung/Exhumierung Granulitgebirgskomplexes (KRONER 1994, 2004) bewirkte die tektonische Ausbildung der Grenzzone Granulitgebirge/Vorerzgebirge und die Ausbildung der begleitenden Zerrüttungszonen und Abschiebungsflächen parallel zur Granulitgebirgsrandstörung.

Herzynische Störungen verwerfen die Granulitgebirgsrandstörung. Sie setzten sich daher sicherlich aus dem Grundgebirge nach S in die Vorerzgebirgssenke fort. Kreuzungsbereiche beider Störungssysteme weisen eine erhöhte Wasserwegsamkeit auf. Davon zeugt ein verstärktes Auftreten von Quellen und ergiebigen Tiefbrunnen in diesen Bereichen.

Nachfolgend bilden sich weitere Störungen bzw. Kluftzonen parallel zum Senkenrand bzw. zur Senke heraus. Sie können als Entlastungsgebiete tektonischen Druckes in der Vorerzgebirgssenke interpretiert werden. Sie zeichnen sich morphologisch durch E-W bzw. ENE-WSW streichende Täler ab, so z.B. die Täler des Wiesenbaches/Kapelbaches und des Pleißbaches. Sie stellen Zonen guter Grundwasserführung dar. So nennt VEB HYDRO (1978) einen Störungsbereich parallel zur Granulitgebirgsrandstörung mit wesentlicher Grundwasserführung nördlich der Ortslage Grüna.

Aufgrund des hydraulischen Druckregimes ist mit einem gewissen Grundwasserzustrom in die Vorerzgebirgssenke aus N im Bereich von Wüstenbrand, Grüna, Rabenstein-Rottluff zu

rechnen (siehe oben und Abschnitt 4.2.3).

Stadtgebiet von Chemnitz und östliches Umland

Im Rahmen verschiedener Forschungsarbeiten, z.B. im Zusammenhang mit Untersuchungen zur Deponie "Weißer Weg" in Chemnitz (KRÄMER 2000, EULENBERGER 1994 u.v.a.) konnten für den Bereich Chemnitz und Umland Grundwasserleiter/Grundwasserhemmer bzw. Grundwassergeringleiter-Modelle entwickelt werden die verschiedene Grundwasserstockwerke unterscheiden. Die Grundwasserstockwerke werden im wesentlichen aus den grundwasserführenden Einheiten Quartär, Zeisigwaldtuff (Obere Leukersdorf-Teilfolge), Grüna-Tuff (Planitz-Folge) und den Konglomeraten der Unteren Härtensdorf-Teilfolge gebildet (vgl. Tabelle 15). Im Bereich von Störungs- und Kluftzonen ist jedoch häufig eine (gute) hydraulische Verbindung zwischen den einzelnen GWL und damit eine lokale Störung des Stockwerksbaus, zu erwarten (VOGEL 1992).

Im Raum Chemnitz-Zeisigwald kommt dem Zeisigwaldtuff die weitaus größte Bedeutung als GWL zu. Dieser weist Doppelporositätseigenschaften ("double porosity") auf. Infolge intensiver tektonischer Beanspruchung sind in den Tuffen neben einer gut vernetzten Klüftung zahlreiche Störungszonen vorhanden, die im Sinne einer Block- und Schollengliederung wichtige Grundwasserbewegungsbahnen bilden (KRÄMER 2000, Richter 1994). Die Poren Hohlräume dienen vorwiegend als Speicher von Porenwasser, sind jedoch kaum am Grundwasserfluss beteiligt, da der Zeisigwaldtuff meist eine geringe Porenvernetzung und damit eine niedrige effektive Porosität aufweist (KLEMM & RIESE 1992).

Trotz seiner generellen Einstufung als guter Grundwasserleiter weist der Zeisigwaldtuff aufgrund seiner sehr inhomogenen lithologisch-strukturellen Ausbildung beträchtliche Differenzen in seiner hydraulischen Leitfähigkeit auf (vgl. EULENBERGER 1994).

Die Grundwasserneubildung ist im Bereich des Tuffes, bei fehlender Hanglehm- bzw. Hangschuttdecke, für Festgesteinsbereiche relativ hoch (VOGEL 1992). Sie beträgt nach ZIMMERMANN & KÜHNAPPEL (1993) rund 95 mm. Die den Zeisigwaldtuff unterlagernden Schluff- und Tonsteine bilden einen hemmenden Horizont. Im Ausstrich dieses Kontaktes, bzw. bei tektonisch induziertem Kontakt zwischen Zeisigwaldtuff und liegendem Grundwasserhemmer kommt es häufig zu Wasseraustritten aufgrund von Stauquellbildungen (vgl. KRÄMER 2000 u.a.).

Die grundwasserführenden liegenden Grüna-Tuffe der Planitz-Folge sind aufgrund ihrer geringen Verbreitung von nur untergeordneter Bedeutung (TUNGER 1991). Die Konglomerate der Härtensdorf-Folge bilden den liegenden GWL. Sie tauchen in Richtung Beckenachse ab, sind jedoch sowohl als GWL sowie auch als Bereiche hoher GWN vor allem in den Ausstrichbereichen von Bedeutung.

Südlicher Senkenrand: Bereich des Zusammenflusses von Würschnitz und Zwönitz zur Chemnitz

Im Bereich des Zusammenflusses von Würschnitz und Zwönitz zur Chemnitz kann vermutlich von einer tektonischen Anlage der Südgrenze der Vorerzgebirgssenke ausgegangen werden. Die Grundwasserfließrichtung ist gleich dem Schichteinfallen bis in das Gebiet des Gablenzbaches nach NW gerichtet. Hier fungieren die gleich orientierten herzynischen Störungen als bevorzugte Fließwege. Sie werden durch den Verlauf einiger Flüsse und Bäche nachgezeichnet (z.B. Chemnitz, Gablenzbach, Berbisdorfbach). Indizien für eine Versinkung von Grundwasser entlang dieser Störungen, z.B. aus dem Bereich der grundwasserreichen

Chemnitzau, liegen vor (vgl. oben und Abschnitt 4.4.3.3) sind aber nicht gesichert. Die trotz flachen Schichteinfallens schnelle Absenkung der Beckenbasis vom südöstlichen Rand nach Nordwest lässt im Untergrund um E-W streichende Störungen („Staffelbrüche“) vermuteten. Über deren hydraulische Eigenschaften ist jedoch nichts bekannt (VEB HYDRO 1978).

Bereich der Chemnitz nördlich der Ortslage Chemnitz

Die Chemnitz verläuft hier sicherlich entlang einer herzynischen Störungsstruktur. Sie zertalt die austreichenden Rotliegendfolgen der Vorerzgebirgssenke, namentlich die Härtensdorf-, Planitz-, und Leukersdorf-Folge sowie die sich nordwestlich anschließenden unterkarbonen Hainichen Schichten der Mulde von Borna und Ebersdorf. Letztere sind grundwasserführend (Tabelle 14 und Tabelle 15), jedoch hier bisher ungenügend erschlossen, so dass nur wenige Informationen zu ihrer hydraulischen Wirkung vorliegen.

Versinkungen von Flusswasser aus der Chemnitz in die unterlagernde herzynische Störungszone wird vermutet (vgl. oben und Abschnitt 4.4.3.3).

Bereich der Würschnitz südlich von Chemnitz

Das weitere Würschnitztal verläuft in diesem Abschnitt u.a. im Ausstrichbereich der gut geklüfteten Leukersdorfer Porphyrtuffe. Die südliche Grenze der Vorerzgebirgssenke ist hier als Wegsamkeit der Eruption der Porphyrtuffe sicher tektonisch ausgebildet (Erzgebirgs-nordrandstörung). Wie am nördlichen Rand der Vorerzgebirgssenke versetzen herzynische Störungen auch hier den Beckenrand. Das Würschnitztal ist ein weiteres Beispiel für die Anlage von Flusstälern über dem Grundwasserentlastungsbereich einer Störungszone.

Bereich der Zschopau im Raum Frankenberg

Das sich dem zuvor diskutierten Gebiet östlich/nordöstlich anschließende Einzugsgebiet der Zschopau wird durch um E-W bis NE-SW verlaufende zum Schichtstreichen parallele Nebenflüsse/Bäche entwässert. Dieses Gebiet ist, abgesehen von einigen Brunnennutzungen, hydrogeologisch nur wenig erschlossen und erkundet. Geologisch setzt sich hier die westlich beginnende Mulde von Borna und Ebersdorf mit ihren unterkarbonen Hainichen Schichten fort. Bei Ebersdorf, südwestlich von Frankenberg ist eine produktive Stufe mit Sandsteinen, Schiefertönen und Steinkohlenflözchen eingeschaltet. Die Hainichen Schichten werden teilweise von geringmächtigen Abfolgen der Flöha-Schichten und der Härtensdorf-Folge überlagert. Weiter östlich ist bei Niederwiesa das mylonisierte und intensiv zerklüftete Grundgebirge des Frankenger Zischengebirges im Zschopautal aufgeschlossen. Dieser wechselhafte geologisch-lithologische Aufbau des Untergrundes, lässt recht differenzierte, kleinräumig wechselnde hydrogeologisch-hydraulische Bedingungen vermuten. Auch hier dominieren, wie in der übrigen Vorerzgebirgssenke herzynische und erzgebirgische sowie E-W Richtungen tektonischer Elemente. Dieser östlichste Teil der Vorerzgebirgssenke liegt im Kreuzungsbereich des Zentralsächsischen Lineaments mit der Flöha-Zone und stellt sicherlich einen hydrogeologisch besonders aktiven Bereich dar. Im Rahmen der hydraulischen Modellierung konnten lediglich den Senkenrand querende präferentielle Grundwasserfließwege ausgewiesen werden.

Fazit und Schlussfolgerungen

Die hydraulischen Verhältnisse im östlichen Teil der Vorerzgebirgssenke zeichnen sich gegenüber denen in den westlich gelegenen Bereichen durch verschiedene Unterschiede und Besonderheiten aus.

So ist die Gera-/ Mülsen-Folge als hangende geologische Einheit und oberster Festgesteinsgrundwasserleiter hier im wesentlichen nicht mehr vorhanden. Dadurch befindet sich das prä-oberrotliegende Störungsmuster, als Ergebnis der Altmark-Bewegungen und älterer tektonischer Prozesse (Abschnitt 3.3), hier im Bereich der oberflächennahen Verwitterungs- und Auflockerungszone. Dies dürfte die hydraulischen Eigenschaften dieser Störungen entscheidend beeinflussen. So ist z.B. in den Senkenrandbereichen mit, den Vorerzgebirgsrand schneidenden, hydraulisch aktiven Störungen zu rechnen. Entsprechende Indizien (siehe oben) lassen zumindest lokal einen Grundwasserstrom aus dem umgebenden Grundgebirge in die Vorerzgebirgssenke vermuten.

Auch für die übrigen Rotliegendfolgen kann insbesondere in den Ausstrichbereichen von, im Vergleich zum westlichen und zentralen Teil der Vorerzgebirgssenke, höheren hydraulischen Leitfähigkeiten ausgegangen werden.

Die N-S Einengung der Senkenstruktur in Richtung E bewirkt eine wachsende Bedeutung der Ausstrichbereiche. Zusammen mit dem zusätzlichen engräumigen Auftreten der Hainichen- und Flöha-Schichten sowie von kristallinen Gesteinen und der Kreuzung einer alten tiefreichenden tektonischen Struktur sorgt dies für deutlich differenziertere, hydrogeologisch-hydraulische Verhältnisse als in den westlichen Senkenteilen.

4.2.4.4 Schlussfolgerungen zu den hydrogeologischen Verhältnissen in den Teilgebieten

Die vorstehenden Recherchen, Bearbeitungen und Interpretationen zu den hydrogeologischen Verhältnissen in den Teilgebieten, mit Schwerpunkt der hydraulischen Wirksamkeit von Störungs- und Kluftzonen, sind Teil der hydrogeologischen Analyse der Vorerzgebirgssenke und bilden eine Voraussetzung und inhaltliche Orientierung für die Erstellung und Anpassung des konzeptionellen hydrogeologischen und numerischen Modells der Vorerzgebirgssenke. Sie zeigen erwartungsgemäß ein sehr differenziertes Bild der hydrogeologischen Verhältnisse. Es wird deutlich dass, in Bezug auf die Umsetzung der Erkenntnisse in das konzeptionelle und numerische Modell, dem zentralen Teil der Vorerzgebirgssenke, insbesondere dem Bereich Zwickauer Mulde / Mülsengrund / Lungwitzbach aufgrund der relativ guten Datenlage eine besondere Bedeutung zukommt.

Die für ein regionales Modell so wichtige Bedeutung weitreichender Störungszonen konnte insbesondere für den Raum Zwickau-Werdau anhand zahlreicher Indizien diskutiert und neue Erkenntnisse abgeleitet werden. Diese konnten in Teilbereichen durch Ergebnisse aus der hydraulischen Modellierung bestätigt werden. Für einen weiteren Kenntniszuwachs sind zwingend auch Felduntersuchungen notwendig.

Als eine wichtige Erkenntnis ergibt sich die Forderung nach einer einheitlichen und koordinierten Erfassung hydrogeologischer Daten wie mit dem sächsischen HyK50-Konzept prak-

tiziert, auch unter Einbeziehung lokaler nicht landesamtlich koordinierter Untersuchungen wie Bauunternehmungen und Trinkwassererschließungen, die häufig, quasi nebenher, wertvolle Ergebnisse liefern.

Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte hydrogeologische Modell und das darauf aufbauende hydraulische Modell sind großräumige Modelle. Sie konnten dennoch dazu beitragen, auch für die in den vorstehenden Abschnitten diskutierten eher kleinmaßstäblichen hydrogeologischen Räume verschiedene hydraulische Zusammenhänge zu bewerten und Feldbeobachtungen einzuordnen.

4.2.5 Einfluss der Grubenflutungen im Raum Zwickau-Oelsnitz auf die Grundwasserdynamik

In der Vorerzgebirgssenke stellen die ausgedehnten bis in über 1000 m Teufe reichenden Grubenbaue des ehemaligen Steinkohlenbergbaus in Zwickau und Lugau-Oelsnitz die bedeutsamsten anthropogenen Eingriffe in das Grundwasserregime der tieferen Grundwasserstockwerke dar.

Im Rahmen der Mitte der 90er Jahre begonnen Phase 2 der sogenannten „Komplexuntersuchung zu den Auswirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus im Raum Oelsnitz-Zwickau“ und den anschließenden Folgeuntersuchungen, zu denen auch die vorliegende Arbeit beitrug (GÖTTELMANN et al. 1998, KOLITSCH 2000 sowie C&E 2001), wurde der Einfluss der Grubenflutungen auf die Grundwasserdynamik u.a. durch Auswertung des Grundwassermonitorings des Sondermessnetzes Zwickau-Oelsnitz und weiterer Messstellen geprüft. Darauf aufbauend konnten unter Berücksichtigung weiterer Untersuchungen, z.B. der tektonischen Verhältnisse, Prognosen für die künftige Entwicklung der Grundwasserdynamik, insbesondere im noch in Flutung befindlichen Lugau-Oelsnitzer Revier abgeleitet werden. Für die Oelsnitzer Grubenbaue hat die neuere Tiefbohrung (MKZG 52426003) und begleitende Untersuchungen (BERGER 2004, HGC 2005, VOIGT 2004, ECKART et al. 2005) einen deutlichen Erkenntniszuwachs erzielt. Die abschließende Auswertung des Gesamtvorhabens durch das LfUG und OBA waren während der Recherche noch unvollendet (FELIX et al. 2006). Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen konnten deshalb mglw. nur teilweise in vorliegender Arbeit berücksichtigt werden.

Trotz der jüngeren Arbeiten in Oelsnitz und Zwickau bleibt die Anzahl aussagekräftiger Messstellen im Bereich der Grubenbaue oder in deren unmittelbaren Umfeld gering.

Die Vorab-Einschätzung der Relevanz gefluteter Grubenbaue für Hydraulik und Beschaffenheit der umgebenden Grundwasserleiter ist aufgrund sehr komplexer und meist ungenügend bekannter Randbedingungen schwierig.

Die gefluteten Grubenbaue weisen gegenüber den umgebenden natürlichen quartären und rotliegenden GWL besondere hydraulische Eigenschaften auf. Sie stellen, soweit nicht vollständig mit geringdurchlässigem Material vollständig verfüllt, zumeist sehr gut durchlässige Strukturen dar und fungieren quasi als „anthropogener Grundwasserkörper“. Dieser Grundwasserkörper zeichnet sich durch einen unregelmäßigen, Sohlen-orientierten geometrischen

Bau aus, der durch Schächte und andere vertikale Auffahrungen vertikal durchsetzt wird. Dadurch werden auch hydraulische Verbindungen zwischen den einzelnen ansonsten hydraulisch getrennten natürlichen GWL geschaffen

Schächte können aufgrund ihrer hohen Standsicherheit, soweit nicht komplett verfüllt, als hydraulisch besonders hoch leitfähige vertikale Wegsamkeiten betrachtet werden.

Ein schwer quantifizierbarer Teil dieser Hohlräume entsteht sekundär durch bergbauinduzierte Bewegungen auch in vom Abbau nicht direkt betroffenen hangenden Schichten. Solche Auflockerungen des hangenden Deckgebirges sind für die Kommunikation zwischen Gruben- und Grundwasser von besonderer Bedeutung.

Inwieweit verbleibenden Hohlräume insgesamt hydraulisch verbundene Systeme bilden, die insbesondere einen vertikalen Grundwasserstrom ermöglichen würden, bleibt in den beiden Revieren in Zwickau und Oelsnitz unsicher.

Auch können geringste Änderungen der Geometrie der gefluteten Grubenbaue, z.B. durch Verbruch, Setzung oder Zusetzung von Wegsamkeiten zu Veränderungen im Strömungssystem des Flutungsraumes führen. Wie Studien in anderen gefluteten ehemaligen Bergbaurevieren zeigen können solche Änderungen der hydraulischen Verhältnisse auch durch Hochwasserereignisse hervorgerufen werden (KOLITSCH et al. 2003).

Solche Modifikationen des hydraulischen Regimes beeinflussen häufig auch die Grubenwasserqualität (KOLITSCH et al. 2005). Letztlich können auch im Rahmen längerer Zeiträume stattfindende Lösungs- und Mischungsvorgänge zu Veränderungen in der Dichteverteilung der Grubenwässer und so zu veränderten Strömungsregimes führen. Deshalb kann für beide Flutungsräume eine zukünftige Änderung der Grundwasserqualität, z.B. durch den Einfluss höher mineralisierter Grubenwässer oder tiefer Grundwässer nicht ausgeschlossen werden.

Die Grubenbaue der ehemaligen Reviere Zwickau und Lugau-Oelsnitz sind aufgrund ihrer Größe und teufenmäßigen Erstreckung für die Grundwasserverhältnisse im Bereich der zentralen Vorerzgebirgssenke von besonderer Bedeutung. Die wichtigsten Erkenntnisse und Schlussfolgerungen zur Auswirkung dieser Flutungsräume auf die Grundwasserdynamik (zu Auswirkungen auf die Grundwasserqualität vgl. Abschnitt 4.5.3) werden im folgenden zusammengefasst und kurz diskutiert.

Raum Zwickau

Der Ende der 70er Jahre beendete Steinkohlenabbau im Raum Zwickau mit einer Gesamtfördermenge von rund 230 Mio Tonnen (RUDER 1998) hinterlies nur teilweise wiederverfüllte oder zugesetzte Hohlräume. Nach Schätzungen von HGN (1996b) beträgt der verbleibende Hohlraum rund 21 Mio. m³. Ein nicht quantifizierbarer Teil dieser Hohlräume wird sekundär durch bergbauinduzierte Bewegungen auch in vom Abbau nicht direkt betroffenen hangenden Schichten entstehen bzw. entstanden sein.

Schätzungen nach BSA (1974) und HGN (1996b) gehen für das Zwickauer Revier von einem höheren Wiederverfüllungsanteil als im Lugau-Oelsnitzer Revier (siehe unten) aus, was auch hydraulischen Wechselwirkungen zwischen Grubenwasser und Grundwasserleiter entgegenwirkt

Die (Grund)wasserdynamik im Grubengebäude und im Bereich der quartären und rotliegenden GWL ist wie folgt zusammenfassend zu charakterisieren.

- Die Grubenflutung im Zwickauer Revier ist seit spätestens 1995 als abgeschlossen zu betrachten
- Das Grundwasserspiegelmonitoring im Bereich Zwickau zeigt, dass die Grundwasserstände in den die Grubenbaue umgebenden quartären und rotliegenden GWL nicht maßgeblich von den stärker variierenden Wasserständen im Grubengebäude beeinflusst werden.
- Die Auswertung der Messwerte zweier bis ins Karbon reichender Bohrlöcher (BL1 und 2/86 in der Bockwaer Senke) lässt vielmehr den Schluss zu, dass sich das Wasser im Grubengebäude inzwischen im hydrodynamischen Gleichgewicht mit der Mulde und dem quartären GWL befindet. Gespannte Verhältnisse, z.B. im Grubenwasser der Bockwaer Senke, stellen sich nur in unmittelbarer Abhängigkeit vom Wasserstand der Mulde ein.
- Die Wässer in den Zwickauer Grubenbauen unterscheiden sich von den gering mineralisierten rotliegenden und quartären Grundwässern durch eine abweichende chemische Zusammensetzung und Temperaturverteilung. Die resultierenden Dichteunterschiede können die hydraulischen Wechselwirkungen zwischen Gruben- und Grundwasser beeinflussen (zu qualitativen Wechselwirkungen vgl. Abschnitt 4.5).
- Anhaltspunkte für eine Grubenwasserzirkulation im Sinne aufsteigender höher mineralisierter Grubenwässer und eine entsprechende Beeinflussung der höheren GWL gibt es bisher jedoch nicht

Die gefluteten Grubenbaue sind hydraulisch direkt an die umgebenden quartären und rotliegenden GWL angebunden. Es kann deshalb von einer permanenten Einstellung des Grubenwasserstandes auf dem Niveau des GWL mit der höchsten Grundwasserdruckfläche ausgegangen werden.

Darüber hinaus sind im Bereich der Grubenbaue Grundwasserwegsamkeiten vorhanden, die zumindest lokal die hydraulischen Durchlässigkeiten der umgebenden Grundwasserleiter deutlich übersteigen. Zudem kann von einer hydraulisch hoch wirksamen Anbindung der Grubenbaue an die Zwickauer Mulde ausgegangen werden. Bei Niederschlagsereignissen ist deshalb eine kurzfristige Erhöhung des Grubenwasserstandes, bzw. der Grundwasserdruckfläche des Grubenwasserkörpers, über die der GWL erwartet werden. Das belegt z.B. das Überlaufverhalten der Bohrungen in der Bockwaer Senke (vgl. auch Abschnitt 4.2.4.1)

Eine Änderung des hydraulischen Regimes in den gefluteten Grubenbauen kann für die Zukunft nicht ausgeschlossen werden. Nach BRAUSE (1999) ist in Zwickau auch nach der Einstellung des natürlichen Grundwasserspiegels noch bis 2005-2010 (in den Vorfeldebereichen noch darüber hinaus) mit schwachen sekundären bergbauinduzierten Geländehebungen zu rechnen. Diese können das Grundwasserregime beeinflussen (siehe oben).

Raum Lugau-Oelsnitz

Im Lugau-Oelsnitzer Revier wurden zwischen 1844 und der Einstellung des Bergbaus 1971 rund 145 Mio. Tonnen Gestein gefördert. Angaben zur Größe des gegenwärtigen bzw. nach

Ende noch andauernder Hebungen oder Senkungen verbleibenden Hohlraums schwanken beträchtlich. BSA (1974) geht von 76 Mio m³ aus, HGN (1996b) nennt eine Spannweite von 15 bis 76 Mio m³. Damit ist der Anteil wiederverfüllter Grubenbaue im Lugau-Oelsnitzer Revier vermutlich geringer als im Zwickauer Revier. Dies erhöht nach Abschluss der Flutung die Wahrscheinlichkeit des Entstehens hydraulisch hoch leitfähiger mehr oder minder zusammenhängender Strukturen. Diese können, insbesondere bei Einbindung vertikaler Strukturen, wie z.B. nicht vollständig bzw. mit durchlässigem Material verfüllte Schächte, Zirkulationssysteme bilden und somit Wegsamkeiten für höher mineralisierte tiefe Grundwässer darstellen (siehe oben). FELIX et al. (2006) bestätigen frühere Annahmen (C&E 1997) zur allgemein guten Durchlässigkeit der Schächte.

Aufgrund der deutlich geringeren Grund- und Oberflächenwasserzuläufe in die Grubenbaue dauert die Flutung hier - im Gegensatz zum Zwickauer Revier – noch immer an.

Die vollständige Flutung der Grubengebäude – das entspricht nach C&E (2001) einem Flutungs-niveau von ca. 405 mNN - ist auf Grundlage der zu Zeiten des aktiven Bergbaus maximalen Zuflussmenge in die Grubenbaue von 3600 m³/d (1959) und des von BSA (1974) angenommenen Resthohlraums von 76 Mio m³ um das Jahr 2034 zu erwarten. BSA (1974) nennt dabei einen Schwankungsbereich von 20% und schlussfolgert so ein Flutungs-ende zwischen **2022 und 2046**. Allerdings können verschiedene schwer kalkulierbare Faktoren die Flutung beschleunigen oder verlangsamen (z.B. Höhe der Zuflussmengen aufgrund unerkannter Zu- und Abflüsse, Größe des Resthohlraums, Verbleiben von ungesättigten Bereichen aufgrund von Abdichtung).

Auf Grundlage solcher Annahmen, z.B. von HGN (1996b) durchgeführte Szenarienberechnungen ergeben ein Flutungs-ende bereits Anfang der 80er Jahre (was nachweisbar nicht erfolgte) oder aber auf Grundlage des „Maximal-Szenarios“ erst nach 2150.

C&E (2001) führte auf Grundlage einer präzisierten GWN für das Infiltrationsgebiet (163mm/a bei einer Infiltrationsfläche von 4,48 km²) und einer Neuberechnung des verbliebenen Hohlraumes (57 Mio. m³) eine neue Abschätzung der Flutungsdauer durch. Danach verschiebt sich die erwartete komplette Flutung auf den Zeitraum **2033 bis 2065** (Prognose 2049 ± 20%).

Die im Zusammenhang mit der Tiefbohrung MKZG 52426003 durchgeführten Untersuchungen bestätigen und konkretisieren diese Annahmen (HGC 2005, ECKART et al. 2005, FELIX et al. 2006). Bei einem Grubenwasserstand um –39m im Jahre 2005 werden danach, je nach angesetzttem Szenario, Flutungswasseraustritte **frühestens 2034** erwartet.

Die Auswertung von Stands- und Beschaffenheitsdaten der Grundwassermessstellen im Rotliegenden des Gebiets lassen bisher weder in bezug auf den Grundwasserstand noch auf die Grundwasserqualität Einflüsse des Flutungsprozesses erkennen. Dies wurde auch durch Untersuchungen von Quellen (C&E 2001) bestätigt. Allerdings fehlen (bis auf die Tiefbohrung MKZG 52426003) Messstellen im unmittelbaren Bereich der Grubenbaue. Tests an der Tiefbohrung (FELIX et al. 2006) zeigen, dass die Rotliegend-Grundwasserleiter oberhalb des Grubenwasserniveaus Grundwasser führen und sich sowohl in ihrem Grundwasserspiegel als auch hydrochemisch deutlich vom Grubenwasser unterscheiden. Die tiefen Rotliegend-Grundwasserstände im Bereich oberhalb des Flutungs-niveaus könnten auf eine leichte bergbauinduzierte Absenkung (Depressionstrichter?) im Grubenbereich hinweisen. Allerdings fehlen geeignete Referenzmessstellen zur Überprüfung dieser Annahme. Trotz allge-

mein geringer Durchlässigkeiten des Permokarbons im Raum Oelsnitz, insbesondere des unteren Rotliegenden und Karbon, ist von einem gewissen hydraulischen Kontakt zwischen Grubenwässern und tieferen permokarbonen Folgen auszugehen. Dieser kann z.B. über Klüfte und Störungen bzw. störungsbegleitende Kluftsysteme und bergbauinduzierte Auflockerungsbereiche realisiert werden. Diese hydraulische Kommunikation reicht jedoch nicht aus um die Ausbildung eigenständiger hydraulischer (und hydrochemischer) Systeme in den tieferen Rotliegend-Grundwasserleitern zu unterbinden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die (Grundwasser)dynamik im Grubengebäude und, eingeschränkt auch im Bereich der angrenzenden permokarbonen Schichten, aufgrund der noch andauernden Flutung der Lugau-Oelsnitzer Grubenbaue Veränderungen unterworfen sein wird.

Obwohl seit Einstellung des aktiven Bergbaus Anfang der 1970er Jahre nur geringe Vertikalbewegungen zu verzeichnen sind, muss parallel zur fortschreitenden Flutung noch lange mit schwachen sekundären, bergbauinduzierten Bodenbewegungen gerechnet werden (BRAUSE 1999). Dabei werden insbesondere Hebungen im Bereich der Abbaumaxima erwartet (C&E 1997).

Mit folgenden Entwicklungen in Bezug auf die Grundwasserdynamik muss bei Abschluss des Flutungsprozesses gerechnet werden (vgl. FELIX et al. 2006 für evtl. neue Prognosen).

- Einstellung eines hydrodynamischen Gleichgewichts innerhalb des Grubengebäudes, d.h. Ausbildung einer einheitlichen Grundwasserdruckfläche aufgrund der hohen hydraulischen Konnektivität innerhalb des Grubengebäudes
- Austritt von Grubenwasser lokal im Bereich von tief gelegenen Tagesöffnungen (Schächten) oder als Feuchtgebiete in unterhalb des Flutungsniveaus gelegenen Geländebereichen, wenn hier tagesnahe Grubenbaue vorhanden sind. C&E (2001) nennt ein voraussichtliches Flutungsniveau von rund 405 mNN bei vollständiger Flutung.
- Ein genereller Überlauf an tieferliegenden Schächten (vgl. C&E 1997) und Abfluss in die Vorfluter ist unwahrscheinlich, aber während langer Niederschlagsperioden möglich. Vermutlich erfolgt die Entlastung der Grubenwässer mit dem Grundwasser in die Vorfluter (Hegebach, Würschnitz und in diese speisende Bäche und Wasserfassungen). Deshalb ist Anstieg der entlastenden Grundwassermengen zu erwarten.
- Der Grundwasserspiegel kann lokal aufgrund des nunmehr aufgefüllten Grundwasser-Speicher „Grubenbau“ (geringfügig) steigen. Die Höhe des resultierenden Wasserstands ist auf Grundlage des derzeitigen Kenntnisstands nicht prognostizierbar.
- Wie im Zwickauer Revier (siehe oben) stellen die gefluteten Grubenbaue gegenüber den natürlichen GWL ein besonderes hydraulische Element dar. Sie werden in Abhängigkeit vom Niederschlag und den Wasserständen der Vorfluter stärkere Standsschwankungen aufweisen als die rotliegenden GWL. So können sie – je nach Situation – in die GWL infiltrieren (nach Niederschlagsperioden/während Hochwasserereignissen) oder aus diesen gespeist werden (Trockenperioden)
- Für die hangenden Rotliegend-Grundwasserleiter/ Auflockerungszone ist aufgrund höherer Durchlässigkeiten im Bereich der Auflockerungszone eine stärkere hydraulische (und hydrochemische) Beeinflussung durch die Grubenwässer zu erwarten. Das höher mineralisierte Grubenwasser kann somit auch die Beschaffenheit der Grundwasserleiter negativ beeinflussen.
- Wie wesentlich diese Auswirkungen auf die Grundwasserdynamik des oberen Rotliegend-Grundwasserleiter sind werden ist unsicher. Das umgebende Rotliegendgebirge

wird dabei sicherlich als relativ gering durchlässiger Grundwasserraum einen die Grundwasserdynamik „begrenzenden“ Einfluss ausüben. Es kann deshalb angenommen werden, dass der Grubenwasserstand – eine gute Kommunikation mit den Vorflutern vorausgesetzt (z.B. durch oberflächennahe Störungs- und Kluftzonen, Schachtüberläufe, Vernässungszonen, Entwässerung in Auflockerungszone/ Hangend-GWL, Vorfluter (??)) – bestimmendes Korrektiv des grubennahen „Gebietswasserstandes“ des oberen Grundwasserleiterstockwerkes sein wird.

- Mit zunehmender Größe des Flutungsraumes steigt die Wahrscheinlichkeit der Ausbildung freier temperatur-/dichteinduzierter Konvektionssysteme/ Grubenwasserzirkulation entlang hydraulisch durchlässiger Bereiche (Schächte, unverfüllte bzw. durchlässige Strecken und Abbaue). Es kann angenommen werden, dass sich diese, aufgrund des sich kontinuierlich ändernden Flutungsniveaus, kurzfristig zeitlich und räumlich ändern. Ob sich nach Flutungsende ein permanentes Zirkulationssystem im Bereich der Oelsnitzer Grubenbaue einstellen wird ist aufgrund unklar (vgl. dazu FELIX et al. 2006). Potentiell sind die Voraussetzungen für von Konvektionszellen zwar gegeben. Allerdings gibt es bei hoher Sensitivität der erforderlichen Randbedingungen in bezug auf die Durchlässigkeit, Geometrie und insbesondere die Konnektivität der durchlässigen Strukturen untereinander offene Fragen. Der Nachweis ob solche Zirkulationssysteme entstehen, welche Teufenbereiche davon erfasst werden und ob diese zeitlich stabil sind kann letztlich nur durch konkrete Messungen im Flutungsraum bzw. an Austritten von Flutungswasser erbracht werden.

4.3 Hydrogeologische Bedeutung von Störungs- und Kluftzonen

Die Analyse der seismisch-tektonischen Randbedingungen im weiteren Untersuchungsraum soll in Kombination mit Folgerungen aus der lithologischen-strukturellen Ausbildung von Störungen, Testrechnungen und den Ergebnissen diverser Feldbeobachtungen und –tests einen Ansatz zur Abschätzung der hydraulischen Wirksamkeit von Störungszonen im Senkenmasstab bieten.

4.3.1 Seismisch-tektonische und lithologisch-phenomenologische Ansätze zur Einschätzung der hydraulischen Wirksamkeit von Störungen und Klüften

Der weitere Bereich der Vorerzgebirgssenke war im Laufe seiner geologisch-tektonischen Entwicklung wechselnden Spannungsfeldern ausgesetzt. Dabei stellen sich die folgenden Fragen:

- Inwieweit hat die historische Entwicklung tektonischer Spannungsfelder und der daraus resultierenden Störungs- und Kluftsysteme Einfluss auf die rezente hydraulische Aktivität des tektonischen Inventars?

- Gibt es rezente Spannungsfelder und wie können sich diese auf die hydraulische Wirksamkeit vorhandener Störungen und Klüfte auswirken?

Hinweise zur Beantwortung dieser Fragen können neben der Berücksichtigung der tektonischen Entwicklung des Gebietes, Messungen von Gesteinspannungen und die Auswertung von Geometrie, Bewegungen und Lithologie im Bereich tektonischer Elemente liefern. Daraus sind Annahmen zu ihrer potentiellen hydraulischen Wirksamkeit ableitbar.

Schlussfolgerungen aus der tektonischen Entwicklung des Gebietes

Wie Faziesanalysen, tektonische Kartierungen und geophysikalische Messungen belegen, führte die tektonische Entwicklung im Bereich der VES zur Anlage eines zeitlich und räumlich differenzierten Störungs- und Kluftsystems. Im Verlaufe dieser Entwicklung wurden vor allem um NW-SE, SW-NE und N-S ausgerichtete tektonische Strukturen angelegt und häufig mehrfach reaktiviert (vgl. Abschnitt 3.3, Abbildung 11 und Tabelle 7 in Abschnitt 3.3). TURNER et al. (2004) weist in diesem Zusammenhang in neueren Untersuchungen die nachhaltige Reaktivierung tektonischer Elemente in sedimentären Senken nach Abschluss der Senkenbildung im Rahmen der sogenannten „sedimentary basin inversion“ durch den Aufbau horizontalen Stresses nach.

Seit dem mittleren Rotliegenden bis in die heutige Zeit dominieren dabei saxo-nisch/(synalpidisch) initiierte und/oder reaktivierte **herzynische (NW-SE)** und untergeordnet N-S orientierte tektonische Richtungen. Es liegt folgerichtig die Vermutung nahe, dass diese NW-SE Elemente zusammen mit den begleitenden Kluftzonen heute in Bezug auf Anzahl und Aktivierung (Versieglungsgrad, Öffnungsweiten) präferenzielle Wasserwegsamkeiten darstellen können.

Diese Grundannahme wird durch die im folgenden kurz diskutierten Feldbeobachtungen, Messungen und Tests bestätigt.

Direkte Messungen von Gesteinsspannungen

Großräumige Messungen von Gesteinsspannungen im Festgestein sowie entlang von Störungen liegen im Betrachtungsgebiet nicht vor. Vereinzelte In-situ Messungen repräsentieren das kleinräumige Druckregime vor Ort, sind aber für die Ableitung von Schlussfolgerungen im Regionalmaßstab eher ungeeignet. Darüber hinaus fehlen insbesondere Messungen unterhalb der Auflockerungs-/Zerrüttungszone.

Messungen von Hebungen, Senkungen und lateralen Bewegungen in Bergbaugebieten:

Im bergbaulich beeinflussten Gebiet Zwickau handelt es sich nach Untersuchungen und Interpretationen von FENK (1998) und BRAUSE (1999) dabei im wesentlichen um direkte Folgen des Bergbaus, heute insbesondere um Hebungen. Es konnte jedoch nachgewiesen werden, dass vorhandene Störungssysteme im Bereich der Stadt Zwickau – hier insbesondere die **NW-SE orientierten Störungen** – durch bergbauliche Aktivität reaktiviert und wirksam werden können (hier insbesondere die **Oberhoindorfer Hauptverwerfung und der Brückenberg-Sprung**). Sie liegen im Bereich der überregionalen Gera-Jáchymov-Zone. Solche bergbauinduzierten seismischen Aktivitäten sind durch langjährige seismologische Messungen belegt (siehe unten). Eine dadurch verursachte Erhöhung der hydraulischen Leit-

fähigkeit entlang solcher „reaktiver“ Störungs- bzw. Kluftsysteme ist möglich. Im Bereich Oelsnitz konnten bisher nur direkte bergbauinduzierte Hebungen und lokal Senkungen nachgewiesen werden (Plobner 1998, BRAUSE 1999). Der Untersuchungsumfang ist hier bisher jedoch wesentlich geringer als im Raum Zwickau.

Messungen rezenter natürlicher tektonischer Bewegungen und Ableitung von Druckregimes

Untersuchungen der vertikalen und horizontalen Kinematik u.a. im westlichen Teil der VES wurden in WITTENBURG (1997) dokumentiert und von BRAUSE (1999) zusammen mit weiteren Berichten vom selben Autor noch einmal zusammengefasst und komplex bewertet. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand die SE-NW verlaufende Gera-Jáchymov-Zone. So konnte auf Grundlage von Lagemessungen für den Bereich nordöstlich der Störungszone ein **kompressives Druckregime**, für den Bereich südwestlich der Störungszone ein **extensives Druckregime** abgeleitet werden. Damit verbunden ist eine relative Hebung des südwestlich der Störungszone gelegenen Gebietes gegenüber dem nordöstlich derselben gelegenen Gebietes. Die **Gera-Jáchymov-Zone** stellt sich somit als eine Art Trennstruktur zwischen Gebieten unterschiedlichen Stressregimes dar. Daraus lässt sich nach WITTENBURG (1997) eine bergbau-unbeeinflusste rezente tektonische Aktivität der Gera-Jáchymov-Zone ableiten. Die natürlich induzierten Versetzungsbeträge entlang einzelner Störungsbahnen können, **vertikal als auch horizontal, bis 1 mm/a betragen**. Für den westlichen Teil der VES betrifft dies insbesondere die **Oberhohndorfer Hauptverwerfung und den Brückenbergsprung**.

Das oben genannte rezente extensive Druckregime **südwestlich der Gera-Jáchymov-Zone** könnte ein Hinweis auf eine - im Vergleich zum nordöstlich gelegenen Gebiet – generell **erhöhte hydraulische Durchlässigkeit** der Kluft- bzw. Störungssysteme sein. Für den **östlich der Zone gelegenen Bereich** ist aufgrund des um N-S (SSW-NNE bis NNW-SSE) wirkenden kompressiven Druckregimes eine **Einengung E-W ausgerichteter Klüfte und Störungen** möglich. Dabei ist dieses Kompressionsregime in der Interpretation von WITTENBURG (1997) sehr differenziert dargestellt, jedoch aufgrund der begrenzten Anzahl von Stützpunkten in gewissem Rahmen variabel interpretierbar. Dennoch könnte sich auf dieser Grundlage eine generelle Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeiten für Störungen und Klüfte ableiten. Feldbeobachtungen und Tests entlang der nordöstlich von Zwickau gelegenen Lungwitztalzone, einer hydraulisch aktiven Kluftzone, bestätigen diese Annahmen. Diese zunächst in NW-SE Richtung verlaufende Kluftzone schwenkt nach E in eine E-W und letztlich NE-SW Richtung um. Gleichmaßen nehmen die entlang der Störungszone ermittelten Transmissivitäten nach Osten hin ab (Abschnitt 4.3.2). Dies entspricht der Entwicklung des Kompressionsregimes nach WITTENBURG (1997) in diesem Bereich.

Im Kontext des exakten Nachweises tektonisch induzierter Verschiebungen zeigt BAF GEODAESIE (2006), dass durch Vernetzung von SAPOS¹ Stationen im westsächsischen/thüringischen Raum auf Grundlage von ITRF-Lösungen² (KOSTELEKY 2002) auch ge-

¹ SAPOS: Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung

² ITRF: International Terrestrial Reference Frames. ITRFs sind Lösungen des „International Terrestrial Reference System“ (ITRS) für beliebige Jahre

ringste Strainraten von kleiner 10^{-8} /a, wie sie im Bereich Westsachsen auftreten, messbar sind. Diese moderne Methodik bietet neben der Evaluation und Korrektur bisheriger Bestimmungsverfahren (WITTENBURG 2005) auch Ansätze für eine exakte Bestimmung horizontaler Krustenbewegungen im regionalen Maßstab.

Für das sich südwestlich der Vorerzgebirgssenkung **anschließende Vogtland** können im Rahmen des Geodätischen Überwachungsnetzes Vogtländisches Bebengebiet (WENDT 1999) in ihrer Ausrichtung zeitlich schwankende horizontale Lageverschiebungen zwischen den Messstationen nachgewiesen werden. Sie stellen das Ergebnis seismischer Ereignisse (siehe unten) und der zugehörigen elastischen Ausgleichsbewegungen dar. Die zunächst unsichere (LfUG 2002) Zuordnung der Erdbebenherde zu konkreten Störungsbahnen und ihre Korrelation zu oberflächlich austreichenden Störungen konnte durch Präzisionslokalisierungen 2002 und 2003 weiter abgesichert werden (LfUG 2004). Dazu gehören z.B. die durch BERGER (1997) ausgewiesenen Bergen-Klingenthal- und Reichenbach-Schöneck-Erlbach Störungszonen. Hier können jährliche Verschiebungsbeträge zwischen den Messpunkten von bis zu mehreren Millimetern (z.B. Station 5 Landwüst, Wirtsberg) beobachtet werden (LfUG 2002).

Inwieweit diese Verschiebungen entlang einzelner Klüfte oder Störungen realisiert werden und damit die hydraulische Durchlässigkeit der tektonischen Strukturen beeinflusst wird bleibt unklar. Prinzipiell kann sicherlich von einer Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeiten bei Bewegung entlang von Störungen und Klüften ausgegangen werden.

Seismologische Messungen:

Die Auswertung seismologischer Messungen durch WENDT et al. (1996) sowie kontinuierliche Aufzeichnungen im Rahmen der durch den Seismologieverbund Sachsen zur Erdbebenbeobachtung gesicherten seismologischen Überwachung von Sachsen durch Regionalnetzstationen (GRSN) in Verbindung mit dem seismischen Online- und Offline-Netz („Sachsennetz“ der TU Bergakademie Freiberg und der Universität Leipzig) (PÄLCHEN et al. 2005 u.a.), zeigen dass **rezente Erdbeben-Epizentren** an die NW-SE Richtungen der **Gera-Jachymov Zone** sowie an die N-S Richtungen der meridionalen **Zone von Plauen-Leipzig-Dessau-Regensburg** gebunden sind (LfUG 2004, LfUG 2002, LfUG 2000). Die Mehrzahl der zwischen 2000 und 2005 identifizierten Epizentren von Mikrobeben liegen dabei entlang letzterer, weshalb in länderübergreifender Kooperation die Bereiche Westsachsen (Projekt „Regionales seismologisches Monitoring Westsachsen“ des LfUG, der WISMUT und der Landestalsperrenverwaltung) und Ostthüringen (Ostthüringer seismisches Netz der Universität Jena – OTSN) Untersuchungsschwerpunkte darstellen.

Kontinuierliche Messungen der Arbeitsgruppe Seismologie des Instituts für Geophysik (BAF SEISMIK 2006) bestätigen **seismische Aktivitäten** entlang der Gera-Jachymov- und der Plauen-Leipzig-Dessau-Regensburg-Störungszonen.

Vermutliche **Ursache der Intraplattenseismizität** in Westsachsen und Thüringen ist nach neueren noch nicht abgeschlossenen wissenschaftlichen Untersuchungen im Rahmen des internationalen seismologischen Tomografieexperimentes BOHEMA (LfUG 2004) ein „gegen die Kruste drückender Magmenkörper im Erdmantelbereich“. HOFMANN (2003) geht konkreter von einem „Magmensystem“ und schließt im Ergebnis gravimetrischer Modellierung

gen eine Mantelaufwölbung aus. Weitere Erkenntnisse hierzu werden aus dem 2003 begonnenen Messungen im Rahmen des Projektes SUDETES 2003 (LfUG 2004) erwartet.

Die Magmen und insbesondere die Krustenfluida bewirken beim Aufsteigen Porendruck- und Temperaturänderungen in der Oberkruste (KURZ et al. 2003, 2004), die sich in Verbindung mit durch Horizontalverschiebungen hervorgerufenen Spannungsfeldern (HOFMANN 2003) nachfolgend durch flache Erdbeben, zumeist Schwarmbeben, mit Herdtiefen kleiner als 10km, auflösen können. In den Kontext dieses neuen seismogenetischen Modells sind also auch die in LfUG (2004) zitierten tiefreichenden Krustenstrukturen in Westsachsen, das Auftreten von Krustenfluiden und –entgasungen im Vogtland und in Böhmen (WEINLICH 1999), die dortigen zahlreichen Vorkommen höher mineralisierter Wässer, sowie der nachgewiesene subrezente Vulkanismus und neotektonische Krustenbewegungen einzuordnen.

Interessant für die Vorerzgebirgssenke ist der genannte Bezug zum Auftreten höher mineralisierter Wässer. Die hydraulischen Durchlässigkeiten der Gesteine nehmen mit der Teufe stark ab und liegen in wenigen 100m Teufe i.d.R. schon mehrere Größenordnungen unter denen oberflächennaher Gesteine. Für den Bereich der Vorerzgebirgssenke ist ein Einfluss der oben diskutierten möglichen Magmensysteme und aufsteigenden druckaufbauenden Fluida auf die Chemie tieferer Grundwässer im Rotliegenden zwar möglich. Ein Aufsteigen hoch mineralisierter Wässer bis in den Bereich oberflächennaher Grundwässer sowie eine quantitativ wesentliche horizontale Migration solcher Wässer ist aufgrund der geringen Durchlässigkeiten im tieferen Rotliegenden auf Grundlage bisheriger Erkenntnisse nicht zu erwarten (Abschnitt 4.6). Solche extrem langsamen Fließgeschwindigkeiten konnten mit dem großräumigen hydraulischen Modell in dieser Arbeit belegt werden (Abschnitt 4.9). Ein sichtbarer unmittelbarer Einfluss tiefkrustaler Fluida wie eruptive Austritte von CO₂ oder plötzliche lokale Änderungen des Grundwasserspiegels sind – im Gegensatz zum Vogtland – aus der Vorerzgebirgssenke nicht bekannt.

LfUG (2004) nennt die Möglichkeit der Erweiterung oder Schließung von Wegsamkeiten durch aufsteigende Fluida bzw. ansteigende Porenwasserdrücke im Vogtland. Dazu liegen aus anderen Senkenstrukturen Erkenntnisse vor (Abschnitt 4.1). Ob dies auch auf den Bereich des tieferen Rotliegenden der Vorerzgebirgssenke übertragen werden kann muss nachgewiesen werden.

Neben den natürlichen Erdbeben, werden auch **künstlich induzierte Beben** durch Sprengungen und Brüche als Folgeerscheinungen des untertägigen Bergbaus, insbesondere bei der Flutung von Grubenbauen im Rahmen des Sachsennetzes und in Zusammenarbeit mit Netzen in angrenzenden Regionen kontinuierlich aufgezeichnet (LfUG 2002, LfUG 2004).

Diese tektonischen und induzierten Spannungen sind eine Ursache der oben diskutierten rezenten Bewegungen entlang von Störungszonen

Lithologisch-phänomenologische Ansätze, Gesteinseigenschaften

Gesteinseigenschaften wie Plastizität, Elastizität, Sprödigkeit, Zähigkeit haben sowohl Einfluss auf die Bildung von Klüften oder Störungen unter Stress als auch auf das Verhalten dieser Trennflächen nach ihrer Bildung in Reaktion auf Faktoren wie Zeit, Druck und/oder Grundwasser. So können sich Klüfte bei plastischen oder elastischen Gesteinen, z.B. viele

Ton- und Schluffsteine auch ohne das entsprechende Druckregime wieder schließen. Darüber hinaus neigen bestimmte gesteinsbildende Minerale wie Tonminerale zur Quellung bei Wasserzutritt. Das kann bei wasserführenden Klüften und Störungen zur Versieglung dieser führen. Die Lösung bestimmter Minerale, z.B. aus den Bindemitteln der Sedimentgesteine (z.B. Karbonate und Sulfate) kann dagegen zur Ausbildung sekundärer Porosität führen, deren Ausfällung in Klüften und Störungen trägt wiederum zur Versieglung bei.

Der ursächliche Zusammenhang zwischen der Lage und Ausbildung von Störungen und ihren hydraulischen Eigenschaften ist Schwerpunkt verschiedener Untersuchungen. DÖBBER et al. (2002) korrelieren die Wahrscheinlichkeit der Zusetzung von Störungen durch Lettenbildung mit den Versetzungsbeträgen entlang einer Störung.

HOUGH et al (2006) untersuchen an Klüften u.a. in permokarbonen Senken in Großbritannien Korngröße, Verfestigungsgrad und Genese (z.B. glazial) von Kluftfüllungen. Diese können in Abhängigkeit dieser Merkmale die hydraulischen Eigenschaften der Kluft bestimmen und Fließwege verändern. Anthropogener Stress auf sensitive Kluftsysteme kann zudem Kluftigenschaften signifikant ändern. So können unverfestigte Bindemittel umgelagert werden.

Brunnentests in Störungs- bzw. Kluftbereichen, auch in der Vorerzgebirgssenke, können also durch stressbedingte Materialumlagerungen in ihrer Reaktion vom Verhalten natürlicher Systeme abweichen. Dies kann sowohl zur Erhöhung (Ausspülung von Material) als auch zur Verringerung („clogging“) von Kluftergiebigkeiten führen und somit für die Interpretation hydraulischer Tests in der Vorerzgebirgssenke, insbesondere für die Ableitung allgemeingültiger Aussagen von Bedeutung sein.

Auf Grundlage von lokalen und regionalen Felduntersuchungen in den Niederlanden und Deutschland zum hydraulischen Verhalten von Störungen (BENSE et al. 2003) wurden Algorithmen zur Abschätzung von Störungsweite, lithologischer Heterogenität und hydraulischer Anisotropie auf Grundlage des Verschiebungsbetrages und Tongehaltes der umgebenden Gesteine entwickelt (BENSE et al. 2005). Danach ergeben sich hydraulische Anisotropien entlang der Störungsbahnen von 2 bis 3 Größenordnungen. In Modellrechnungen erwiesen sich gerade stark inhomogene hydraulisch anisotrope Störungsbahnen als wirksame vertikale Verbindungen zwischen Grundwasserleitern. Gleichzeitig stellten solche Störungsbahnen jedoch wirksame Barrieren horizontalen Grundwasserflusses dar.

Diese Annahmen werden durch Feldbeobachtungen an Störungszonen in der Vorerzgebirgssenke, insbesondere im Raum Zwickau, bestätigt. Auch wenn diese Ansätze aufgrund lithologischer und struktureller Unterschiede nicht direkt übernommen werden können, weisen sie einerseits auf die große hydraulische Inhomogenität von Störungs- und Kluftbereiche hin und erklären andererseits das oberflächennahe Auftreten höher mineralisierter Grundwässer als Folge vertikaler Wirksamkeit von Störungen bzw. den begleitenden Kluftzonen (Abschnitt 4.2).

Die Schichtenfolgen des Karbon und Rotliegenden in der VES zeichnen sich insgesamt durch einen hohen Anteil an als relativ plastisch und quellfähig geltenden Gesteinen aus. Dazu gehören die Kohlen und Schiefertone/Tone des Karbons sowie die z.T. mächtigen Schiefertone-, Ton- und Schluffsteinfolgen des Rotliegenden (Abschnitt 3.2. / Tabelle 6 in

Abschnitt 3.2). Darüber hinaus sind insbesondere karbonatische Bindemittel in allen Folgen verbreitet. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass Klüfte und Störungen im Bereich der VES häufig zur Verschließung durch die oben genannten Prozesse neigen. Die daraus resultierende Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeit von Klüften und Trennflächen verhält sich - entsprechende Gebirgsdruckverhältnisse vorausgesetzt - somit proportional zur Zeit. Kompressive Druckregimes sowie die Zirkulation von Grundwasser und damit verbundene beschleunigte Mineralquellungs- und Ausfällungsprozesse können diesen Prozess beschleunigen.

Die Aussagen zur Korrelation von Versetzungshöhe an Störungen und Lettenbildung (DÖBBER et al. 2002, siehe oben) suggerieren die Einstufung herzynischer Störungen mit ihren z.T. deutlichen Versetzungsbeträgen als geringer durchlässig. Aus Feldbeobachtungen (bergmännische Aufschlüsse, Bohrungen) sind solche geschlossenen bzw. zugesetzten/verlehnten Störungen und Klüfte in der Vorerzgebirgssenke bekannt. Gleichmaßen gibt es jedoch zahlreiche wasserführende tektonische Strukturen in denen Lettenbildung nicht bzw. noch nicht zur Versiegelung geführt haben. Bei letzteren handelt es sich auch um herzynisch (NW-SE) oder untergeordnet, N-S gerichtete Strukturen.

Reaktivierungen von Störungen führen zudem oftmals zu Kluftbildungen im weiteren Störungsbereich ohne Aktivierung der ursprünglichen Verschiebungsbahnen. In diesem Fall ist die Bedeutung der zumeist verlehnten Störungsflächen für die hydraulische Durchlässigkeit des Störungsbereiches insgesamt gering (siehe unten). Letztlich kann, wie BENSE et al. (2003, 2005) (siehe oben) und Feldbeobachtungen zeigen, von einer zumindest vertikalen hydraulischen Wirksamkeit, auch teilweise verlehnter Störungsbereiche ausgegangen werden.

CONSTANTIN et al. (2004) unterstreichen anhand von Untersuchungen an Tonsteinen im Causses Basin (Frankreich) die große Bedeutung tektonischer Aktivität nicht nur für die Anlage von Störungen und Klüften sondern insbesondere für ihre Reaktivierung. Dabei ist der zeitliche Wechsel in den hydrodynamischen Eigenschaften äußerst differenziert wie anhand von Kluftfüllungen nachgewiesen werden konnte. Sie waren Störungen während tektonischer Ereignisse wiederholt Änderungen in Bezug auf ihre Durchlässigkeit für Fluida, zwischen gut durchlässig und hemmend, unterworfen.

Dies unterstreicht die Bedeutung der tektonischen Entwicklung für die Ableitung von Aussagen zu den hydraulischen Eigenschaften von Klüften und Störungen in der Vorerzgebirgssenke, die offensichtlich nicht nur durch das rezente Stressregime bestimmt werden. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass die heutige Positionierung gering-mobiler tiefer Grundwässer, wie z.B. der höher mineralisierten Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke (Abschnitt 4.6), maßgeblich auch auf historische hydraulische Regimes, inklusive ihrer Kluft- und Störungssysteme, zurückgeführt werden kann.

Anhand von Detailuntersuchungen im Zentrum der Störungen (Kernbereich oder „core zone“) und im Bereich begleitender Mikroklüfte und Klüfte (Randbereich oder „damage zone“) zeigen CONSTANTIN et al. (2004) u. a. die Bedeutung des Randbereiches für die Permeabilität der Störung, die sich aus dem Zusammenwirken unterschiedlicher Porositätstypen und ihrer Konnektivität ergibt. Bei komplett versiegeltem Kernbereich erwiesen sich Störungen aufgrund der Wirksamkeit des zumeist höher porösen (Kluft-hohlraum) Randbereiches immer noch als „halb durchlässig“.

Dies unterstreicht die Bedeutung von störungsbegleitenden Kluftscharen für die Gesamt-

durchlässigkeit von Störungszonen auch in der Vorerzgebirgssenke. Hydraulische Tests, z.B. im Raum Zwickau (Abschnitt 4.2.4) konnten für zentrale Bereiche von Störungen (z. B. der Oberhohndorfer Hauptverwerfung) häufig nur geringe Wasserführungen nachweisen. Daraus pauschal einen grundwasserhemmenden Charakter für gesamte Störungsbereiche abzuleiten würde verkennen, dass Störungszonen zumeist sehr komplexe räumliche Gebilde aus vielen unterschiedlich orientierten und dimensionierten, miteinander verbundenen Trennflächen darstellen, die in ihrer Gesamtheit und in unterschiedlichen Richtungen zumeist hydraulische Wegsamkeiten darstellen.

Es muss deshalb vermutet werden, dass diese punktuellen Tests für die Gesamtdurchlässigkeit des weiteren Störungsbereiches oft nicht repräsentativ sind und die tatsächliche hydraulische Durchlässigkeit der Störungszone i.d.R. unterschätzen.

Die Bewertung der hydraulischen Wirksamkeit von Störungszonen in der Vorerzgebirgssenkerraum im Lichte neuerer Forschungen wie folgt zusammengefasst werden

- Störungen die horizontale Barrieren für den Grundwasserfluss darstellen, wirken in Streichrichtung und insbesondere vertikal häufig Grundwasser leitend
- gerade inhomogene hydraulisch anisotrope Störungsbahnen wirken insgesamt oft als hydraulisch durchlässige Systeme
- die differenzierte tektonische Entwicklung in der Vorerzgebirgssenke ist für die Erklärung rezenter hydraulischer Regimes mit verantwortlich
- die Durchlässigkeit von Störungszonen insgesamt ist maßgeblich von den begleitenden Kluftsystemen mit bestimmt
- Tests auf Störungsbereichen können die natürlichen hydraulischen Eigenschaften des Systems stören

Schlussfolgernd bietet sich folgender konzeptioneller Ansatz für die großräumige Einordnung von Störungszonen in das hydrogeologische System Vorerzgebirgssenkerraum an. Störungsbahnen können, soweit keine spezifischen Erkenntnisse vorliegen, als hemmend für den Grundwasserfluss quer zum Störungstreichen eingeordnet werden. In Streichrichtung und insbesondere vertikal sind Störungen dagegen eher hydraulische leitende Strukturen. Zur Beschreibung von Grundwasserfluss entlang von Störungen wird für die großräumige Betrachtung über das Konzept „Störungszone“ realisiert. Dabei findet Grundwasserfluss entlang eines weiteren Bereiches statt, der sowohl die Störungsbahnen selbst, als auch die zahlreichen begleitenden Kluftzonen und einen Randbereich einschließt.

Dieser Ansatz wird dabei sowohl mit den tektonischen Spannungsfeldern der jüngeren geologischen Entwicklung (Abschnitt 3.3, Tabelle 7) als auch mit Beobachtungen und Messungen des heutigen Spannungsregimes abgeglichen (siehe oben).

Feldbeobachtungen

Feldbeobachtungen und –untersuchungen im Bereich von Störungs- und Kluftzonen erbrachten zahlreiche Hinweise zu deren Wasserführung. Sie bestätigen prinzipiell die zuvor herausgearbeitete Annahme einer erhöhten hydraulischen Wegsamkeit herzynisch (NW-SE) und untergeordnet erzgebirgisch (NE-SW) orientierter Störungs- bzw. Kluftsysteme. Andererseits zeigen Feldbeobachtungen aber auch, dass als hydraulisch wirksam geltende Störun-

gen in Bereichen kaum Grundwasser führen bzw. die Grundwasserführung schon in wenigen 10er Metern Teufe, unterhalb der in ihrer Mächtigkeit stark wechselnden Auflockerungszone, deutlich nachlässt. Zu diesen Feldbeobachtungen gehören z.B. Kartierungen von Vernässungszonen und Quellen, Abflussmessungen an Quellen, Beobachtung von Wassereintritten beim Abteufen von Bohrungen bzw. bei der Anlage von Schürfen oder Baugruben, Pumpversuche und Dokumentationen aus dem Bergbaubetrieb (z.B. Wasserzutritte). Auf diese Beobachtungen und Untersuchungen wird in Abschnitt 4.2 näher eingegangen.

Zusammenfassend kann deshalb für die Vorerzgebirgssenke von folgenden Grundannahmen ausgegangen werden:

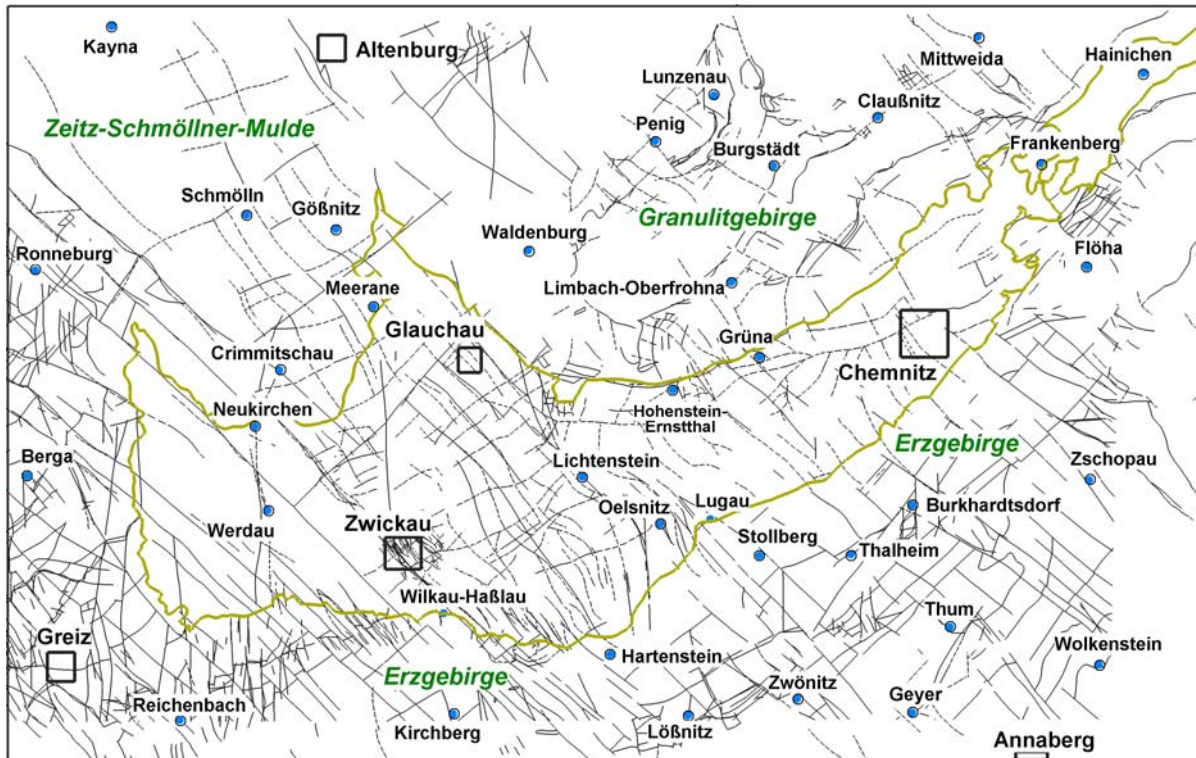
- Auf den um NW-SE und mit Einschränkung N-S orientierten Klüftungen und Störungen bzw. den begleitenden Kluftzonen kann im regionalen Maßstab mit erhöhtem Grundwasserfluss gerechnet werden. NE-SW gerichtete Elemente können vor allem kleinräumig von Bedeutung sein.
- Im Bereich der Gera-Jachymov Zone (über die Stadt Zwickau in NW-SE Richtung streichend) allgemein und insbesondere im Bereich des ehemaligen Steinkohlenbergbaus kann von erhöhten hydraulischen Leitfähigkeiten ausgegangen werden. Das gilt auch für Querstörungen in diesem Bereich.
- Auf tektonische Strukturen im Gebiet südwestlich der Gera-Jachymov Zone sind insgesamt höhere Transmissivitäten zu erwarten als im Gebiet nordöstlich dieser Zone. Nordöstlich der Gera-Jachymov Zone ist insbesondere bei um SSW-NNE bis NNW-SSE streichenden Störungs- und Kluftzonen mit verringerten Durchlässigkeiten zu rechnen.
- Insbesondere herzynische Störungszonen können quer zur Streichrichtung eine wirksame Barriere für den Grundwasserfluss darstellen. In Streichrichtung und insbesondere vertikal sind dennoch oft grundwasserleitend. Dies betrifft insbesondere großmaßstäbliche Betrachtungen (z.B. im Senkenmaßstab) in denen Störungsbereiche als um ihre begleitenden Kluftscharen erweiterte breite Zonen betrachtet werden.
- Die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung belegen viele dieser Grundannahmen. Sie werden anhand praktischer Beispiele in Abschnitt 4.9 diskutiert.

4.3.2 Hydraulische Wirksamkeit von Störungs- und Kluftzonen in der Vorerzgebirgssenke

Das hydraulische Regime in der Vorerzgebirgssenke wird ausserhalb der Quartärablagerungen der größeren Täler maßgeblich von Störungs- und Kluftzonen bestimmt. Dabei kann von einem stark variierenden Grundwasser-Fließregime ausgegangen werden, da sich Gebiete mit hoher Kluft- und Störungsdichte mit tektonisch wenig beanspruchten Bereichen abwechseln und Bereiche hydraulisch aktiver Klüfte und Störungen in Bereiche geringerer Aktivität übergehen. Die Mehrzahl der großen hydraulisch aktiven Störungs- und ihrer begleitenden Kluftzonen- bzw. reiner Kluftzonen, sowie deren Kreuzungsbereiche befinden sich im zentralen Teil der VES, im Raum zwischen Werdau und Oelsnitz (Abschnitt 4.2).

Abbildung 11 zeigt eine Zusammenstellung wichtiger sicherer und vermuteter tektonischer

Strukturen auf Grundlage der Auswertung verschiedener hydrogeologischer Kartierungen und Gutachten. Deutlich erkennbar sind die vorherrschenden herzynischen und erzgebirgischen Richtungen. Ausdünnungen der Störungsdichte am unteren und rechten Modellrand sind auf die Blattschnittbegrenzungen der Hydrogeologischen Übersichtskarte 1 : 200.000 (HÜK 200) zurückzuführen. Die hohe Störungsdichte im Bereich Zwickau ist auch auf den hohen Untersuchungsgrad in diesem Raum zurückzuführen.



Abbildungung 11 Sichere und vermutete tektonische Strukturen in der Vorerzgebirgssenke und ihrem Umland (Erläuterungen, vgl. Text)

Im folgenden werden solche Störungs- oder Kluftzonen als „hydraulisch aktiv“ bezeichnet, wenn diese Transmissivitäten von mindestens $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ aufweisen. Dieses Kriterium trifft häufig auch nur für Teilabschnitte bzw. bestimmte Teufenbereiche einer als „hydraulisch aktiv“ gekennzeichneten Störung zu (siehe unten).

Die Auswertung der vorliegenden Unterlagen ergab für hydraulisch aktive Störungszonen im Untersuchungsgebiet mittlere Transmissivitäten zwischen 10^{-4} und $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, lokal auch bis $>10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ auf. Die Transmissivität des Nebengesteins in den oberflächennahen Bereichen liegt dabei um ein bis zwei Größenordnungen tiefer (ZGI 1984, PAUL 1998b, G.E.O.S. 1996, T&P 1997 u.a.). Ihre Ausstrichbreite beträgt erfahrungsgemäß zwischen 100 m und 200 m (VEB HYDRO 1972 u.a.), die begleitender großer Klüfte meist bis 2 m (max. bis 15 m) (ARNOLD 1900). Für den Bereich der Gera-/ Mülsen-Folge beträgt nach JORDAN & WEDER 1995 der Transmissivitätskontrast zwischen gestörten und ungestörten Bereichen mehr als 2 Größenordnungen (10^{-2} bis $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ zu 10^{-4} bis $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

Hydraulische und hydrochemische Inhomogenität von Störungen

Aufgrund der wechselnden Beschaffenheit der Störungsbahnen ist die hydraulische Leitfähigkeit in Intensität und Reichweite sehr unterschiedlich. So können Störungen einerseits lokal höher leitfähige Strukturen darstellen. Das gilt z.B. für die Oberhohndorfer Hauptverwerfung (im folgenden als OHV bezeichnet) mit vermuteter Querstörung am Kornmarkt, für die Oberrothenbacher Störung, für den nördlichen Teil der Rödlitzer Hauptverwerfung (im folgenden als RHV bezeichnet), sowie für deren nordwestliche Fortsetzung im Raum Glauchau-Meerane. Verlehnte oder anderweitig zugesetzte Bereiche wirken andererseits häufig auch als flächige Grundwasserbarrieren im Kluftgrundwasserleiter und sorgen, wie z.B. im Raum Zwickau (HGC 2002) oder entlang der RHV zwischen Rödlitz und Waldesruh nachgewiesen, selbst auf großen Störungen für eine Minimierung von Grundwasserzuflüssen. Darüber hinaus kann selbst bei deutlich sichtbarer Klüftung, die Grundwasserführung insbesondere mit zunehmender Teufe, sehr gering sein. Bei Arbeiten in Zwickau-Schedewitz (GUB 2001, HGC 2002, LFUG 2006) und in der Innenstadt (Baugrube Kornmarkt, siehe unten) konnten Störungen (z.B. die Oberhohndorfer Hauptverwerfung) und Kluftbereiche in der dort anstehenden Leukersdorf-Folge vertikal aufgeschlossen werden. Dort wurden auf engstem Raum höher mineralisierte Wässer beobachtet, die sich bezüglich (Schüttungs-)Menge, Alter und Chemismus deutlich von einander unterscheiden. Grundwasserführende Störungsabschnitte gingen dabei in „trockene“ bzw. verlehnte/zugesetzte über und umgekehrt. Generell nahm die Wasserführung mit der Teufe ab. Im Bereich der liegenden Planitz-Folge konnte so kaum noch eine Grundwasserführung beobachtet werden.

Die oben genannten groben Angaben zu den Durchlässigkeiten sind deshalb als Richtwerte für hydraulisch aktive Störungs- und Kluftbereiche zu sehen und gelten für Bereiche die durch einen entsprechenden Pumpversuch erfasst werden. Diese Angaben sind also i.d.R. nicht für größere Störungsabschnitte oder ganze Störungen gültig.

Pumpversuche stellen nur punktuelle, maximal lineare Aufschlüsse dar, die meist nur die hydraulischen Eigenschaften des Gesteins, bzw. des Störungs- oder Kluftkörpers, in der unmittelbaren Umgebung repräsentieren. Pumpversuchsbohrungen sind teufenmässig begrenzt. Andererseits können durch Querstörungen bzw. – kluftzonen nahe „dichte“ Störungsabschnitte (hydraulische Barrieren) überbrückt werden und so höhere hydraulische Durchlässigkeiten im Brunnenbereich vortäuschen.

Pumpversuche gehören dennoch auch im Bereich von Störungszonen zu den wichtigsten hydrogeologischen Tests, da sie i.d.R. in guter Näherung die hydraulische Durchlässigkeit des entsprechenden Störungsabschnittes repräsentieren. Für die Einschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit von Störungszonen im regionalen Maßstab (mehrere 100 m bis mehrere 10er km) müssen jedoch aus den genannten Gründen meist geringere Transmissivitäten angenommen werden als aus den Tests berechnet.

Andererseits kann aber eben aufgrund des meist heterogenen Störungsaufbaus im regionalen Betrachtungsmaßstab von einer hydraulischen Wirksamkeit vieler Störungszonen ausgegangen werden auch wenn auf Teilabschnitten lokal keine Grundwasserführung vorliegt.

Herzynische und erzgebirgische tektonische Richtungen

Im Abschnitt 4.3.1 wurde u.a. in Auswertung vergangener und rezenter tektonischer Span-

nungsfelder postuliert, dass Störungs- und Kluftzonen im westlichen Teil der Vorerzgebirgssenkung (im Bereich und westlich der Gera-Jachymov-Zone) höhere hydraulische Aktivitäten aufweisen als jene im zentralen und östlichen Teil. Darüber hinaus wurde geschlussfolgert, dass im gesamten Bereich der VES herzynisch (NW-SE) ausgerichtete tektonische Elemente besonders hydraulisch aktiv sind. Dies konnte durch zahlreiche, zumeist ältere, Feldbeobachtungen und Tests bestätigt werden (BLÜHER 1960, BRAUSE 1999, SCHRÄBER 1968, STUTZER 1935, TEICHERT 1995, ZGI 1984 u.a.). Letztere belegen darüber hinaus, daß im zentralen Teil der VES herzynisch und auch erzgebirgisch (NE-SW) orientierte tektonische Strukturen häufig höhere hydraulische Durchlässigkeiten aufweisen als gleichartige Störungs- und Kluftzonen im Osten der VES.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Grundwasserhaushaltsuntersuchungen unterstützen diese Aussagen (Abschnitt 4.4.3).

Heute gilt allgemein, dass die jüngeren erzgebirgischen Brüche die älteren herzynischen Störungen schneiden und gegebenenfalls versetzen. ARNOLD (1900) dagegen bezeichnet noch die herzynischen Störungen als die jüngeren. Wie schon in früheren Arbeiten dokumentiert, bestätigte sich im Rahmen der sogenannten „Komplexuntersuchung“ (Zusammenfassung in BRAUSE 1999) für den Raum Zwickau – Oelsnitz die Annahme, dass zahlreiche „Störungen“ eher als Störungssysteme zu betrachten sind. Während in karbonen und unterrotliegenden Schichtfolgen Störungen, z.B. in den Zwickauer Steinkohlengruben, noch als kompakte Strukturen kartiert werden (BSA 1981) fächern sie sich in Richtung Tagesoberfläche zu Störungsschwärmen oder –staffeln auf (HGC 2002, HGN 1998 u.a.). Problematisch bleibt weiterhin die Kartierung des Verlaufs von Störungsbahnen im Rotliegenden. Detaillierte Untersuchungen entlang vermuteter Störungen, z.B. der OHV im Bereich Schedewitz durch HGC (2002), zeigen immer wieder wie stark Lage und Ausbildung von Störungsbahnen im Rotliegenden variieren und von bisherigen Interpretationen und Untersuchungen (z.B. seismischer Erkundungsmaßnahmen) abweichen.

Bei einem Großteil der herzynischen und erzgebirgischen Störungen kann eine spätere Reaktivierung (Oberrotliegend bis Känozoikum) vermutet werden, wobei von sehr differenzierten Entwicklungsabläufen selbst einzelner größerer Störungen ausgegangen werden muss (Abschnitt 3.3 / Tabelle 7 in Abschnitt 3.3). Dies ist zurückzuführen auf ein sich fortwährend änderndes dynamisches regionales Druckregime, aus welchem nach BRAUSE et al. (1997) unterschiedlich konfigurierte, zeitlich wechselnde Konturen der Beckenräume resultieren. Eine Anzahl von großen Störungen pausen sich bis durch die Gera-/ Mülsen-Folge durch, sicherlich als Ergebnis postvariszischer saxonischer Tektonik (3.3).

Herzynische Störungszonen

Die herzynischen Störungssysteme (Streichen um NW-SE bis NNW-SSE) erweisen sich in der VES im Vergleich zu anders orientierten Störungen häufiger als grundwasserführende Strukturen mit größerer Reichweite. Sie stellen zudem mit einem Anteil von rund 80% die häufigste tektonische Richtung unter den größeren Störungen dar und sind für die überregionale hydraulische Einbindung der VES vermutlich von einiger Bedeutung. Bei den herzynischen Störungszonen handelt es sich vorwiegend um Abschiebungen mit einem durchschnittlichen Einfallen von 35°-55° im Karbon und deutlich steilerem Einfallen in den Rot-

liegend-Folgen (60-80°) nach NE. Die Einfallwinkel schwanken häufig auf kurzer Distanz, gelegentlich auch die Fallrichtung (GDD 2000, GDD 1997, ARNOLD 1900 u.a.). Die Sprunghöhen nehmen zum Beckenrand hin allgemein ab (BSA 1981, STUTZER 1935 u.a.). Im südlichen Teil der zentralen VES (Raum Oelsnitz) weisen im Gegensatz zum westlichen Teil der VES, sowohl herzynische als auch erzgebirgische Verwerfungen schon im Karbon ein in Betrag (40-70°) und Richtung stark schwankendes Einfallen auf. Typisch sind zudem kurze Störungsfragmente, stark schwankende Abschiebungs- und Versetzungsbeträge sowie das Auftreten von Staffelbrüchen.

Tabelle 16 zeigt eine Auflistung der wichtigsten als hydraulisch aktiv bekannten Störungszonen im Untersuchungsgebiet, die alle herzynisch (NW-SE) streichen.

Tabelle 16 Wichtige hydraulisch aktive herzynische Störungszonen von W nach E)

Name (von W nach E) Versetzungsbeträge (V) Einfallen (E)	Mittelwerte/-bereiche (T in m ² /s bzw. k _f in m/s) <i>Einzelwerte aus Brunnentests</i> ¹⁾	Oberflächlich anstehende Folgen Bemerkungen/Beispiele
Störung bei Niederaltersdorf	T=10 ⁻³ -10 ⁻⁴ m ² /s; südwestl. der Störung bis 2 Größenord. geringer (ZGI 1984); mglw. lokal höher (im Bereich von 10 ⁻² -10 ⁻³ m ² /s) (vgl. Abschnitte 4.3.3 u. 4.4.3.3); im Grundgebirgsbereich (nw v. Blankenhain) mglw. 1-2 Größenord. geringer)	MlsF; Verlauf: 1,5 km sw und parallel zur Koberbachtal-Störung in der Ortslage Niederaltersdorf; GW-Haushaltsuntersuchungen (Abschnitte 4.3.3 und 4.4.3.3) geben Anhaltspunkte für einen evtl. deutlichen GW-Fluss entlang dieser Störung, nach SE, evtl. NW hin
Störung Koberbachtal V: ?; E: vermutlich steil	T=10 ⁻³ -10 ⁻⁴ T=2 - 4*10 ⁻⁴ ; k _f =2*10 ⁻⁵ ; mglw. lokal deutlich höher (im Bereich von 10 ⁻² -10 ⁻³) (vgl. Abschnitte 4.3.3 und 4.4.3.3)	MlsF; Verlauf: Rußdorf - NE-Ufer Koberbachtalsperre - Pleißeal; GW-Haushaltsuntersuchungen (Abschnitte 4.3.3 und 4.4.3.3) weisen auf intensiven GW-Fluss entlang dieser Störung, vermutl. nach SE hin
Störungsschar südlich von Werdau	mittl. T=10 ⁻³ -10 ⁻⁴ , (geschätzt n. VEB HYDRO 1977-82, ZGI 1984)	regionale SZ?, LkF, z.T. MlsF; Förderraten um 3 - 11 l/s bei Absenkungen von 2 - 23 m
Lauterbacher Störung / Oberhohndorfer Hauptverwerfung	T=2*10 ⁻³ -2*10 ⁻⁴ (PAUL 1998b) bzw. k _f -Werte von rund 3*10 ⁻⁶ (G.E.O.S. 1996)	MlsF, Teil der OHV im NW Zwickaus; Meßwerte beispielhaft für mehrere herzyn. Störungen im Bereich Helmsdorf-Dänkriz
Oberhohndorfer Hauptverwerfung V: 80-250m; stark schwankend; E: 35°-80° (Karbon), 50-80° (Rotliegend) nach NE ⁵⁾	T=10 ⁻² -10 ⁻⁴ ; in Bohrlochtests im Raum Zwickau bisher jedoch kaum durchlässig (z.B. HGC 2002) – Hinweis auf stark variierende Durchlässigkeiten; im Rotlieg. im SE Zwickaus mittl. T:10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵ ; im Grundgeb. geringer; im Rotlieg./ Mesoz. nördl. der Pleiße 10 ⁻³ -10 ⁻⁴ ;	im SE LkF und liegende Einheiten am Beckenrand, im NW MlsF; Serie von Abschiebungen; gliedert sich nach NW in mehrere Verwerfungen auf; Fächert im Rotlieg. in Teilstörung auf u. verflacht; Kartierung schwierig (HGC 2002 u.v.a.); Nachweis höher mineralis. GW unterschiedl. Zusammensetzung. in gering Mengen und verschied. Teufen
Brückenbergsprung V: <80 m, max. 163 m; Breite ≤120 m; E: NE	T= 10 ⁻⁴ -5*10 ⁻⁵ (geschätzt)	LkF; nur im Bereich des Zwickauer Kohlenbergbaus erkundet; mit OHV in der Tiefe vermutlich zusammenlaufend
Reinsdorfer Sprung V: 35-100 m; E: SW	T=>10 ⁻³ -10 ⁻⁴ (7,1*10 ⁻³ ; k _f = 9,3*10 ⁻⁵) im weiteren Kontaktbereich MlsF / LkF südöstl. von Zwickau; südl. der Störung und am Beckenrand 1-2 Größenord. geringer; T=10 ⁻³ -10 ⁻⁴ im NW Zwickaus und bis >10 ⁻³ (2*10 ⁻⁴ – 1,1*10 ⁻³) im Zechstein und der Trias	In SE LkF/Mls-Kontaktbereich und liegende Einheiten am Beckenrand; in NW MlsF bis Zechstein/Buntsandstein

Name (von W nach E) Versetzungsbeträge (V) Einfallen (E)	Mittelwerte/-bereiche (T in m ² /s bzw. k _f in m/s) <i>Einzelwerte aus Brunnentests</i> ¹⁾	Oberflächlich anstehende Folgen Bemerkungen/Beispiele
Störungsschar um Meerane	T = 1·10 ⁻³ -10 ⁻² ; in Kreuzungsbereichen mit erzgeb. Störungen z.T. >10 ⁻² m ² /s (Buntsandstein/Zechstein)	Übergangsbereich: MlsF, Zechstein, Buntsandstein; sehr hohe Ergiebigkeiten im Überlagerungsbereich des Buntsandstein
1. Pöhlauer Sprung V: max. 150 m; E: SW	T = 10 ⁻³ 10 ⁻⁵ m ² /s; z.T. auch geringer (10 ⁻⁶) (interpretiert nach VEB HYDRO 1977-82, ZGI 1984)	MlsF, in SE Kontakt LkF; zu Indizien auf hydraulische Aktivität vgl. Abschnitt 4.4.3; hydraul. aktive Fortsetzung nach NW unklar
2. Pöhlauer Sprung (Mülsenbach-Störung) V: max. 90 m; E: SW	T = >10 ⁻³ -10 ⁻⁴ (k _f = 10 ⁻⁴ - 2·10 ⁻⁴) (südöstlicher Abschnitt) und 10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵ (k _f = 3·10 ⁻⁷) (nordwestl. Abschnitt) (nach ZGI 1984, VEB HYDRO 1972)	MlsF; stark schwank. GW-Führung; viele ergieb. Tiefbrunnen auf Störung; häufig hang. u. lieg. GW-führender Bereich mit verlehmteter Trennschicht; Bohrung "Glückauf" Thurm (Kreuz mit Bruchzone zw. Thurm u. St. Egidien) 40 l/s (BLÜHER 1960); zu Indizien zur hydraul. Aktivität vgl. Abschnitt 4.4.3
Wernsdorfer Störung (1. Mülsener Sprung) Rothenbacher Störung V: max. 45 m; E: SW	T = 2,8-18·10 ⁻⁴ (k _f = 3·10 ⁻⁶ -10 ⁻⁵); bis 2,5·10 ⁻² (k _f = 2,9·10 ⁻⁴) im S bei Kreuzung mit Heegbachtal/2. Pöhlauer S.) T = 1,8·10 ⁻³ - 5·10 ⁻⁵ (k _f = 2·10 ⁻⁶ -2·10 ⁻⁵)	= Marienauer Sprünge; MlsF, in Nordabschnitt Quartärüberdeckung; südl. Fortsetzung im Bereich des 2. Pöhlauer Sprunges
Rödlitzer Hauptverwerfung (RHV) V: Staffelfruch; einzelne Abschiebungen bis über 225 m; insgesamt bis 350 m; E: steil nach SW (BSA 1974 u.a.)	<u>N-Abschnitt</u> : MlsF/LkF T = 3 bis 8·10 ⁻⁴ ; im Unterrotlieg., Grundgeb. und bei St. Egidien (T = 0,4·10 ⁻⁴ , STORCH et al. 1996) z.T. deutlich geringer <u>S-Abschnitt</u> : T = 1-4·10 ⁻⁴ (k _f = 4·10 ⁻⁷ -3·10 ⁻⁶); an Kreuzungen mit Querstör. bis 2·10 ⁻³ (k _f bis 4·10 ⁻⁴); T-Kontrast zum Nebengestein = 10 ⁻¹ -10 ⁻² (VEB HYDRO 1982b, ZGI 1984) mit Zunahme T nach NW (C&E 2001)	bei St. Egidien sind auch Grundwässer tieferer Störungsbereiche erschlossen – NaCl-Wässer und Abnahme von T (!) Diskussion von Indizien für einen GW-Fluß auf der RHV auch in Abschnitt 4.4.3; MlsF, LkF (Kontaktbereich); Brunnen entlang der Linie Lichtenstein-Rödlitz-Oelsnitz fördern durchschnittlich 5-15 l/s, z.T. artesisch (BLÜHER 1960)
Pluto-Verwerfung V: insgesamt bis 150 m E: SW (BSA 1974)	T ca. 10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵ , lokal höher (1,5·10 ⁻⁴ , k _f ca. 2·10 ⁻⁶) (ZGI 1984, VEB HYDRO 1977-82)	LkF und liegende Einheiten am südl. Senkenrand; nach NW auffächernd
Gühne-Schacht-Verwerfung T = 10 ⁻³ -10 ⁻⁶ (Schätzung) V: 4-80 m (im Bereich Oelsnitz); E: SW (BSA 1974)		LkF und liegende Einheiten am Beckenrand
Karl-Schacht-Verwerfung T = 10 ⁻³ -10 ⁻⁶ (Schätzung) V: 44-53 m (im Bereich Oelsnitz); E: NE (BSA 1974)		LkF und liegende Einheiten am Beckenrand
Störungsbahn zwischen Langenberg, Wüstenbrand, Ursprung und Jahnsdorf , E: steil T = 10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵ , lokal bis 10 ⁻³ (nordwestl. v. Ursprung); am Senkenrand erhöht (10 ⁻³ -10 ⁻⁴); im Grundgebirge geringer (< 10 ⁻⁵)		LkF; im Zentralteil der VES MlsF; im Senkenrandbereich tieferes Rotliegend und Grundgebirge; Verlauf nur z.T. sicher bekannt; durchgehender Verlauf/hydraulische Aktivität vom Erzgebirgskristallin durch die VES bis in das Granulitgebirge unsicher
Störungsbahn zwischen Leukersdorf und Jahnsdorf , E: steil T = 10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵ , am Senkenrand erhöht; im Grundgebirge geringer		
Störungsscharen im Chemnitztal (vermutet)	Südl. Senkenteil (Unterrotlieg. und Karbon): T = 10 ⁻³ -10 ⁻⁴ ; Nördl. Senkenteil (außer HtF): T = 10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵ ; HtF und lokal: T = 10 ⁻³ -10 ⁻⁴	LkF u. lieg. Einheiten (inkl. Hainichen und Flöhaer Schichten am nördl. Beckenrand); vermutl. Grundwasserabfluss nach N (vgl. Abschnitt 4.4.3.3)

Name (von W nach E) Versetzungsbeträge (V) Ein- fallen (E)	Mittelwerte/-bereiche (T in m ² /s bzw. k _f in m/s) <i>Einzelwerte aus Brunnentests</i> ¹⁾	Oberflächlich anstehende Folgen Bemerkungen/Beispiele
Lungwitztalzone V: keiner bekannt ³⁾ E: steil nach S (um SW- SE schwankend)	Östl. Abschnitt (Chemnitz bis Ober- lungwitz): T=2·10 ⁻⁴ bis 10 ⁻³ (BEIER et al. 1986, STORCH et al. 1996, ZGI 1984); Mittl. Abschnitt (bis westl. St. Egidien): 10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵ ; Westl. Abschnitt (Niederlungw.-Glauchau): T=1,5·10 ⁻⁴ bis 3,5·10 ⁻³ (ZGI 1984, VEB HYDRO 1982b)	meist LkF; im Westen Quartärüberdeckung, verläuft südl.- parallel zur Granulitgebirgs- randstörung; ergiebige Tiefbrunnen im Stör- ungsbereich (VEB HYDRO 1982b); NaCl- reiche Wässer südl. v. Kuhschnappel auf rhein. Querstör.; zu Indizien auf hydraul. Ak- tiv. vgl. Abschnitt 4.4.3
Granulitgebirgs- Randstörung V: gestaffelte Abschieb. m. stark variier. Beträgen E: variierend um S ⁴⁾	entlang der Struktur stark variierend; von stauend bis gut leitfähig, insbes. an Störungskreuzen; im östl. und westl. Abschnitt T um 10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵ ; im Bereich H.-Ernstthal stark schwan- kend (T= 10 ⁻³ -10 ⁻⁶); an Querstörun- gen häufig 1 Größenord. höher	Kontakt Permokarbon mit Granulitgebirg- seinheiten; verschied. Stauquellenaustritte Bsp. GW-Gew.: PW Eisenstraße, H.-Ernstthal mit 16 l/s (BLÜHER 1960); wirkt eher als hydraulische Grenzfläche denn als hydrau- lisch leitende Struktur (T-Kontrast 10 ⁻¹ -10 ⁻³)

Quellen: Auswertung resultiert aus der Kombination und Interpretation von Daten der folgenden Quellen: Datenbank des FIS Hydrogeologie (vgl. Abschnitt 2.5), ZGI 1984, BSA 1981, BLÜHER 1960, VEB HYDRO 1977-82, STUTZER 1935, TEICHERT 1995, ARNOLD 1900, GK25 1975-1911, oder wie angegeben ¹⁾ die genannten Einzelmessungen beziehen sich meist auf höher durchlässige Bereiche der Störungszonen, die mglw. nicht repräsentativ für den gesamten Störungsbereich sind ²⁾ nach E in erzgebirgisches Streichen umschwenkend ³⁾ es sind keine wesentlichen Versetzungsbeträge entlang der Lungwitztalzone nachgewiesen; es handelt sich also eher um eine hydraulisch aktive, sehr weitreichende Kluftzone ⁴⁾ Versetzungsbeträge innerhalb des Rotliegenden: von einigen Metern, über 200 m bei Wüstenbrand bis über 600 m nördl. Gröna; Einfallen: 45 ° bis 75 ° nach S (um SW-SE schwankend); nach Ost abflachend (35 ° bis 50 °); z.T. gegenläufige Abschiebungen (einige 10er m) nach N; Horststrukturen ⁵⁾ GDD (1997, 2000), GMS (1967), RENNER (1998), SCHNEIDER et al. (2001); SZ = Störungzone

Erzgebirgisch und anders orientierte Störungszonen

Der Anteil erzgebirgisch orientierter Störungen an den größeren Störungen im zentralen Teil der VES beträgt rund 20% aus. Sie streichen um NE-SW, also rechtwinklig zu den herzynischen Strukturelementen und stellen, obwohl hydraulisch und geographisch meist weniger weitreichend als diese, mitunter gut durchlässige Brüche dar. Die erzgebirgischen Störungen entstanden durch starre Reaktion der spröden Rotliegend-Sedimente, insbesondere der konglomeratisch ausgebildeten Folgen, auf tektonische Beanspruchung (vgl. Abschnitte 3.3 und 4.3.1). Wenige der erzgebirgischen Störungen werden, wie auch einige herzynische, bereits oberkarbonischen Alters sein, da sie ältere Steinkohlenflöze versetzten und von jüngeren überlagert werden. Wie auch die herzynischen Störungen treten die erzgebirgischen Bruchstrukturen meist als Störungsschwärme oder Staffeln, seltener als Einzelstörungen auf und bilden häufig die Begrenzung von Kippschollen ab (BSA 1981, STUTZER 1935 u.a.). Nach BSA (1981), ARNOLD (1900) u.a. beträgt die Sprunghöhe an diesen Bruchstrukturen meist nicht mehr als 30-40 m. Im östlichen Teil des Zwickauer Reviers treten sie auch als flach nach NW einfallende Überschiebungen auf. Hydraulische bedeutende Störungs- bzw. Kluftzonen zeigt Tabelle 17. Der lokale Einfluss weiterer kleinerer tektonischer Elemente wird in Abschnitt 4.2.4 diskutiert.

Tabelle 17 Wichtige hydraulisch aktive erzgebirgische Störungszonen (um NE-SW streichend)

Name (von NW nach SE)	Mittelwerte/-bereiche T [m ² /s], k _f [m/s] <i>Einzelwerte u.a. aus Brunnentests</i> ¹⁾	Oberflächlich anstehende Folgen; Bemerkungen/Beispiele
Störung zwischen Neukirchen (bei Crimm.) und Dennheritz	$T=2 \cdot 10^{-4} - 5,8 \cdot 10^{-3}$ (bei Kreuzung mit Querstörungen, Kluftzonen / Tälern)	MlsF/LkF bis Zechstein/Buntsandstein
Muldentalstörungen im Bereich Glauchau	$T=10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$ ($10^{-4} - 2 \cdot 10^{-4}$, $k_f=2 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-6}$)	Q. über MlsF, z.T. Tertiärbed. und Grundgebirge anstehend
Störungsscharen im Raum Helmsdorf		Parameter nach Hebert et al. 1992, T&P 1994, T&P 1995, T&P 1997; MlsF, z.T. Tertiärbedeckung; hier liegen verschied. repräsentative Untersuchungen für erzgebirgische Störungen im Bereich d. MlsF vor ²⁾ ; sind vermutl. an herzyn. Störungen (z.B. OHV) hydraulisch angeschlossen
Oberrothenbacher Störung	$T=10^{-3} - 5 \cdot 10^{-5}$ ($10^{-4} - 10^{-5}$ Begeleitstör.) ($k_f=3 \cdot 10^{-6}$)	
Niederhohndorfer Störungsz.	$T=2 \cdot 10^{-4}$	
Störungsz. im Wüsten Grund	$T=5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-5}$ ($k_f=2 \cdot 10^{-6}$)	
Störungsz. im Mittelgrund	$k_f=6 \cdot 10^{-6}$; NNE-SSW streichend	
vermutete BruchzonenBereich südöstl. Glauchau bis St. Egidien	$T=10^{-5} - 10^{-4}$; Annahme: T ca. 1 Größennord. gering. als die der kreuz. herzyn. Stör., die hier d. GW-Dynamik bestimmen	MlsF, z.T. LkF; Q. der LTZ; Quellaustritte, ergiebige Brunnen an Kreuzungen mit herzyn. Stör.
vermutete Bruchzone zwischen Auerbach, Mülsen St. Micheln u. Lichtenstein	$T=10^{-5} - 10^{-4}$ ($5 \cdot 10^{-5}$, $k_f=3 \cdot 10^{-7}$); Annahme: vgl. Angabe zu Bruchzone südöstl. Glauchau bis St. Egidien)	MlsF; ergiebige Brunnen an Störungskreuzen
vermutete Bruchzone zwischen Pöhlau, Mülsen St. Jacob u. Lichtenstein	$T=10^{-5} - 10^{-4}$ ($2 \cdot 10^{-5}$, $k_f=10^{-6}$); Annahme: vgl. Angabe zu Bruchzone südöstl. Glauchau bis St. Egidien)	MlsF; Quellaustritte; ergiebige Brunnen an Störungskreuzen
Bruchzone zwischen Mülsen St. Niclas und Rödlitz/Lichtenstein	$T=10^{-3} - >10^{-2}$ ($1,6 \cdot 10^{-2} - 2,5 \cdot 10^{-2}$, $k_f=1,2 \cdot 10^{-4} - 2,9 \cdot 10^{-4}$)	„Niclaser Spalte“, MlsF; Störungsschar; sehr ergieb. Brunnen
Hypothetischer Bruch zwischen Ortmannsdorf und Oelsnitz	$T=10^{-4} - 10^{-2}$ ($8 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$, $k_f=0,6 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-4}$ (an Kreuzung mit RHV))	„Ortmannsdorfer Spalte“, MlsF und LkF (Oelsnitz)
Zschockener Störung	$T=10^{-4}$ bis 10^{-3} (Rotliegendes); $<10^{-5} - 10^{-4}$ (Grundgebirge)	Kontakt LkF mit PlnF; Fortsetzung ins südl. Grundgeb. fraglich
Erzgebirgsnordrandzone (in der östl. Vorerzgebirgsenke vermutl. lokal als Störung ausgebildet)	Hydraulische Funktion unklar (vgl. Abschnitte 4.2.3 und 4.4.1); deshalb nicht als eigenständige hydraul. Struktur definiert	Kontaktbereich VES mit Erzgebirgsfolgen; Einfallen zwischen 15° und 35° nach NW

Quellen: nach ZGI (1984) und FIS Hydrogeologie (vgl. Abschnitt 2.5) oder wie angegeben ¹⁾ die genannten Einzelmessungen beziehen sich meist auf höher durchlässige Bereiche der Störungszonen, die mglw. nicht repräsentativ für den gesamten Störungsbereich sind ²⁾ z.B. G.E.O.S. (1996), HOFMANN et al. (1998), MÖCKEL (1998), MÜLLER (1994), PAUL et al. (1998a), PAUL (1998c), PAUL (1998b), SPERLICH et. al. (1999), TRISCHLER & PARTNER CONS. GMBH (1995), ZWEIG (1999)

Neben den herzynisch und erzgebirgisch ausgerichteten Strukturen sind vereinzelt auch anders orientierte hydraulisch aktive Störungen oder Kluftzonen bekannt, so z.B. rheinisch (N-S) ausgerichtete tektonische Elemente (Tabelle 18). Sie treten bezüglich ihrer Bedeutung gegenüber den herzynischen und erzgebirgischen Störungen jedoch in den Hintergrund.

Tabelle 18 Weitere wichtige hydraulisch aktive Störungen

Name (von NW nach SE) (Streichrichtung)	Mittelwerte/-bereiche T [m ² /s], k _f [m/s] Einzelwerte u.a. aus Brunnentests ¹⁾	Oberflächlich anstehende Folgen Bemerkungen/Beispiele
Störungszone, -schar im Pleißetal (um N-S); mehrere Teilstörungen	T=10 ⁻³ -10 ⁻⁴ ; lokal >10 ⁻³ ; T=2,1*10 ⁻⁴ bis 3*10 ⁻³ m ² /s, k _f =2*10 ⁻⁵	vom S-Rand der VES (Lkw, MlsF) bis nördl. Crimmitschau (Zech- stein); z.T. Quartär-Überdeckung
Rhein. Störungsschar südl. von Kuh Schnappel (N-S bis NNW-SSE)	T=10 ⁻⁴ bis 4*10 ⁻⁵ m ² /s, geschätzt n. (STORCH ET AL. 1996)	bilden größeren Querstörungsbe- reich mit Lungwitztalstörung
Störungszweig östlich von Mittel- bach (N-S bis NE-SW)	T=10 ⁻⁴ ->10 ⁻³ (5*10 ⁻⁵ - 1,3*10 ⁻⁴)	LkF, lokal MlsF; im N in LTZ ü- bergehend; Quellaustritte

Quellen: nach ZGI (1984) und FIS Hydrogeologie (vgl. Abschnitt 2.5) oder wie angegeben ¹⁾ die genannten Einzelmessungen beziehen sich meist auf höher durchlässige Bereiche der Störungszonen, die mglw. nicht repräsentativ für den gesamten Störungsbereich sind LTZ Lungwitztalzone

Die Diskussion der hydraulischen Wirkung von Störungszonen im hydraulischen Modell erfolgt anhand konkreter Beispiele in Abschnitt 4.9.

4.3.3 Grundwasserfluss auf Störungszonen – Modellrechnungen

Im folgenden soll durch quantitative Modellrechnungen dargestellt werden, welche Grundwassermengen entlang von Störungszonen transportiert werden können. Anhand des Bilanzgebietes Koberbach soll beispielhaft geprüft werden unter welchen Randbedingungen eine Ableitung des ermittelten Grundwasserneubildungsüberschusses (vgl. Abschnitt 4.4.3) entlang hydraulisch aktiver Störungen möglich ist. Grundlage der Berechnungen sind für den Bereich der VES ermittelte charakteristische Parameter und Randbedingungen für Störungsbereiche (Abschnitt 4.3.).

Folgt man der Strömungsgleichung nach dem DARCY-Ansatz verhält sich der auf einer Störung fließende Volumenstrom $\dot{V}$ [m³/s] nach Gleichung (10) proportional

- zum Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s] des Störungsbereiches
- zur zugehörigen Querschnittsfläche A [m²], die sich aus dem Produkt von Breite B [m] und Teufe M [m] der wirksamen Störungsbereiche ergibt (11)
- zum hydraulischen Gradienten (Grundwassergefälle) i [-], der sich aus dem Quotienten der Differenz im Grundwasserspiegel h [m] und der Entfernung zwischen den Messpunkten l [m] ergibt (12)

$$(10) \quad \dot{V} = k_f * A * i$$

$$(11) \quad A = B * M$$

$$(12) \quad i = h / l$$

Der Durchlässigkeitsbeiwert kann auch, wie für Festgesteinsbereiche üblich, als Quotient aus Transmissivität T [m²/s] und wirksamer Teufe der Störung M [m] geschrieben werden (13).

$$(13) \quad k_f = T / M$$

Es ergibt sich für den Volumenstrom $\dot{V}$ die den nachfolgenden Berechnungen zugrunde lie-

gende Beziehung (14), welche die auf einer Störung fließende Grundwassermenge als Produkt aus Transmissivität T , Störungsbreite B und hydraulischem Gradienten i definiert.

$$(14) \quad \dot{V} = T * B * i$$

In Störungsbereichen im Bereich der VES wurden u.a. in Feldversuchen Transmissivitäten von häufig mehr als $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ bzw. k_f -Werte größer 10^{-4} m/s ermittelt (vgl. Abschnitt 4.3). Allerdings ist die für die Berechnungen nach Gleichung (14) zu treffende Annahme gleichbleibender Durchlässigkeiten und konstanter Störungsquerschnittsflächen praktisch nicht gegeben. Der tatsächliche Grundwasserfluss entlang einer Störung wird vielmehr vom geringsten Durchfluss ($T*B$ Minimum) entlang des betrachteten Störungsabschnittes bestimmt. Die Breite von Störungen in der VES wird mit bis zu 200 m angegeben, die einzelner Kluftzonen mit bis zu 15 m (Abschnitt 4.3), wobei auch hier i.d.R. nur Teile der Störung signifikante Durchlässigkeiten aufweisen. Nach der Teufe nimmt die Durchlässigkeit, u.a. aufgrund des ansteigenden Gesteinsdruckes generell deutlich ab. Dies bestätigen auch Untersuchungen in vergleichbaren Senkenstrukturen weltweit (4.1). Tabelle 19 zeigt mögliche Störungsquerschnitte in Abhängigkeit von der Störungsbreite und -teufe.

Tabelle 19 Störungsquerschnitte $A \text{ [m}^2\text{]}$ auf Grundlage variierender Störungsteufen und -breiten

Querschnitt $A \text{ [m}^2\text{]}$		Breite $B \text{ [m]}$											
		10	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	200
Teufe $M \text{ [m]}$	10	100	200	300	400	500	600	800	1.000	1.200	1.400	1.600	2.000
	20	200	400	600	800	1.000	1.200	1.600	2.000	2.400	2.800	3.200	4.000
	30	300	600	900	1.200	1.500	1.800	2.400	3.000	3.600	4.200	4.800	6.000
	40	400	800	1.200	1.600	2.000	2.400	3.200	4.000	4.800	5.600	6.400	8.000
	50	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	10.000
	75	750	1.500	2.250	3.000	3.750	4.500	6.000	7.500	9.000	10.500	12.000	15.000
	100	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	20.000
	200	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	16.000	20.000	24.000	28.000	32.000	40.000
	300	3.000	6.000	9.000	12.000	15.000	18.000	24.000	30.000	36.000	42.000	48.000	60.000
	500	5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	40.000	50.000	60.000	70.000	80.000	100.000
	750	7.500	15.000	22.500	30.000	37.500	45.000	60.000	75.000	90.000	105.000	120.000	150.000
	1000	10.000	20.000	30.000	40.000	50.000	60.000	80.000	100.000	120.000	140.000	160.000	200.000

Der hydraulische Gradient (Grundwassergefälle) in der VES schwankt in Abhängigkeit vom betrachteten Gebiet und Maßstab naturgemäß beträchtlich. So sind lokal, z.B. an Talhängen, häufig Gradienten von 0,1 (1m Gefälle auf 10m) zu beobachten. In intermediären Grundwasserflusssystemen treten häufig Gradienten um 0,01 bis 0,001 auf wie z.B. im Bilanzgebiet Koberbach (siehe unten) (ZGI 1984, TK 25 (N) 1998, TTK 25 (N) 1998). Regionale Grundwasserflusssysteme weisen häufig noch deutlich geringere Gradienten auf.

Die Tabelle 20 bis Tabelle 22 zeigen die Volumenströme $\dot{V}$ in Abhängigkeit vom Querschnitt A (aus Tabelle 19) und Durchlässigkeitsbeiwert k_f (T/M) bei unterschiedlichen hydraulischen Gradienten i entlang einer fiktiven Störungszone in der Vorerzgebirgssenke.

Tabelle 20 Volumenströme $\dot{V}$ [m³/a] entlang einer Störung in Abhängigkeit vom Querschnitt A, k_f (T/M) bei einem hydraulischen Gradienten i von 0,1

hydraulischer Gradient $i = 0,1$ (1m auf 10 m)									
Volumenstrom $\dot{V}$ [m ³ /a]		k_f (T/M) [m/s]							
		$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Störungsquerschnitt A [m ²]	100	3.153.600	315.360	31.536	15.768	3.154	1.577	315	32
	500	15.768.000	1.576.800	157.680	78.840	15.768	7.884	1.577	158
	1.000	31.536.000	3.153.600	315.360	157.680	31.536	15.768	3.154	315
	5.000	157.680.000	15.768.000	1.576.800	788.400	157.680	78.840	15.768	1.577
	10.000	315.360.000	31.536.000	3.153.600	1.576.800	315.360	157.680	31.536	3.154
	20.000	630.720.000	63.072.000	6.307.200	3.153.600	630.720	315.360	63.072	6.307
	60.000	1.892.160.000	189.216.000	18.921.600	9.460.800	1.892.160	946.080	189.216	18.922
	100.000	3.153.600.000	315.360.000	31.536.000	15.768.000	3.153.600	1.576.800	315.360	31.536
	150.000	4.730.400.000	473.040.000	47.304.000	23.652.000	4.730.400	2.365.200	473.040	47.304
	200.000	6.307.200.000	630.720.000	63.072.000	31.536.000	6.307.200	3.153.600	630.720	63.072

Tabelle 21 Volumenströme $\dot{V}$ [m³/a] entlang einer Störung in Abhängigkeit vom Querschnitt A, k_f (T/M) bei einem hydraulischen Gradienten i von 0,01

hydraulischer Gradient $i = 0,01$ (1m auf 100 m)									
Volumenstrom $\dot{V}$ [m ³ /a]		k_f (T/M) [m/s]							
		$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Störungsquerschnitt A [m ²]	100	315.360	31.536	3.154	1.577	315	158	32	3
	500	1.576.800	157.680	15.768	7.884	1.577	788	158	16
	1.000	3.153.600	315.360	31.536	15.768	3.154	1.577	315	32
	5.000	15.768.000	1.576.800	157.680	78.840	15.768	7.884	1.577	158
	10.000	31.536.000	3.153.600	315.360	157.680	31.536	15.768	3.154	315
	20.000	63.072.000	6.307.200	630.720	315.360	63.072	31.536	6.307	631
	60.000	189.216.000	18.921.600	1.892.160	946.080	189.216	94.608	18.922	1.892
	100.000	315.360.000	31.536.000	3.153.600	1.576.800	315.360	157.680	31.536	3.154
	150.000	473.040.000	47.304.000	4.730.400	2.365.200	473.040	236.520	47.304	4.730
	200.000	630.720.000	63.072.000	6.307.200	3.153.600	630.720	315.360	63.072	6.307

Tabelle 22 Volumenströme $\dot{V}$ [m³/a] entlang einer Störung in Abhängigkeit vom Querschnitt A, k_f (T/M) bei einem hydraulischen Gradienten i von 0,001

hydraulischer Gradient $i = 0,001$ (1m auf 1000 m)									
Volumenstrom $\dot{V}$ [m ³ /a]		k_f (T/M) [m/s]							
		$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Störungsquerschnitt A [m ²]	100	31.536	3.154	315	158	32	16	3	0
	500	157.680	15.768	1.577	788	158	79	16	2
	1.000	315.360	31.536	3.154	1.577	315	158	32	3
	5.000	1.576.800	157.680	15.768	7.884	1.577	788	158	16
	10.000	3.153.600	315.360	31.536	15.768	3.154	1.577	315	32
	20.000	6.307.200	630.720	63.072	31.536	6.307	3.154	631	63
	60.000	18.921.600	1.892.160	189.216	94.608	18.922	9.461	1.892	189
	100.000	31.536.000	3.153.600	315.360	157.680	31.536	15.768	3.154	315
	150.000	47.304.000	4.730.400	473.040	236.520	47.304	23.652	4.730	473
	200.000	63.072.000	6.307.200	630.720	315.360	63.072	31.536	6.307	631

Die durch Fettdruck markierten Volumenströme entsprechen größenordnungsmäßig dem Defizit des für das Bilanzgebiet Koberbach ermittelten Basisabflusses. Verschiedene Anhaltspunkte weisen darauf hin, dass dieses Defizit durch einen nicht berücksichtigten Abfluss von Grundwasser aus dem Bilanzgebiet über Störungszonen realisiert werden könnte (siehe unten).

Es wird deutlich, dass bei höheren Gradienten, also im Bereich lokaler und intermediärer Grundwasserfließsysteme, im Vergleich zur GWN signifikante Grundwassermengen entlang von Störungsbereichen transportiert werden können.

Bei regionalen Grundwasserfließsystemen ist ein quantitativ wesentlicher Grundwasserfluss nicht wahrscheinlich. Dafür sind neben einem meist geringen Gradienten von $< 0,005$ die über lange Entfernungen anzunehmenden Schwankungen von Transmissivität und effektivem Querschnitt verantwortlich. Das gilt z.B. für einen Grundwasserfluss entlang von Störungen zwischen Vorerzgebirgssenke und Thüringer Senke. So ist ein Grundwasserfluss entlang herzynischer Störungszonen nach NW, z.B. entlang der Oberhohndorfer Hauptverwerfung, in Richtung Pleißeetal bei Crimmitschau bei Gradienten zwischen 0,0025 und 0,005 und einer Entfernung von 10-15 km plausibel. Ein für die Grundwasserbilanzierung relevanter Transport von Grundwasser bis in das Thüringer Becken ist dagegen aufgrund der großen Entfernung ≥ 40 km und der geringen Gradienten von $\leq 0,001$ unwahrscheinlich. Die Möglichkeit eines solchen Transportes höher mineralisierter Grundwässer in umgekehrter Richtung - aus dem Thüringer Becken in die VES - wird z.B. von SCHRÄBER (1968) oder STORCH ET AL. (1996) dargestellt (Abschnitt 4.6).

Bilanzgebiet Koberbach

Das relativ kleine Bilanzgebiet Koberbach ($10,4 \text{ km}^2$) im Westen der VES weist ein jährliches Defizit in der Grundwasserbilanz von rund $950 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ auf (Abschnitt 4.4.3.3). Es soll geprüft werden inwieweit ein Ausgleich dieses Defizites durch Grundwasserabstrom nach SE entlang der als hydraulisch aktiv eingestuften Störungszonen im Koberbachtal und bei Niederalbertsdorf möglich ist.

Folgende Randbedingungen können auf Grundlage bisheriger Kenntnisse definiert werden (Tabelle 23):

Tabelle 23 Randbedingungen für Störungszonen im Bilanzgebiet Koberbach

	Gradient ¹	T [m^2/s] ²	hydraulisch aktive Breite [m]	Variabilität hydraulischer Parameter	Abflussrichtung
Koberbachtal-Störung	0,013	$1 \cdot 10^{-4}$	$< 100\text{-}200$	unbekannt	nach SE
Störungszone bei Niederalbertsdorf	0,0075	$1 \cdot 10^{-4}$	$< 100\text{-}200$	unbekannt	nach SE oder NW

¹⁾ ZGI (1984), ²⁾ Quellen vgl. Abschnitt 4.3.2

Die Tabelle 24 und Tabelle 25 zeigen die nach der Beziehung $\dot{V} = T \cdot B \cdot i$ (Gleichung (14)) für verschiedene Transmissivitäten und Störungsquerschnitte ermittelten Volumenströme $\dot{V}$ für die Koberbachtalstörung und die Störung bei Niederalbertsdorf respektive.

Geht man von der Annahme aus, dass das gesamte Defizit in der Grundwasserbilanz von annähernd $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{a}$ entlang dieser beiden Störungsbereiche abgeführt würde (fett-kursiv

gedruckte Ziffern in den Tabelle 24 und Tabelle 25), so wären selbst bei hydraulisch aktiven Störungsbreiten von 200 m, Transmissivitäten von $\geq 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ erforderlich um die entsprechenden Volumenströme zu realisieren. Die bisherigen Anhaltspunkte gehen hingegen von Transmissivitäten zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ und $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ für beide Störungsbereiche aus (dick umrandete Tabellenspalten).

Tabelle 24 Berechneter Grundwasserfluss auf der Störung im Koberbachtal

Volumenstrom [m ³ /a]		Transmissivität [m ² /s]							
		15*10 ⁻³	5*10 ⁻³	1*10 ⁻³	5*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁴	5*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁶
wirksame Breite [m]	10	61.495	20.498	4.100	2.050	410	205	41	4
	20	122.990	40.997	8.199	4.100	820	410	82	8
	30	184.486	61.495	12.299	6.150	1.230	615	123	12
	40	245.981	81.994	16.399	8.199	1.640	820	164	16
	50	307.476	102.492	20.498	10.249	2.050	1.025	205	20
	60	368.971	122.990	24.598	12.299	2.460	1.230	246	25
	80	491.962	163.987	32.797	16.399	3.280	1.640	328	33
	100	614.952	204.984	40.997	20.498	4.100	2.050	410	41
	120	737.942	245.981	49.196	24.598	4.920	2.460	492	49
	140	860.933	286.978	57.396	28.698	5.740	2.870	574	57
	160	983.923	327.974	65.595	32.797	6.559	3.280	656	66
	180	1.106.914	368.971	73.794	36.897	7.379	3.690	738	74
	200	1.229.904	409.968	81.994	40.997	8.199	4.100	820	82

Randbedingungen: Abfluss nach SE in das Pleißetal (Gradient = 0,013)

Tabelle 25 Berechneter Grundwasserfluss auf der Störung bei Niederalbertsdorf

Volumenstrom [m ³ /a]		Transmissivität [m ² /s]							
		15*10 ⁻³	5*10 ⁻³	1*10 ⁻³	5*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁴	5*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁶
wirksame Breite [m]	10	35.478	11.826	2.365	1.183	237	118	24	2
	20	70.956	23.652	4.730	2.365	473	237	47	5
	30	106.434	35.478	7.096	3.548	710	355	71	7
	40	141.912	47.304	9.461	4.730	946	473	95	9
	50	177.390	59.130	11.826	5.913	1.183	591	118	12
	60	212.868	70.956	14.191	7.096	1.419	710	142	14
	80	283.824	94.608	18.922	9.461	1.892	946	189	19
	100	354.780	118.260	23.652	11.826	2.365	1.183	237	24
	120	425.736	141.912	28.382	14.191	2.838	1.419	284	28
	140	496.692	165.564	33.113	16.556	3.311	1.656	331	33
	160	567.648	189.216	37.843	18.922	3.784	1.892	378	38
	180	638.604	212.868	42.574	21.287	4.257	2.129	426	43
	200	709.560	236.520	47.304	23.652	4.730	2.365	473	47

Randbedingungen: Abfluss nach SE in das Pleißetal oder nach NW in Richtung Gera (Gradient = 0,0075)

Diese Durchlässigkeiten würden für einen Ausgleich des genannten Bilanzdefizits nicht ausreichen. Es ist deshalb anzunehmen, dass insbesondere die Koberbachtal-Störung zumindest lokal Transmissivitäten von $>1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ aufweist. Höhere hydraulisch wirksame Störungs-

breiten sind dagegen eher unwahrscheinlich. Möglich ist auch die Existenz weiterer bisher nicht kartierter Störungen im Bereich der Bilanzgebietsgrenzen.

Schlussfolgerungen

In kleineren Einzugsgebieten kann ein Grundwassertransport entlang von Störungs- und Kluftzonen für die Wasserbilanz von Bedeutung sein. Bei dem hier diskutierten Gebiet Koberbach handelt es sich um ein solches kleines Bilanzgebiet. Es wird aber auch deutlich, dass zum Ausgleich der meisten in Abschnitt 4.4.3 diskutierten Defizite in den Wasserbilanzen der Bilanzgebiete ein Grundwassertransport auf einzelnen Störungen und über lange Entfernungen zur Erklärung häufig kaum ausreichend sein wird. Da die effektiven Durchlässigkeiten, insbesondere bei Betrachtungen über größere Entfernungen, stark begrenzt sind, muss für einen quantitativ wesentlichen Grundwasserfluss von einer Vielzahl von Teilstörungen mit einer Wasserführung bis in beträchtliche Teufen (mehrere 100 m) ausgegangen werden. Störungen in der VES stellen bedeutende hydraulische Elemente dar. Sie spielen insbesondere in Bereichen lithologisch bedingter geringer Grundwasserführung sowie bei der Verbindung hydraulisch aktiver Schichten in schwerdurchlässigen Bereichen eine wichtige Rolle. In Kombination mit weiteren Einzelstörungen, also als Störungszonen, können sie über kurze bis mittlere Entfernungen auch für die Grundwasserbilanzierung relevante Grundwassermengen transportieren (vgl. Abschnitt 4.4.3). Ihre Bedeutung für einen quantitativ wesentlichen regionalen Grundwassertransport wird aber i.d.R. eher gering sein und sollte nicht überschätzt werden.

4.4 Grundwasserhaushalt

Im Rahmen der Analyse des unterirdischen Wasserhaushaltes in der Vorerzgebirgssenne im Regionalmaßstab sollten der Einfluss verschiedener Faktoren auf den Grundwasserhaushalt abgeschätzt werden. Es erfolgte die Ermittlung langjähriger mittlerer Wasserhaushaltsdaten, der Grundwasserneubildung und des Basisabflusses, sowie eine vergleichende Bilanzierung für exemplarische Einzugsgebiete. Zielstellung und Methodik der Grundwasserhaushaltsbetrachtungen werden in Abschnitt 2.7 erläutert.

4.4.1 Probleme bei der Abgrenzung unterirdischer Einzugsgebiete

Für die Beurteilung des Wasserhaushaltes einer Region ist u.a. die Abgrenzung der zugehörigen unterirdischen Einzugsgebiete notwendig. Eine häufig verwendete Grundannahme ist dabei die Gleichsetzung des unterirdischen mit oberirdischen Einzugsgebiet. Diese Annahme trifft für Lockergesteinsgrundwasserleiter, insbesondere im oberflächennahen Grundwasser, häufig zu. In Kluftgrundwasserleitern ist dies dagegen nicht immer der Fall. So kann u.a. eine weitständige oder fehlende Gesteinsklüftung oder die Dominanz präferentieller Fließwege wie Kluft- oder Störungszonen zu deutlichen Abweichungen von unter- und oberirdischem Einzugsgebiet führen. Die Festlegung der unterirdischen Einzugsgebiete erfordert deshalb eine genaue Kenntnis der hydrogeologischen Verhältnisse des betrachteten Gebietes.

Wie die Sichtung und Auswertung der Unterlagen zeigen, ist die erforderliche Informations-

dichte zur Grundwasserdynamik jedoch nicht für alle Bereiche der Vorerzgebirgssenke gegeben. So stehen gut untersuchte Gebiete, wie z.B. der Raum Zwickau, Gebieten mit eher geringem hydrogeologischen Kenntnisstand, wie z.B. die stadtfernen Teile der mittleren bis östlichen Vorerzgebirgssenke, gegenüber (Abschnitt 4.2.4).

Zu den Regionen mit ausreichenden und z.T. detaillierte Angaben zum Verlauf der Grundwasserscheiden gehören die unterirdischen Teileinzugsgebiete des Lungwitzbachs bei St. Egidien-Rüsdorf, die des Rödlitzbachs im Bereich Lichtenstein-Heinrichsort und das Gebiet südlicher Mülsengrund. Für den Mülsengrund liegen mittlerweile aktuelle Wasserhaushaltsbetrachtungen vor, die in diese Arbeit jedoch nicht mehr einbezogen werden können (ZWEIG 2007). Informationsdefizite traten vor allem in der östlichen Vorerzgebirgssenke im Bereich der weiteren Ortslagen Erlbach, Ursprung, Leukersdorf, Jahnsdorf und Niederdorf auf. Trotz umfangreicher lokaler Erkundungen an den Wismut-Standorten Crossen, Helmsdorf und Dänkriz ist der Kenntnisstand im Gebiet nördlich von Zwickau insgesamt noch immer ungenügend. Dies betrifft weiterhin einige ortsferne Bereiche östlich von Zwickau.

Ein besonderes Problem ergibt sich auch aus der Tatsache, dass selbst in Gebieten hohen Untersuchungsgrades (Ortschaften mit zahlreichen Brunnen etc.) die Grundwasserdynamik nur soweit wie für die jeweilige Aufgabenstellung unbedingt nötig und damit, im Sinne der Abgrenzung kompletter unterirdischer Einzugsgebiete, in ungenügendem Maße geklärt wurde. Häufig sind lediglich Angaben zur Grundwasserfließrichtung in nächster Nähe des Untersuchungsobjektes aufgeführt. Die exakte Abgrenzung der unterirdischen Einzugsgebiete in den Festgesteinsgrundwasserleitern des Rotliegenden ist in diesen Fällen also nicht immer möglich. Der Festlegung des Verlaufs der Grundwasserscheiden auf Grundlage relativ gesicherter Anhaltspunkte musste hier einer Abschätzung weichen. Geht man dabei in einem ersten Schritt von der Gleichsetzung des unterirdischen mit dem oberirdischen Einzugsgebiet aus, so ist eine Absicherung dieser Näherung für die letztgenannten Gebiete kaum möglich. Auch die Grundwasserbilanzierung ist hier folgerichtig nur im Sinne einer Abschätzung möglich. Generell muss in den diskutierten Bilanzgebieten (Abschnitt 4.4.3) die Möglichkeit eines unbekannten unterirdischen Zu- bzw. Abstrom in bzw. aus den abgegrenzten unterirdischen Einzugsgebieten in Betracht gezogen werden. Die Möglichkeiten solcher Grundwasserflüsse werden in den Abschnitten 4.2.4 und 4.4.2 sowie Anlage Anlage 4 diskutiert und in Abschnitt 4.9 für Beispielen anhand der hydraulischen Modellierung belegt. Durch die Betrachtung größerer Bilanzgebiete konnte die Relevanz eines möglichen Fehler verringert werden (Abschnitt 2.7).

Eine unterschiedlicher Verlauf von oberirdischem und unterirdischem Einzugsgebiet kann auf eine Vielzahl von Ursachen zurückzuführen sein.

Einfluss hemmender Gesteinsschichten im Untergrund

Hemmende Gesteinsschichten können, z.B. im Sinne schwebender Grundwasserleiter, neugebildetes Grundwasser in tiefere Grundwasserleiter leiten und damit deren unterirdisches Einzugsgebiet vergrößern (Überschneidung von unterirdischen Einzugsgebieten) (vgl. Abschnitte 3.2 und 4.2.4)

Einfluss hydraulisch aktiver Störungs- und Kluftzonen

Hydraulisch aktive Störungs- oder Kluftzonen, also im Vergleich zum Nebengestein grundwasserleitende oder hemmende hydrogeologische Strukturen können das unterirdische Einzugsgebiet erweitern oder einengen. Solche Störungs- oder Kluftzonen sind im Bereich der Vorerzgebirgssenke eine Hauptursache für die Ausweitung oder Einengung des unterirdischen gegenüber dem oberirdischen Einzugsgebiet.

Wie auf Grubenbauen (siehe unten) können auch auf tektonischen Strukturen wie Kluftscharren, Störungen und Störungssystemen deutlich erhöhte hydraulische Leitfähigkeiten auftreten, die Grundwasser entsprechend der Potentialdifferenz oft über weite Entfernungen transportieren können. Dies führt zu einer Erweiterung des jeweiligen Einzugsgebietes, so z.B. im mittleren Mülsengrund. Die Erweiterung dieses Einzugsgebietes nach W wird aus den erweiterten Einzugsbereichen der Tiefbrunnen (TB) Langenhessen (Werdau) und des Wasserwerkes (WW) Glauchau deutlich.

Zu den hydraulisch gut leitenden Störungen gehören im Untersuchungsgebiet u.a. die Rödlitzer Hauptverwerfung (insbesondere im Nordabschnitt hydraulisch leitend), die Oberhohndorfer Hauptverwerfung (OHV)/Lauterbacher Störung (OHV nördlich von Zwickau), die vermutete Störung am Kornmarkt, die Oberrothenbacher Störung bei Helmsdorf (ENE-WSW), die Lungwitztalstörung östlich von Glauchau, die Rothenbacher Störung, die Wernsdorfer Störung sowie mehrere das Lungwitztal in nordwestlicher Richtung schneidende Störungszonen (Abschnitt 4.3).

Andererseits können abgedichtete Störungsbereiche, hervorgerufen z.B. durch Verlehmung oder Verkieselung, auch grundwasserhemmend wirken. Diese Barrierewirkung verursacht ein Einschwenken des Grundwasserstromes parallel zum Störungsverlauf in Richtung Vorfluter. Störungen dieser Art können damit eine Grundwasserscheide darstellen und Einzugsgebiete einschränken. Dies ist z.B. entlang der Rödlitzer Hauptverwerfung zwischen Hohndorf und Waldesruh sowie entlang der Lungwitztalstörung nördlich von Glauchau zu beobachten.

Differenzierter Grundwasserstockwerksbau

Veränderungen im Grundwasserstockwerksbau können zur Abweichung des oberirdischen vom unterirdischen Einzugsgebiet führen. Dazu gehört z.B. die Inkonsistenz innerhalb einer hydrogeologischen Einheit, durch lokale, mehrere Grundwasserleiter miteinander verbindende Störungen (z.B. Lungwitztalzone bei St. Egidien) oder hydraulisch inhomogene Grundwasserleiter (z.B. der Zeisigwaldtuff der oberen Leukersdorf-Teilfolge bei Chemnitz). Dies kann zu hydraulischen Verbindungen/Schnittstellen zwischen und wechselndem Einfluss von unterschiedlich dimensionalen Grundwasserfließsystemen (lokalen, intermediären und auch regionalen) führen (vgl. Abschnitt 4.2.2).

Geologische Lagerungsverhältnisse

Laterales Aneinandergrenzen verschiedener lithologischer Komplexe bewirken, in Abhängigkeit von den Lagerungsverhältnissen und Durchlässigkeiten der Gesteine geometrisch komplexe Transmissivitätskontraste. Dies betrifft z.B., den südlichen und nördlichen Vorerzgebirgssenkensrand wo Rotliegendes über kristallinen Gesteinen ausstreicht oder Gesteinswechsel entlang von tektonischen Störungen, wie z.B. entlang der Rödlitzer Hauptver-

werfung. Dort grenzen Gera-/ Mülsen- und Leukersdorf-Folge horizontal aneinander (vgl. Abschnitt 4.2.4).

Ausstriche von hydrogeologischen Einheiten

Die Lage von Ausstrichen hydrogeologischer Einheiten kann eine Erweiterung senkenwärts gelegener unterirdischer Einzugsgebiete bewirken. Dies betrifft z.B. besser durchlässige gröberklastische Bereiche der Planitz- und Härtensdorf-Folge entlang des Vorerzgebirgsrand (vgl. Abschnitte 3.2, 4.2.1 und 4.2.4)

Anthropogene Beeinflussung der Grundwasseroberfläche durch Grundwasserentnahmen oder infiltrationen

Künstliche Grundwasserentnahmen oder Infiltrationen können den Verlauf natürlicher Grundwasserscheiden und damit die Abgrenzung unterirdischer Einzugsgebiete beeinflussen. Dies betrifft z.B. den Betrieb von Produktionsbrunnen, die in Abhängigkeit vom Brunnenregime die Morphologie der Grundwasseroberfläche auch zeitlich variabel verändern kann. Eine Änderung der Brunnenparameter und/oder der Pumpmenge, sowie die Inbetriebnahme neuer und die Schließung alter Brunnen, wie es im Untersuchungsgebiet häufig der Fall ist, können von Bedeutung für die Größe und Form anliegender unterirdischer Einzugsgebiete sein (vgl. Abschnitte 4.2.1 und 4.2.4).

Informationen aus lokalen Gutachten waren teilweise nicht verwendbar, da Einflüsse anthropogener und natürlicher Faktoren auf das hydraulische Regime nicht immer klar abgrenzbar waren. Dieser Aspekt der Ablenkung/Manipulation des natürlichen Fließregimes durch Grundwasser-Förderung erfordert auch in der Zukunft besondere Beachtung.

Einflüsse des alten Steinkohlenbergbau im Zwickau-Oelsnitzer Revier

Im Raum Zwickau und Lugau/Oelsnitz wurde in karbonen Schichtenfolgen langjähriger intensiver Steinkohlenbergbau betrieben. Durch die Anlage von Strecken, Stollen und Abbauen in den eher gering grundwasserleitenden Schichten des tieferen Rotliegenden und Karbon wurden teilweise hochleitfähige Grundwasserfließwege geschaffen, die wesentlichen Einfluss auf die lokalen Grundwasserverhältnisse haben können (Abschnitt 4.2.5). Dies betrifft insbesondere die hydraulische Kopplung ursprünglich voneinander unabhängiger unterirdischer Einzugsgebiete und führt somit, je nach Situation, zu einem Grundwasserzu- oder abstrom in das betrachtete Gebiet. Die exakte Abgrenzung der unterirdischen Einzugsgebiete in den beiden Bergbauregionen Zwickau und Lugau-Oelsnitz erweist sich damit, insbesondere im Zusammenspiel mit hydraulisch aktiven (und möglicherweise durch den Bergbau aktivierten) Störungs- und Kluftzonen als problematisch.

4.4.2 Diskussion unterirdischer Einzugsgebiete

Differenzierte Wasserhaushaltsbetrachtungen für oberirdische (und z.T. unterirdische) Einzugsgebiete liegen für Teilbereiche der Vorerzgebirgssenke und deren Umland, so z.B. für den Raum Zwickau (z.B. WASY 1998) und den Mülsengrund (2007, noch nicht vorliegend) bereits vor. Generell bleibt jedoch der exakte Verlauf vieler unterirdischer Einzugsgebiete

aufgrund der komplexen und wechselhaften hydrogeologischen Verhältnisse (vgl. Abschnitt 4.2) und des geringen Kenntnisstandes insbesondere zu tieferen Grundwasserstockwerken häufig unsicher. Im Folgenden sollen unterirdische Teileinzugsgebiete der VES unter Berücksichtigung der tektonischen Verhältnissen, hinsichtlich ihres Verlaufs und der Unsicherheiten in der Abgrenzung kurz diskutiert werden. Im Vordergrund dieser Betrachtungen steht nicht die flächendeckende Betrachtung kompletter Einzugsgebiete, sondern die Diskussion auch von Teilabschnitten/Grundwasserscheiden wenn dort entsprechende Anhaltspunkte vorliegen. Ziel ist die Diskussion möglicher Einflussgrößen auf den Verlauf unterirdischer Einzugsgebiete, insbesondere aber von hydraulisch aktiven Störungen.

Abbildung 12 zeigt anhand ausgewählter Einzugsgebiete im zentralen bis westlichen Bereich der Vorerzgebirgssenke mögliche Abweichungen unterirdischer von den oberirdischen Einzugsgebieten.

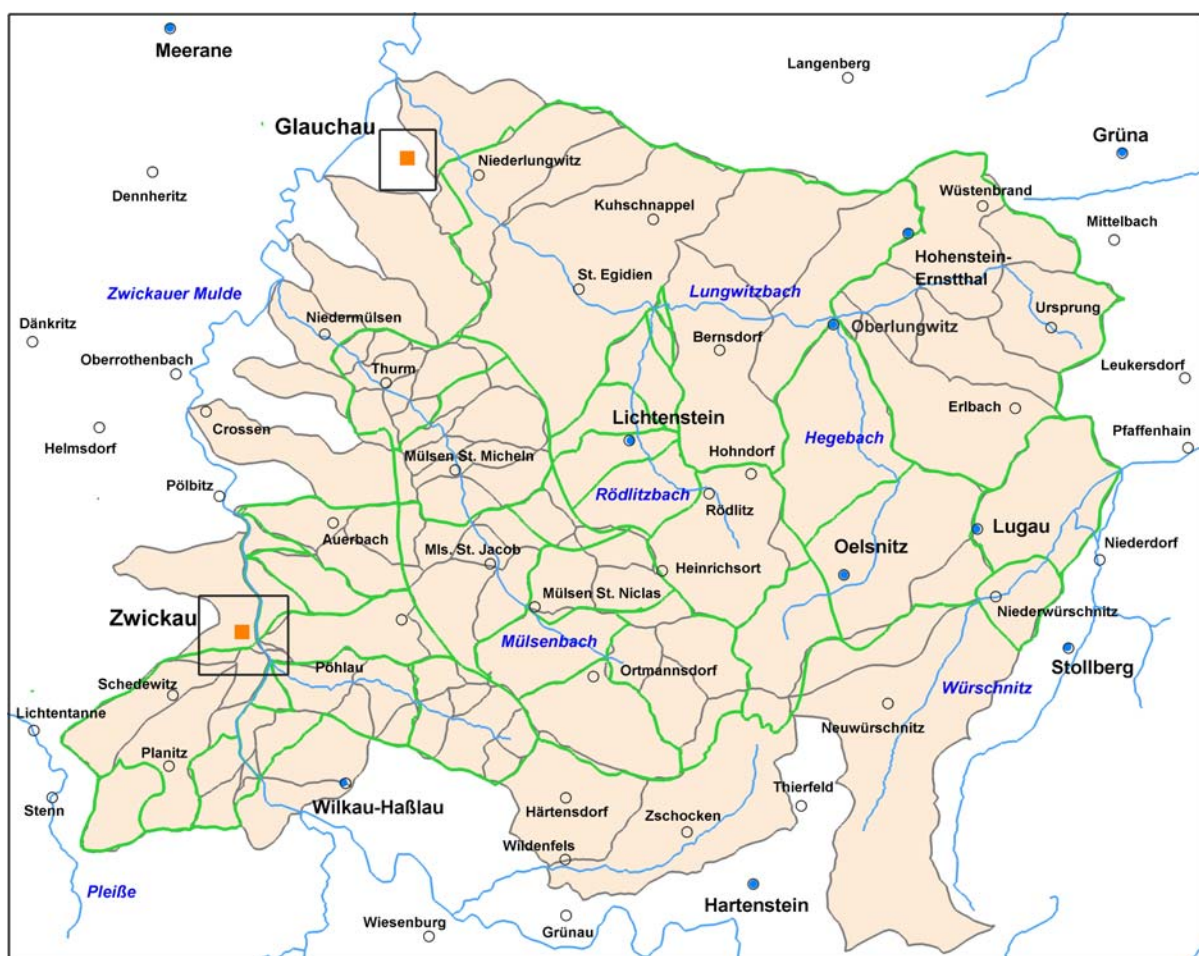


Abbildung 12 Grenzen unterirdischer Einzugsgebiete im zentralen Untersuchungsgebiet (Erläuterungen, vgl. Text)

Grau umrandet und rot hinterlegt sind die oberirdischen Einzugsgebiete. In grüner Umrandung sind mögliche Abweichungen der unterirdischen Einzugsgebiete angedeutet.

Eine detaillierte Diskussion des Verlaufes unterirdischer Einzugsgebietsgrenzen im Modellraum ist in Anlage 4 beigefügt. Daraus können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Eine datenbasierte sichere Ausweisung unterirdischer Teileinzugsgebiete ist für den Bereich der Vorerzgebirgssenke nicht flächendeckend möglich.

Die Informationsdichte und der daraus resultierende Kenntnisstand zum Wasserhaushalt der Teileinzugsgebiete ist stark schwankend. Darüber hinaus wird die Grundwasserdynamik in der Vorerzgebirgssenke durch quantitativ und qualitativ schwer abschätzbare Faktoren, wie dem Grundwasserfluss auf Kluft- und Störungszonen, bestimmt, was die unterirdischen Einzugsgebiete maßgeblich beeinflusst.

Prinzipiell ist deshalb von der Grundannahme auszugehen, nach der das unterirdische Einzugsgebiet (A_{Eu}) in etwa dem zugehörigen oberirdischen Einzugsgebiet (A_{Eo}) entspricht. Nach Auswertung der verfügbaren Unterlagen können aber für Teilgebiete Daten bzw. Angaben recherchiert werden, die eine direkte Aussage zu den Grundwasserscheiden zulassen und die oben genannte Grundannahme präzisieren.

Weitere Erkenntnisse bezüglich des Verlaufs der unterirdischen Einzugsgebietsgrenzen im regionalen Maßstab (Vorerzgebirgssenke und Umland) und zur Klärung der Grundwasserdynamik insbesondere in tieferen Grundwasserstockwerken, können erreicht werden durch (in Reihenfolge zunehmenden Aufwandes):

- Erfassung aller Grundwasserstandsdaten, landesamtlicher wie auch privater Projekte (z.B. aus Bau- und Sanierungsvorhaben, Grundwassermonitoringprogrammen) in einer gemeinsamen Übersichtsdatenbank
- großräumige Stichtagsmessung
- Wiederholungsmessungen im Sinne eines Monitorings
- Einrichtung weiterer bzw. Aktivierung bestehender Grundwassermessstellen mit koordiniertem langzeitlichen Monitoring
- Teufenabhängiges Monitoring und Grundwasserbeprobung zur Identifizierung und Abgrenzung verschiedener Grundwasserstockwerke

Im Gegensatz zu diesen Anforderungen hat die Anzahl brauchbarer Messstellen im zentralen Bereich der VES nach GÖTTELMANN et al. (1998) bis Ende der 90er Jahre beständig abgenommen. Darüber hinaus ist auch die Anzahl potenziell beprobbarer Brunnen aufgrund des gesunkenen Wasserbedarfs industrieller Abnehmer, des sich erhöhenden Anschlussgrades privater und gewerblicher Abnehmer an eine zentrale Wasserversorgung und der steigender Kontaminationen in noch genutzten Brunnen abnehmend. Bei einem Teil der noch verfügbaren Brunnen ist außerdem die Lage der Filterstrecke nicht bekannt. Grundwasserstockwerke mit ihren spezifischen Grundwasserspiegeln können so häufig nicht voneinander unterschieden werden.

Schwerpunkte zukünftiger Maßnahmen sollten einerseits die Gebiete geringer Informationsdichte darstellen, wie der mittlere Teil der Vorerzgebirgssenke (zwischen Lichtenstein und dem westlichen Chemnitz), der Gebietsanteil der Zschopau an der Vorerzgebirgssenke sowie die Senkenrandbereiche.

Andererseits sind die hydraulisch wichtigen Bereiche entlang der großen herzynischen und erzgebirgischen Störungszonen (z.B. die Oberhohndorfer und Rödlitzer Hauptverwerfung und die Pöhlauer Sprünge) sowie die Lungwitztalzone von besonderer Signifikanz. Hier lie-

gen bisher nur vereinzelt genauere Kenntnisse zu Wirkungsweise und zu hydraulischen Parametern vor (Abschnitte 4.2.4 und 4.3).

Weiterführende qualitative und quantitative Untersuchungen zur hydraulischen Aktivität dieser Störungssystemen u.a. als Ursache für eine Einschränkung oder Ausweitung der A_{Eu} können sinnvoll sein. Dazu gehört neben der Untersuchung der Wasserchemie inklusive der Spurenelemente auch Isotopenuntersuchungen und Tracerversuche (vgl. Abschnitte 4.5, 4.6 und 4.2.4).

4.4.3 Grundwasserneubildung und Bilanzierung

4.4.3.1 Grundwasserneubildung in den Teileinzugsgebieten und Abgrenzung der Bilanzgebiete

Für alle oberirdischen Einzugsgebiete 5. Ordnung im Bereich der Vorerzgebirgssenke (Kuhn 2003, Walther 1999), für einige zusammengefasste Einzugsgebiete im Raum Zwickau (vgl. WASY 1998 und HGN 1996a) sowie für durch Pegelmessungen eingrenzbare größere Einzugsgebiete – im folgenden als Bilanzgebiete bezeichnet – wurde die Grundwasserneubildung nach verschiedenen Methoden (Verfahren 1-4 in Abschnitt 2.7.3) sowie weitere hydrologische und hydrogeologische Parameter ermittelt. Die ausführlichen Berechnungsergebnisse und Dokumentationen sind in Anlage 6 enthalten.

Tabelle 26 Gebietswerte der Grundwasserneubildung^{*)} (GWN) mit GEOFEM 2003 und 2004

Gebiet	Fläche **)	GWN [mm]	
		2003	2004
Einzugsgebiete 5.Ordnung			
54115	91	<0	-
54117	61,25	131	-
54118	22,24	84	-
54119	1,39	91	-
54127	40,75	172	-
54128	166,4	130	144
54129	48,2	161	114
54131	2,31	65	65
54132	28,39	208	110
54133	9,23	83	101
54134	28,57	113	94
54135	12,93	52	80
54136	8,81	136	79
54137	28,97	75	69
54138	23,19	112	116
54139	17,75	76	69
54141	18	176	-
54142	10	188	-
54143	20,99	141	132
54144	8,10	39	141
54145	5,41	53	109

Gebiet	Fläche **)	GWN [mm]	
		2003	2004
54169	12,40	103	49
54171	29,45	80	39
54172	12,28	60	45
54173	22,61	45	33
54174	48,23	82	52
54175	5,89	38	36
54176	30,38	40	47
54177	42,51	34	43
54178	19,82	100	45
54179	28,68	36	47
54181	144,14	157	100
54182	136,90	113	81
54189	252,43	93	59
54191	33,82	38	31
54192	46,30	83	36
54193	12,5	6	-
54194	39,88	108	35
54195	58,5	37	-
54196	28	26	-
54198	55,75	109	-
54242	17,90	178	81
54243	25,31	120	68

Gebiet	Fläche **)	GWN [mm]	
		2003	2004
56626	36,13	139	58
56629	39,72	95	66
5663	154,44	16	-
56631	2,41	43	-
56632	37,53	83	74
56634	28,92	47	45
56636	7,77	25	54
56646	49,25	25	-
56647	13,5	124	-
56651	171,02	77	-
56658	281,98	4	42
56661	112,31	109	76
56662	48,73	48	73
56663	169,80	71	45
56664	164,45	78	107
56665	103,26	-8	44
56666	163,89	36	-
56667	65,25	4	-
56668	416,54	11	43
56669	268,5	6	-
Teileinzugsgebiete***)			

Gebiet	Fläche **)	GWN [mm]	
		2003	2004
54146	61,11	68	105
54147	4,33	44	46
54148	11,69	125	57
54149	0,62	33	28
54151	10,70	48	59
54152	11,35	117	124
54153	21,42	71	66
54154	6,12	119	56
54155	54,24	41	51
54156	52,23	117	88
54157	5,41	<0	44
54158	12,10	61	39
54159	14,97	10	38
54161	31,84	125	95
54162	25,90	114	101
54163	7,14	121	66
54164	7,64	124	63
54165	11,12	128	78
54166	21,35	95	84
54167	22,27	77	54
54168	3,14	151	65

Gebiet	Fläche **)	GWN [mm]	
		2003	2004
54245	30,21	103	53
54246	69,66	146	73
54248	11,96	158	63
54261	115,78	113	103
54262	61,10	129	110
54263	110,26	152	110
54264	209,26	143	110
54265	70,87	133	98
54266	65,62	192	110
54267	97,36	100	77
54268	795,33	90	92
54269	318,49	47	51
56549	2,75	22	-
56617	123,25	42	-
56618	183,75	2	-
56619	105,84	63	81
56621	61	145	-
56622	28	202	-
56623	24,25	111	-
56624	25,41	88	104
56625	40,06	105	49

Gebiet	Fläche **)	GWN [mm]	
		2003	2004
20	5,2	88	101
35	10,0	128	82
61	12,5	166	75
Bilanzgebiete			
Vorerzgebirgssenkung	723,9	94	72
Pleisse	165,4	80	74
Mülsenbach	49,6	123	94
Lungwitzbach	137,7	106	77
Koberbach	10,4	104	78
Chemnitz iwS.	258,5	108	72
Chemnitz ieS.	155,2	111	64
Zwickau iwS.	257,5	94	74
Zwickau ieS.	70,2	66	67
Würschnitz	103,3	109	86
Zschopau	42,6	67	-

*¹) langsame und schnelle Komponente

**¹) in km², *kursiv*=Fläche der Berechnungseinheiten

***¹) Ausweisung nach WASY (1998)

Die GWN nach GEOFEM 2000 ist zusammen mit allen übrigen GWN-Berechnungen in Anlage 6 dokumentiert

Tabelle 26 zeigt die nach GEOFEM (2003 und 2004) (Verfahren 1) ermittelte Grundwasserneubildung über den Einzugsgebieten 5. Ordnung, den Bilanzgebieten und weiteren EZGs.



Abbildung 13 Grundwasserneubildung: Lage und Kennung der zugehörigen Einzugsgebiete

Eine Übersicht über die Lage der Einzugsgebiete 5. Ordnung zeigt Abbildung 13. Die GWN-Werte nach GEOFEM waren in dieser Diskretisierung auch Eingangsparameter der hydraulischen Modellierung (Abschnitt 4.9.4).

Für zwei Drittel dieser Einzugsgebiete liegt die GWN nach GEOFEM 2004 unter jener nach GEOFEM 2003 (minus 16%). Darüber hinaus liefert GEOFEM 2004 im Vergleich zu GEOFEM 2003 für die Gesamtheit der Einzugsgebiete ausgeglichene, also weniger schwankende, GWN-Höhen. Zur ungefähren Einordnung des Niveaus der GWN nach den einzelnen Varianten seien im folgenden die Mittelwerte und Mediane der GWN für die Einzugsgebiete 5. Ordnung im weiteren Bereich der Vorerzgebirgssenke genannt (GEOFEM 2000 / GEOFEM 2003 / GEOFEM 2004).

- Mittelwerte: 95 / 84 / 66
- Mediane: 89,4 / 87,3 / 72,1

Nachfolgend wurden diese oberirdischen Teileinzugsgebiete nun so zu Bilanzgebieten kombiniert, dass der Basisabfluss aus diesen Gebieten über die vorhandenen Pegel erfasst werden konnte. Grundlage dieser Vorgehensweise ist die Annahme, dass der Basisabfluss aus den Bilanzgebieten annähernd die mittlere Grundwasserneubildung der zugehörigen unterirdischen Einzugsgebiete repräsentiert (zur Methodik vgl. Abschnitt 2.7). Der Verlauf der unterirdischen Einzugsgebiete, bzw. ihr Abweichen von den oberirdischen Einzugsgebieten wird in den Abschnitten 4.4.1 und 4.4.2 diskutiert.

Abbildung 14 gibt einen Überblick über die abgegrenzten Bilanzgebiete (rot). Blau gekennzeichnet sind die eingrenzenden Pegel gemäß Tabelle 27.



Abbildung 14 Bilanzgebiete im Bereich der Vorerzgebirgssenke (Erläuterungen, vgl. Text)

Zur Ermittlung des Basisabflusses wurden folgende Pegel des Landesmessnetzes Sachsen verwendet (Tabelle 27).

Tabelle 27 Zusammenstellung der verwendeten Pegel

Pegelname	Lage: Fluss, Gauß-Krueger Koordinaten	Zeitraum Messdaten (Anzahl verwendeter Jahre) ^{*)}
Neukirchen 1	Pleiße, RW 4526240, HW 5627390	1979 bis 1998 (aus 19 Jahren)
Langenreinsdorf	Koberbach/Pleiße, RW 4523700, HW 5627520	1965 bis 1998 (aus 32 Jahren)
Zwickau-Pölbitz	Zwickauer Mulde, RW 4535050, HW 5622920	1928 bis 1998 (aus 70 Jahren) hier 19.6.1998 (WASY 1998)
Wilkau-Haßlau ^{**)}	Zwickauer Mulde, RW 4536468, HW 5615715	19.6.1998 (WASY 1998)
Niedermülsen 1	Mülsenbach, RW 4537490, HW 5626970	1982 bis 1998 (aus 15 Jahren)
Niederlungwitz	Lungwitzbach, RW 4540410, HW 5631470	1985 bis 1998 (aus 14 Jahren)
Chemnitz 1	Chemnitz, RW 4565030, HW 5634840	1918 bis 1997 (aus 70 Jahren)
Chemnitz 2	Kappelbach, RW 4564200, HW 5632850	seit 1985
Jahnsdorf	Würschnitz, RW 4560620, HW 5624960	1911 bis 1998 (aus 87 Jahren)
Altchemnitz 1	Zwönitz, RW 4565320, HW 5628690	1992 bis 1998 (aus 7 Jahren)
Flöha	Zschopau, RW 4574040, HW 5637280	seit 1903
Lichtenwalde	Zschopau, RW 4572060, HW 5639540	1910 bis 1998 (aus 89 Jahren)

^{*)} Angaben nach WALTHER (1999) oder wie angegeben; ^{**)} Messpunkt WASY (1998)

Tabelle 28 listet die Bilanzgebiete mit den eingrenzenden Pegeln und dem Basisabfluss.

Tabelle 28 Bilanzgebiete, eingrenzende Pegel und mittlerer Basisabfluss (Abschnitt 2.7.3)

Bilanzgebiete	Fläche [km ²]	Pegel (Input) [m ³ /s]		Pegel (Output) [m ³ /s]		Differenz [m ³ /s]	Basisabfluss [mm]
	Bezugsfläche GEOFEM	Name	Basisabfluss	Name	Basisabfluss		
Koberbach	10,4	-	-	Langenreinsdorf	0,00421	0,00421	12,8
	16,3						
Pleiße	165,4	-	-	Neukirchen1	0,274	0,274	52,5
	186,3						
Zwickauer Mulde i.w.S.	257,5	Wilkau-Haßlau	3,83 ^{*)}	Zwickau-Pölbitz	4,202 ^{*)}	0,968	118,6
	285,8			Niedermülsen1	0,146		
Zwickauer Mulde i.e.S.	70,2	Wilkau-Haßlau	3,83 ^{*)}	Zwickau-Pölbitz	4,202 ^{*)}	0,372	167,2
	83,3						
Mülsenbach	49,8	-	-	Niedermülsen1	0,146	0,146	92,5
	61,5						
Lungwitzbach	137,7	-	-	Niederlungwitz	0,450	0,450	103
	155,8						
Chemnitz i.e.S.	155,2	Jahnsdorf	0,249	Chemnitz1	0,683	0,047	9,5
	177	Altchemnitz1	0,387				
Würschnitz	103,3			Jahnsdorf	0,249	0,249	76
	120,8						
Chemnitz-Würschnitz	258,5	Altchemnitz1	0,387	Chemnitz1	0,683	0,296	36,1
	291,3						

Bilanzgebiete	Fläche [km ²]	Pegel (Input) [m ³ /s]		Pegel (Output) [m ³ /s]		Differenz [m ³ /s]	Basisabfluss [mm]
	Bezugsfläche GEOFEM	Name	Basisabfluss	Name	Basisabfluss		
Vorerzgebirgssenke	681,3	Wilkau-Haßlau	3,83 ^{*)}	Zwickau-Pölbitz	4,202 ^{*)}	1,538	71,2
	741	Altchemnitz1	0,387	Chemnitz1	0,683		
				Neukirchen1	0,274		
				Niedermülsen1	0,146		
				Niederlungwitz	0,450		

^{*)} Daten aus WASY (1998). Stichtagsmessung; korrigiert (anthropogene Entnahmen/Zuführungen)

Der Basisabfluss kann nun mit der Grundwasserneubildung nach anderen Verfahren (zur Methodik vgl. Abschnitt 2.7.3) über den selben Bilanzgebieten verglichen werden.

Bei der Auswertung sind ggf. die unterschiedlichen Beobachtungszeiträume an den einzelnen Pegeln kritisch zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind weitere Faktoren von Bedeutung, die die Aussagekraft eines direkten Vergleiches des berechneten Basisabflusses mit der GWN einschränken. Dazu gehören Fluss- und Grundwasserentnahmen bzw. infiltrationen. Eine detaillierte Berücksichtigung dieser Faktoren erfolgte nur teilweise. Eine entsprechende Erläuterung und Fehlerdiskussion erfolgt in Abschnitt 2.7.

4.4.3.2 Bilanzgebiete im zentralen Teil der Vorerzgebirgssenke

Für die Bilanzgebiete Zwickauer Mulde i.e.S., Mülsenbach und Lungwitzbach im zentralen Teil der Vorerzgebirgssenke ist die GWN außer über den Basisabfluss (Verfahren 4) und GEOFEM (Verfahren 1) zusätzlich mit NASIM u.a. (Verfahren 2) sowie für den Bereich Zwickauer Mulde mit GEOFEM^{LAW}, GWD und experimentell (Verfahren 3) bestimmt worden (Bestimmungsverfahren vgl. Abschnitt 2.7.3). Die Ergebnisse sind vergleichend in Tabelle 29 dargestellt.

Für die Berechnung Grundwasserneubildung nach GEOFEM wurde sowohl die Programmversion 2000 als auch die im Verlaufe der Arbeiten entwickelten aktuelleren Varianten GEOFEM 2003 und 2004 verwendet (zu Unterschieden vgl. Abschnitt 2.7.3). Die Grundwasserneubildungsbeträge in den Bilanz- bzw. Teilgebieten im Bereich der Zwickauer Mulde weisen nach GEOFEM 2003 gegenüber jener nach GEOFEM 2000 zumeist nur geringe Abweichungen auf. Deutliche Veränderungen ergeben sich hier jedoch bei der Berechnung der Anteile der langsamen Komponente (Werte in Klammern in Tabelle 29). Für die betrachteten Gebiete liegen diese nach GEOFEM 2003 z.T. deutlich unter den mit GEOFEM 2000 berechneten Beträgen.

Die GWN nach der aktuellen GEOFEM-Variante GEOFEM 2004 unterscheidet sich z.T. deutlich von den älteren Varianten. Dabei liegt die Grundwasserneubildung (mit und ohne schneller Komponente) nach GEOFEM 2004 erwartungsgemäß zumeist unter jener der älteren Berechnungen (Tabelle 29), da dies schon bei den zugehörigen Teileinzugsgebieten 5. Ordnung zu beobachten war (Tabelle 26).

Tabelle 29 Berechnungsergebnisse und Vergleich der Grundwasserneubildung im Bereich der Zwickauer Mulde

Bilanzgebiete (Fläche)	Grundwasserneubildung (mm) nach:						Abweichung der GWN (wie angeg.) von der aus GEOFEM 2000 - 2004 ¹⁾ [%]					
	GEOFEM ¹⁾			NASIM oder wie ang. ²⁾	GWD u.a. ³⁾	Basis abfluß ⁴⁾	NASIM /GWD u.a. ^{2,3)}			Basisabfluss ⁴⁾		
	2000	2003	2004				2000	2003	2004	2000	2003	2004
WASY TEG 20 ⁵⁾ (5,23 km ²)	125 (115)	88 (19)	101 (62)	120			-4	+36	+19	-	-	-
WASY TEG 35 ⁵⁾ (9,98 km ²)	130 (121)	128 (84)	82 (56)	151			+16	+18	+84	-	-	-
WASY TEG 61 ⁵⁾ (12,45 km ²)	164 (153)	166 (104)	75 (66)	186			+13	+12	+148	-	-	-
Zwickauer Mul- de-WASY (1998) (51,8 km ²)	k.A.	k.A.	66 (49)	136			-	-	+106	-	-	-
				130 ⁸⁾				+97				
				165 ⁹⁾				+150				
Zwickauer Mul- de i.e.S. (70,8 km ²)	45 (0)	66 (0)	67 (51)	-	156 ⁷⁾	167,2	+247	+136	+133	+272	+153	+150
Zwickauer Mul- de i.w.S. ⁶⁾	83 (51)	94 (40)	74 (54)	-	-	118,6	-	-	-	+43	+26	+60
Mülsenbach	116 (108)	123 (92)	94 (62)	198	-	92,5	+71	+61	+111	-20	-25	-2
				150 ⁸⁾			+29	+22	+60			
				180 ⁹⁾			+55	+46	+91			
Lungwitzbach	109 (94)	106 (61)	77 (57)	155	-	103	+42	+46	+101	-6	-3	+34
				145 ⁸⁾			+33	+37	+88			
				175 ⁹⁾			+61	+65	+127			

¹⁾ Verfahren 1 für die GEOFEM-Versionen 2000, 2003 und 2004; in Klammern nur langsame GWN-Komponente ²⁾ Verfahren 2; WASY (1998); z. T. mit Angabe Methode ³⁾ Verfahren 3; HGN (1996) ⁴⁾ Verfahren 4; vgl. Abschnitt 2.7.3 ⁵⁾ WASY Teileinzugsgebiete 20 (5,2 km²), 35 (10,0 km²) und 61 (12,5 km²) in WASY (1998) ⁶⁾ entspricht den vereinten Bilanzgebieten Zwickauer Mulde i.e.S., Mülsenbach und Lungwitzbach ⁷⁾ abweichende Gebietsgröße; nach HGN (1996a) für nach N bis Crossen erweitertes Gebiet (95,5 km²) ⁸⁾ GEOFEM-LAW ⁹⁾ experimentell

Bilanzgebiet Zwickauer Mulde

In Gebieten mit wesentlichem quartären Grundwasserleiter, z.B. dem **Bilanzgebiet Zwickauer Mulde i.e.S.**, korreliert der Basisabfluss von 167 mm (Verfahren 4) recht gut mit der Grundwasserneubildung von 136-165 mm bzw. 156 mm nach NASIM (WASY 1998) bzw. GWD u.a (HGN 1996) (Verfahren 2 und 3), auch wenn die Größe der zu Grunde liegenden Einzugsgebiete etwas voneinander abweicht. In den Verfahren 2 und 3 werden Ansätze verwendet, die nach Aussage der Autoren (z.B. WASY 1998) eine Lockergesteinsbedeckung berücksichtigen (Abschnitt 2.7.3). Das im südlichen Stadtbereich in tagesnahe Grubenbaue, in das Quartär oder in die rotliegende Zerrüttungszone versickernde Wasser der Zwickauer Mulde¹⁾, fließt also offensichtlich dieser bis zur nördlichen Grenze des Einzugsgebietes (Pegel Pölbitz) im wesentlichen wieder zu. Das gilt offensichtlich auch für die oberen rotliegenden GWL. So wird u.a. in LFUG (2003) eine gute Verbindung zwischen Mulde, quartärem

¹⁾ die quantitativen Angaben zu den Versinkungen von Muldenwasser in die GWL weichen bei den verschiedenen Autoren deutlich voneinander ab, so daß hier keine zuverlässigen Werte für das Gesamtgebiet vorliegen

und oberem Rotliegendgrundwasserleiter auf der Grundlage von Daten aus den GWMSt 52416013 und 52416014 (Schneeberger Strasse) postuliert.

Auf dieser Grundlage ist kein wesentlicher Abstrom von Grundwasser aus dem Raum Zwickau über das bis zum Pegel Pölbitz reichende unterirdische Einzugsgebiet hinaus ableitbar. Ein solcher Abstrom ist - insbesondere entlang von hydraulisch aktiven Störungszonen im Bereich tieferer GWL - sicher möglich, ein Nachweis steht aber weiterhin aus. Die Möglichkeit eines solchen Abstroms wurde z.B. von BRAUSE (1999) diskutiert und untersucht.

Die Berechnung der Grundwasserneubildung nach GEOFEM liefert im Vergleich mit den oben genannten Bestimmungsmethoden dagegen deutlich geringere Werte für das Bilanzgebiet Zwickauer Mulde i.e.S. Dies gilt vor allem für GEOFEM 2000 (45 mm) aber auch für GEOFEM 2003 (66 mm) und 2004 (67 mm) (Tabelle 29).

Eine Ursache dafür ist die (rechnerisch) negative bzw. zu niedrige Grundwasserneubildung in einigen Teileinzugsgebieten, so z.B. in 54153 (-65 mm, GEOFEM 2000) und 54157 (-3 mm, GEOFEM 2003) (Tabelle 26). Diese sind sicher u.a. auf Mängel im Programm bei der Berücksichtigung der dortigen Lockergesteinsbedeckung zurückzuführen (vgl. Abschnitt 2.7.3). In anderen Teilgebieten, so in den TEG 20, 35 und 61 des Bilanzgebietes Zwickauer Mulde i.e.S. liegen die Abweichungen zwischen der Grundwasserneubildung nach GEOFEM 2000 bzw. 2003 und NASIM u.a. (Verfahren 2, WASY 1998) jedoch lediglich zwischen 4 und 36 %, stimmen also relativ gut überein (Tabelle 29).

Im Gegensatz zu den älteren Versionen liefert GEOFEM 2004 in den Teileinzugsgebieten 5. Ordnung des Bilanzgebietes Zwickau i.e.S., keine negativen Werte für die GWN-Menge, sowie konstant niedrigere Werte als nach NASIM bzw. GWD (Verfahren 2 und 3).

Geht man von der Richtigkeit der GWN nach GEOFEM 2004 aus (67 mm), muss die hohe Differenz zum ermittelten Basisabfluss (167 mm) auf andere Faktoren zurückzuführen sein. Einerseits ist ein Einfluss anthropogener Grundwasserneubildung, z.B. durch Infiltration von Fremdwasser aus Leitungssystemen möglich. Nach Untersuchungen z. B. von WASY (1998) sind solch hohe anthropogenen Infiltrationen in den GWL – bei allen Unsicherheiten – jedoch nicht plausibel, zumal Grundwasser auch in umgekehrter Richtung in defekte Leitungssysteme infiltriert.

Andererseits ist ein Zustrom von Grundwasser in das betrachtete Bilanzgebiet, also faktisch eine Erweiterung des unterirdischen Einzugsgebietes, möglich. Hier wäre ein Zustrom aus Süd/Südost, z.B. entlang der Oberhohndorfer Hauptverwerfung möglich. Allerdings gibt es für ein solches Szenario keine sicheren Hinweise, zumal die Durchlässigkeiten im Bereich des südlich anstehenden Erzgebirgskristallins erfahrungsgemäß gering sind.

Auch die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung lassen hier keine eindeutigen Aussagen zu (Abschnitt 4.9.7).

Die zur Auffüllung des Neubildungsdefizits von ca. 7 Mio. m³/Jahr erforderlichen hydraulischen und geometrischen Eigenschaften entsprechender hydraulisch aktiver tektonischer Elemente lassen sich überschlägig berechnen. Geht man von der Annahme aus, dass der gesamte Grundwasserzustrom entlang einer einzelnen Störungzone erfolgt, könnte für diese auf Grundlage der in Abschnitt 4.3.3 hergeleiteten Methodik und der abgeleiteten Tabellen z.B. folgende Randbedingungen gelten:

- sehr hoher Gradient von 0,1 (Übergang Erzgebirge – Vorerzgebirgssenke)
- Durchlässigkeitsbeiwert: $1 \cdot 10^{-4}$ m/s

- wirksame Störungsbreite: 100 m, wirksame Störungsteufe: 200 m

Ein geringerer angenommener Gradient setzt folgerichtig höhere Durchlässigkeiten und/oder größere wirksame Störungsquerschnitte voraus und umgekehrt. Verteilt sich der Anstrom auf mehrere tektonische Elemente sind entsprechend geringere wirksame Störungsquerschnitte, Gradienten und Durchlässigkeiten erforderlich. (Abschnitt 4.3.3).

Bilanzgebiete Mülsenbach und Lungwitzbach

Im Bilanzgebiet **Mülsenbach** liegt der Basisabfluss (92,5 mm) etwas unter der berechneten GWN nach GEOFEM 2000 und 2003 (116 und 123 mm). Letztere liegt also mit 20 bis 25 % über dem Wert des Basisabflusses und damit gerade noch im tolerierbaren Bereich (zur Erläuterung/Beurteilung der Toleranz vgl. Abschnitt 2.7.3). Die langsamen Komponenten der GWN allein liegen hier mit 108 mm (GEOFEM 2000) und 92 mm (GEOFEM 2003) im Bereich des Basisabflusses. Die exakte Abgrenzung von langsamer und schneller Komponente (hier eventuell schon Teil des Zwischenabflusses?) stellte bisher eine Schwachstelle bei der Ermittlung der GWN mit GEOFEM dar (Abschnitt 2.7.3). Dies könnte möglicherweise eine Ursache für diese deutliche Abweichung Gesamt-GWN und die gute Übereinstimmung der langsamen Komponente der GWN mit dem Basisabfluss im Bilanzgebiet Mülsenbach darstellen.

Für diese Annahme spricht, dass die GWN nach GEOFEM 2004 mit 94 mm sehr genau dem zugehörigen Basisabfluss. Eine Abgrenzung der langsamen Komponente ist hier jedoch nur annähernd möglich (62 mm).

Im Gegensatz zum Basisabfluss und zur GWN nach GEOFEM ergaben Wasserhaushaltsbetrachtungen nach anderen Verfahren deutlich höhere GWN-Werte (siehe unten). Geht man von Richtigkeit dieser Berechnungen ist ein Abstrom von Grundwasser aus dem Bilanzgebiet, etwa über Störungsbereiche notwendig. Ein solcher Abstrom aus dem Bilanzgebiet des Mülsenbach wäre zumindest nach den Ergebnissen der großräumigen hydraulischen Modellierung plausibel (Abschnitt 4.9).

Im Bilanzgebiet **Lungwitzbach** stimmt der Basisabfluss (103 mm) sehr genau sowohl mit der nach GEOFEM 2000 (109 mm) als auch nach GEOFEM 2003 (106 mm) berechneten GWN überein. Der Fehler beträgt hier lediglich 6 % (GEOFEM 2000) bzw. 3 % (GEOFEM 2003). Allerdings liegt die GWN nach den alten GEOFEM-Berechnungen sowie der Basisabfluss (+34%) über der mit GEOFEM 2004 ermittelten GWN von 77 mm (Tabelle 29).

Auffällig ist die deutliche **Abweichung** der mit GEOFEM berechneten bzw. aus dem Basisabfluss abgeleiteten GWN von der mit NASIM u.a. (WASY 1998) ermittelten GWN (vgl. Verfahren 2 in Abschnitt 2.7.3). Die GWN nach den Verfahren 2 liegt mit 150 bis 198 mm für das Bilanzgebiet Mülsenbach und 145 bis 175 mm für das Bilanzgebiet Lungwitzbach deutlich über der GWN nach GEOFEM 2003 (123 und 106 mm). Dies entspricht Abweichungen von 22 bis 61 % für das Bilanzgebiet Mülsenbach und 37 bis 65 % für das Bilanzgebiet Lungwitzbach. Im Vergleich mit GEOFEM 2004 (94 und 77 mm) sind die Differenzen noch deutlich höher (Tabelle 29).

WASY (1998) führt dies auf Defizite von GEOFEM 2000 bei Berücksichtigung der besonderen oberflächlichen Geologie und Gesteinsbeschaffenheit in diesen Gebieten zurück. Der

quasi-Lockergesteinscharakter der anstehenden Gera-/Mülsen-Folge und der Auflockerungszone der Leukersdorf-Folge wird danach durch GEOFEM 2000 nicht genügend berücksichtigt, was zur Unterschätzung der Grundwasserneubildungsmenge führen kann. Von u.a. diesen Defiziten ist auch bei den neueren GEOFEM-Versionen 2003 und 2004 auszugehen (Abschnitt 2.7.3).

Folgt man dieser Einschätzung und geht von der Annahme aus, dass die Grundwasserneubildung nach NASIM (Verfahren 2) tatsächlich realistisch ist, so wäre sie auch deutlich höher als der gemessene zugehörige Basisabfluss. Es ergäben sich nach Tabelle 29 Abflussdefizite gegenüber der berechneten Grundwasserneubildung von:

- 57,5 bis 105,5 mm im Bilanzgebiet Mülsenbach
- 42 bis 72 mm im Bilanzgebiet Lungwitzbach

Welche Erklärungen ließen sich für solche Abflussdefizite finden?

Da die Flutung des im Bereich des **Bilanzgebietes Mülsenbach** gelegenen Mülsenfelds des ehemaligen Zwickauer Steinkohlenreviers seit Beobachtungsbeginn des Pegels Niedermülsen1 1994 als abgeschlossen gelten kann, ist eine wesentliche Speicheränderung durch Auffüllung der Grubenbaue unwahrscheinlich. Relevante anthropogene Entnahmen und Einleitungen sind zudem nicht bekannt. Der scheinbare Überschuss der Grundwasserneubildung könnte so auf einen Grundwasserabfluss aus dem Bilanzgebiet Mülsenbach hinweisen. Damit wäre in den Abflussbereichen eine Einschränkung des zugehörigen unterirdischen Einzugsgebietes gegeben, woraus eine geringere Neubildungssumme für das Bilanzgebiet resultieren. Ein solcher Abfluss könnte z.B. nach NW entlang des im Tal des Mülsenbachs verlaufenden und als hydraulisch wirksam bekannten 1. Pöhlauer Sprungs stattfinden (vgl. Abschnitte 4.3.2 und 4.2.4). Beispielrechnungen zeigen, dass die - auf Grundlage der recherchierten hydraulischen und geometrischen Randbedingungen - auf vorerzgebirgischen Störungs- und Kluftzonen fließenden Grundwassermengen ausreichen, um das Abflussdefizit im Bilanzgebiet Mülsenbach zu decken (Abschnitt 4.3.3).

Grundwasserströmung auf Störungs- und Kluftzonen könnte dann gleichermaßen für das berechnete Abflussdefizit im **Bilanzgebiet Lungwitzbach** verantwortlich sein. Der Grundwasserabfluss könnte hier über den 2. Pöhlauer Sprung, die Rödlitzer Hauptverwerfung und/oder auch die Lungwitztalzone erfolgen. Der Rödlitzbach verläuft über lange Abschnitte direkt entlang der Rödlitzer Hauptverwerfung (Abschnitt 4.2.4.2). Eine Versinkung von Flusswasser ist dabei sehr wahrscheinlich und wird sicherlich zum oben genannten Defizit im Basisabfluss beitragen. Die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung lassen dagegen keinen wesentlichen Abstrom aus dem Bilanzgebiet Lungwitzbach erkennen.

Darüber hinaus trägt aber ein Teil der Grundwasserneubildung auch zur Flutung der Grubenbaue des ehemaligen Steinkohlenreviers Lugau-Oelsnitz bei. Dieser Anteil wird jedoch nur sehr gering sein. Legt man den maximalen gemessenen Grubenwasserzulauf zu den Grubenbauen in Lugau-Oelsnitz zugrunde (1959 = 1,314 Mio. m³/Jahr) und nimmt an, dass dieser ausschließlich aus der Grundwasserneubildung des Bilanzgebietes Lungwitzbach gespeist wird (realistisch wären ca. 50 %), so entspräche dieser Zulauf einer Grundwasserneubildung von nur rund 9 mm. Der tatsächliche Zulauf dürfte, zudem aufgrund des inzwischen deutlich gestiegenen Grubenwasserspiegels, wesentlich darunter liegen.

4.4.3.3 Bilanzgebiete im westlichen und östlichen Teil der Vorerzgebirgssenke

Tabelle 30 zeigt eine Gegenüberstellung der Grundwasserneubildung aus dem Basisabfluss (Verfahren 4, Abschnitt 2.7.3) und der Grundwasserneubildung nach GEOFEM (Verfahren 1) für verschiedene Bilanzgebiete im östlichen und westlichen Teil der Vorerzgebirgssenke. Da die Abgrenzung der Bilanzgebiete nach Lage der zur Verfügung stehenden Oberflächenwasserpegel erfolgte, mussten z.T. größere Gebiete mit anstehendem Grundgebirge miteinbezogen werden. Für das Bilanzgebiet Zschopau war die Ermittlung des Basisabflusses nicht möglich. Die GWN wurde hier lediglich nach GEOFEM 2000 berechnet. Die berechnete Grundwasserneubildung (langsame und schnelle Komponente) fällt nach GEOFEM 2003 generell etwas höher aus als nach GEOFEM 2000, der Anteil der langsamen Komponente ist nach GEOFEM 2003 dagegen meist geringer.

Die GWN nach GEOFEM 2004 für die östlichen und westlichen Bilanzgebiete liegen sowohl unter denen aus GEOFEM 2003 als auch – bis auf die Bilanzgebiete Pleiße und Koberbach – unter denen nach GEOFEM 2000. Allerdings ist der Anteil der langsamen Komponente an der GWN nach GEOFEM 2004 sehr hoch. Dieser ist jedoch aufgrund der Methodik der Bestimmung der langsamen Komponente bei GEOFEM 2004 wenig aussagekräftig (Abschnitt 2.7.3). Die Streuung der GWN-Werte nach GEOFEM 2004 ist – wie auch bei den Teileinzugsgebieten 5. Ordnung (Abschnitt 4.4.3.1) – geringer als bei den älteren GEOFEM-Versionen.

Tabelle 30 Berechnungsergebnisse und Vergleich der Grundwasserneubildung für Bilanzgebiete in der Vorerzgebirgssenke

Bilanzgebiet	Grundwasserneubildung (mm)				Abweichung des Basisabflusses v der GWN nach GEOFEM ¹⁾ [%]		
	nach GEOFEM ¹⁾			aus Basis- abfluss ⁴⁾			
	2000	2003	2004		2000	2003	2004
<i>Vorerzgebirgssenke</i>	83 (54)	94 (33)	72 (57)	71,2	-14	-24	-1
<i>Würschnitz</i>	105 (74)	109 (35)	86 (72)	76	-28	-30	-12
<i>Pleiße</i>	54 (27)	80 (30)	74 (61)	52,5	-3	-34	-29
<i>Chemnitz i.e.S.</i>	101 (72)	111 (39)	64 (53)	9,5	-91	-91	-85
<i>Chemnitz-Würschnitz</i>	104 (73)	108 (34)	72 (61)	36,1	-65	-67	-50
<i>Koberbach</i>	66 (54)	104 (67)	78 (64)	12,8	-81	-88	-84
<i>Zschopau</i>	67 (24)	- -	- -	-	-	-	-

¹⁾ Verfahren 1 für die GEOFEM-Versionen 2000, 2003 und 2004; in Klammern nur langsame GWN-Komponente

⁴⁾ Verfahren 4; vgl. Abschnitt 2.7.3

Der Basisabfluss für das aus den einzelnen Teil-Bilanzgebieten kombinierte **Bilanzgebiet Vorerzgebirgssenke** stimmt sehr genau mit der nach GEOFEM 2004 ermittelten GWN überein (71,2 und 72 mm) (Tabelle 30). Die GWN nach GEOFEM 2003 liegt dagegen mit 94 mm über dem zugehörigen Basisabfluss (-24 %) und befindet sich damit gerade noch im zulässigen Schwankungsbereich (vgl. Abschnitt 2.7.3). Das gilt gleichermaßen für die GWN nach GEOFEM 2000 (83 mm oder -14 % Abweichung).

Das **Bilanzgebiet Würschnitz** weist im Vergleich zu den übrigen Bilanzgebieten einen hohen Anteil präkarboner kristalliner Gesteine des sich südlich anschließenden Grundgebirges auf (ca. 60 %). Der Basisabfluss liegt hier mit 76 mm rund 30 % unter der Grundwasserneu-

bildung nach GEOFEM 2003 (109 mm), jedoch nur 12 % unter der GWN nach GEOFEM 2004 (86 mm). WASY (1998) ermittelte mit NASIM u.a. (Verfahren 2 in Abschnitt 2.7.3) für einige Teileinzugsgebiete des Bilanzgebietes Würschnitz deutlich höhere Grundwasserneubildungen zwischen 91 und 210 mm.

Es kann also – je nach Methode der GWN-Bestimmung - von keinem wesentlichen bis leichten Defizit des Basisabflusses gegenüber der berechneten GWN ausgegangen werden. Relevante Entnahmen aus dem Oberflächenwasser die nicht rückgeführt werden und zur Verringerung des gemessenen Basisabflusses führen würden, konnten nicht ermittelt werden. Nach ZWEIG (2006c) liegen Angaben zu 2 wesentlichen Grundwasserentnahmen vor. Bezogen auf das Gesamtgebiet beläuft sich die mittlere entnommene Menge hier jedoch lediglich auf rund 1,2 mm/a.

Dagegen konnten 12 Betriebe bzw. kommunalen Kläranlagen recherchiert werden (ZWEIG 2006c) die in die Würschnitz einleiten. Dies trägt zur Erhöhung des gemessenen Basisabflusses bei.

Schlussfolgernd ist für das Bilanzgebiet Würschnitz eine Einschränkung des unterirdischen gegenüber dem oberirdischen Einzugsgebiet möglich, jedoch nicht zwingend notwendig.

Ein Abstrom von Grundwasser nach Süd ist dabei aufgrund des regionalen nach S ansteigenden Druckgradienten unwahrscheinlich. Allerdings könnte Grundwasser im NW des Bilanzgebietes über die Rödlitzer Hauptverwerfung und/oder die sich östlich anschließenden herzynischen Störungen/Störungszonen abfließen.

Darüber hinaus wird ein (geringer) Teil der Grundwasserneubildung auch zur Auffüllung der noch in Flutung befindlichen Steinkohlengruben des Lugau-Oelsnitzer Reviers beitragen (vgl. Abschnitt 4.4.3.2, Bilanzgebiet Lungwitzbach).

Im **Bilanzgebiet Pleiße** entspricht der Basisabfluss (52,5 mm) der Grundwasserneubildung nach GEOFEM 2000 (54 mm), liegt aber 34% bzw. 29 % unter den Werten nach GEOFEM 2003 (80 mm) bzw. 2004 (74 mm). Geht man von der Richtigkeit der aktuellen GEOFEM-Versionen aus, könnte der geringere Basisabfluss auf einen Grundwasserabstrom aus dem Bilanzgebiet, also auf eine Einschränkung des unterirdischen gegenüber dem oberirdischen Einzugsgebiet hinweisen. Ein solcher Grundwasserabstrom wäre über herzynische und N-S streichende Störungen nach NW bzw. N denkbar, so z.B. im NW des Bilanzgebietes Pleiße entlang der Störung bei Niederalbertsdorf oder der Störung Koberbachtal (Abschnitte 4.2.4.1 und 4.3.2 und siehe unten). Möglich sind auch hydraulische Wechselwirkungen mit dem sich östlich anschließenden Bilanzgebiet Zwickau und seinen Grubenbauen. Dies ist anhand der hydraulischen Modellierung jedoch nicht nachzuvollziehen. Sie zeigt im Gegenteil Möglichkeiten eines Zustromes von Grundwasser in das Bilanzgebiet aus Süd bis Südost und von Nordwest.

Eindeutig scheint die Situation im **Bilanzgebiet Koberbach**. Hier steht einer Grundwasserneubildung nach GEOFEM von 66 mm (GEOFEM 2000), 104 mm (2003) bzw. 78 mm (2004) ein deutlich geringerer Basisabfluss von 12,8 mm gegenüber (Tabelle 30). Ein solcher Unterschied in diesem relativ kleinen Einzugsgebiet (10,4 km²) weist auf einen beträchtlichen scheinbaren Grundwasseraustrag aus dem zugrunde gelegten Bilanzgebiet, also auf eine Einschränkung des unterirdischen gegenüber dem oberirdischen Einzugsgebiet hin. Dieser Austrag erfolgt entweder oberflächennah in Richtung SE zum Vorfluter Pleiße und ist dann sicher an die hydraulisch wirksame Koberbachtal-Störung sowie die südlich gelegene

Störung bei Niederalbertsdorf gebunden. Möglich ist aber auch ein Abstrom in größerer Tiefe entlang genannter Störung über die Pleiße hinaus nach SE in das Bilanzgebiet Zwickauer Mulde. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung bestätigt. Auch HGN (1996b) zieht eine solche Möglichkeit im Zusammenhang mit Wasserhaushaltsbetrachtungen für das Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde in Erwägung. Letztlich ist auch ein Abstrom nach NW in Richtung Gera, z.B. entlang der Störung bei Niederalbertsdorf nicht ausgeschlossen (Abschnitt 4.3.3).

Im **Bilanzgebiet Chemnitz i.e.S.** steht ein sehr geringer Basisabfluss (9,5 mm) einer berechneten Grundwasserneubildung von 111 mm (GEOFEM 2003) bzw. 64 mm (GEOFEM 2004) gegenüber.

Zu dieser sehr großen Differenz tragen verschiedene Faktoren bei, die im Folgenden kurz diskutiert werden.

Zunächst unterliegt die nach GEOFEM berechnete Grundwasserneubildung aufgrund des differenzierten, nicht vollständig erfassten Versiegelungsgrades im Stadtgebiet Chemnitz für Teile des Bilanzgebietes möglicherweise zu hoch. Diese Aussage wird durch Untersuchungen von KRÄMER (2000) gestützt, die für Siedlungsgebiete am östlichen Stadtrand von Chemnitz eine Grundwasserneubildung von 47-63 mm, für dünn besiedelte Bereiche im Raum Zeisigwald 79-111 mm angibt. Auch muss der kurze Beobachtungszeitraum für die Pegel Altchemnitz1 und Jahnsdorf berücksichtigt werden (Tabelle 27).

Wesentliche anthropogene Wasserentnahmen aus dem GWL (z.B. Quelfassungen und Brunnen) und der Chemnitz, die nicht rückgeführt werden sind im Bereich des Bilanzgebietes nicht bekannt. Im Gegenteil, ZWEIG (2006c) nennt 41 Einleitungen von Betrieben und kommunalen Kläranlagen, die, zumindest teilweise, eher zu einer Erhöhung des gemessenen Basisabflusses beitragen. Gleichmaßen würden sich Verluste aus Leitungen der kommunalen Wasserversorgung auswirken, zu denen jedoch keine spezifischen Angaben vorliegen.

Weiterhin ist nach Pegel- und Grundwasserstandsdaten in LFUG (2003) im Bereich der Chemnitzauze zumindest teilweise von influenten Verhältnissen, d.h. einer Versinkung von Flusswasser und Infiltration in den GWL auszugehen, welches dann erst ausserhalb der oberirdischen Bilanzgebietsgrenzen in den Vorfluter zurückfließen könnte (siehe unten).

Geht man deshalb von der Annahme aus, dass die genannten anthropogenen Einflussfaktoren die enorme Diskrepanz (Tabelle 30) zwischen dem Basisabfluss und der berechneten Grundwasserneubildung nicht vollständig ausgleichen können, bieten sich auch natürliche Einflussfaktoren an. So könnte auch hier eine Einschränkung des tatsächlichen unterirdischen Einzugsgebietes durch Grundwasserabfluss auf hydraulisch wirksamen Störungs- oder Kluftzonen eine Rolle spielen.

Der großräumige oberflächennahe Grundwasserfluss ist sowohl an der Süd- als auch an der Nordgrenze des Bilanzgebietes in Richtung Senkenzentrum gerichtet und entlastet dort in den um S-N verlaufenden Vorfluter Chemnitz. Relevante anders orientierte Fließrichtungen – aus dem Bilanzgebiet hinaus – wären hier nur in tieferen Grundwasserstockwerken möglich. Die Chemnitz selbst weist im Stadtgebiet auch influente Fließverhältnisse auf (siehe oben). Sie steht nach LFUG (2003) in gutem hydraulischen Kontakt sowohl mit dem oberflächennahen quartären als auch dem tieferen rotliegenden GWL. Möglich ist hier also eine Versinkung von Fluss- und oberflächennahem Grundwasser auf tektonischen Strukturen und ein Grundwasserabstrom nach NW entlang der als hydraulisch aktiv bekannten Störungszone

im Chemnitztal. Weiterhin kämen auch Störungen bzw. Kluftzonen im nordwestlichen Teil des Bilanzgebietes in Frage, die aus dem Bereich der Lungwitztalzone auf der Höhe der Ortslagen Wüstenbrand und Gröna nach NW in das nördlich angrenzende Gebirge verlaufen (Abschnitte 4.3.2 und 4.2.4). Dies könnte zu dem genannten sehr niedrigen Basisabfluss beitragen. Berechnungen mit dem großräumigen hydraulischen Modell können diese Annahme weder unterstützen noch ausschließen.

Für das am westlichsten gelegene **Bilanzgebiet Zschopau** wurde nach GEOFEM (2000) eine Grundwasserneubildung von 67 mm (Anteil langsame Komponente 24 mm) berechnet. Der Anteil des Rotliegenden an der Gesamtfläche des Bilanzgebietes beträgt rund 80%. Die übrigen 20% umfassen im wesentlichen kristalline Gesteine des Erzgebirges. Der Basisabfluss konnte aufgrund fehlender bzw. nicht geeigneter Pegeldaten nicht ermittelt werden.

4.5 Grundwasserbeschaffenheit und Typisierung

Die Untersuchungen zur Grundwasserbeschaffenheit als Bestandteil der hydrogeologischen Analyse in der Vorerzgebirgssenke konzentrieren sich auf die zusammenfassende Charakterisierung und Typisierung der zwischen Chemnitz und Werdau auftretenden Grundwässer. Dazu wurden neben Messstellen des staatlichen Grundmessnetzes Beschaffenheit (LfUG 2002) auch jene aus Sondermessnetzen (z.B. Sondermessnetz Zwickau-Oelsnitz) sowie Messstellen Dritter (z.B. aus Grundwassernutzungen und Sanierungsmaßnahmen) einbezogen. Tabelle 31 gibt eine Übersicht über die im Bereich der Vorerzgebirgssenke vorliegenden Grundwasserbeschaffenheitsdaten.

Tabelle 31 Aufschlüsse Grundwasserbeschaffenheit im Bereich der Vorerzgebirgssenke

Messnetz/Quelle	Anzahl Messpunkte Beschaffenheit ¹⁾	davon im Festgestein ¹⁾
Grundmessnetz Beschaffenheit	6 (8)	5 (7)
Sondermessnetze ²⁾	ca. 40 ³⁾	mind. 3
Grundwassernutzungen	?	?
Bauvorhaben, Sanierungen	?	?
aus wiss. Untersuchungen	?	< 5

¹⁾ Quellen: LFUG (2002b), LFUG (2006), SCHUBERT (2006); Angaben in Klammern: geplante Messstellenanzahl ²⁾ insbes. Sondermessnetz Landwirtschaft und 3 Monitoringnetze in den bergbaubeeinflussten Gebieten Zwickau und Oelsnitz: a) landesamtliches Sondermessnetz – es soll nach SCHUBERT (2006) in ein Hochwassermeldemessnetz überführt werden, b) Monitoringnetz der Unteren Wasserbehörde Zwickau, c) Monitoringnetz der bundeseigenen Gesellschaft zur Verwahrung und Verwertung von ehemaligen Bergbaubetrieben (GVV) in Schedewitz und Bockwa ³⁾ davon nach LFUG (2006) zur Zeit 15 Messstellen des landesamtlichen Sondermessnetz Zwickau-Oelsnitz (12 Quartär- und 3 Rotliegendgrundwassermessstellen)

Die permokarbonen, insbesondere die rotliegenden Schichtenfolgen stellen im Bereich der Vorerzgebirgssenke insgesamt die wichtigsten nutzbaren Grundwasserreservoirs dar. Durch die im Vergleich zu den quartären Grundwässern größere Geschütztheit sind die rotliegenden Grundwässer insbesondere als Brauch- und Mineralwässer von besonderem Interesse.

Die oberflächennahen quartären Grundwasservorkommen sind auf die Talgrundwasserleiter der größeren Fließgewässer, insbesondere der Zwickauer Mulde, Pleiße, Chemnitz und

Zschopau, beschränkt. Häufig ist die Qualität der quartären Grundwässer aufgrund anthropogener Einflüsse wie Bergbau (z.B. Zwickau) und Altlasten problematisch. Tertiäre Grundwasserleiter sind als reliktsche Vorkommen nur im Bereich weniger Hochflächen relevant.

Die Grundwässer des Quartär und der Auflockerungszone (Typ 1 in Abschnitt 4.5.2) weisen, insbesondere im weiteren Bereich der Ortschaften Zwickau und Chemnitz in vielen Fällen Kontaminationen durch Abwässer und Deponiesickerwässer auf. Dies gilt gleichermaßen für Einflüsse aus landwirtschaftlicher Nutzung (z.B. Eintrag von Nitrat). Für den Bereich Zwickau ist weiterhin eine, aufgrund des Parameterspektrums nicht eindeutig vom Abwassereinfluss abgrenzbare, Beeinflussung auch der tieferen Rotliegend-Grundwasserleiter (Typ 2 in Abschnitt 4.5.2) durch industrielle Altstandorte gegeben.

Für die Beurteilung der Beschaffenheit der Grundwässer im Bereich des Festgesteins der Vorerzgebirgssenke stehen nur wenige zuverlässige Messstellen zur Verfügung. So sind für das Grundmessnetz Beschaffenheit 2001 gerade einmal 6 Messstellen (geplant 8) ausgewiesen (LFUG 2002b, Tabelle 31). Darüber hinaus liefern Grundwasseranalysen aus, z.T. temporären, Messstellen und Brunnen dynamischer Sondermessnetze, aus Grundwassernutzungen, Bauvorhaben, Sanierungen oder wissenschaftlichen Untersuchungen ergänzende Informationen (Tabelle 31). Probleme stellen hier mitunter die sehr unterschiedlichen Randbedingungen der Probennahmen sowie die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (häufig nur einmalige Probenahmen) dar.

Aus diesen Daten wird die Beschaffenheit typischer rotliegender Grundwässer im Bereich der Vorerzgebirgssenke abgeleitet. Sie bildet die Grundlage für die Unterscheidung von Grundwasserfaziestypen (Abschnitt 4.5.2).

4.5.1 Rotliegendgrundwässer in der Vorerzgebirgssenke

In Bezug auf ihre hydrodynamische und wasserwirtschaftliche Bedeutung kommt den oberflächennahen Rotliegendgrundwässern bis rund 100 m Teufe die weitaus größte Bedeutung zu. Tabelle 32 zeigt Wertebereiche wichtiger Parameter und Lösungsinhalte typischer, anthropogen unbeeinflusster, Rotliegend-Grundwässer (sogenanntes „normales Rotliegendgrundwasser“) in der Vorerzgebirgssenke ohne Berücksichtigung höher mineralisierter sogenannter „Tiefenwässer“ (siehe unten). Die Lösungsgehalte in Grundwässern des die Vorerzgebirgssenke umgebenden bzw. unterlagernden kristallinen Grundgebirges sind i.d.R. geringer.

Tabelle 32 Ermittelte bzw. erwartete Parameter anthropogen unbeeinflusster Rotliegend-Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke

Parameter	Beschreibung	Literatur ^{*)}
Temperatur	entspricht bis ca. 50 m der Jahresdurchschnittstemperatur von 7,5 bis 10 °C; dann Anstieg entsprechend des geothermischen Gradienten von 3-3,5°/100 m	DWD (2006)
pH-Wert	6,4 bis 8,0; schwach basisch (karbonatisches Bindemittel) bis schwach sauer (kiesiges Bindemittel); in der VES häufig 7-8	Hannapel (1996), HGN (1997)

Parameter	Beschreibung	Literatur ^{*)}
Sauerstoff	Konzentrationen von 4-12 mg/l im oberflächennahen Bereich mit der Teufe abnehmend	
Elektr. Leitfähigk.	meist zwischen 100 und 500 µS/cm	C&E (1997)
Gesamthärte	8 – 12 °dH (mittelhart)	JORDAN et al. (1995)
Karbonathärte	6 – 8 °dH (mittelhart)	JORDAN et al. (1995)
Redoxpotential	oxidierend; nach der Teufe abnehmend bis leicht reduzierend	
Fe	i.d.R. nur in Spuren als gering lösliches Fe ³⁺ ; höhere Gehalte als Fe ²⁺ in reduzierendem Milieu	
Mn	i.d.R. ≤ 0,3 mg/L	
Hydrogenkarbonat	meist 100 – 250 mg/L	Matthes (1994)
Chorid	meist unter 50 mg/L	Hannapel (1996)
Sulfat	50 – 150 mg/L	Matthes (1994)
Ca / Mg	≤ 90 mg/L / ≤ 26 mg/L	HGN (1997)
Na / K	≤ 60 mg/L / ≤ 7 mg/L	Hannapel (1996)
Nitrat/Ammonium	< 3 mg/L / < 1,5 mg/L	Hannapel (1996)
DOC	< 2 mg/L	Hannapel (1996)
As	1 - 80 µg/L (Median 6 µg/L, Mittelwert 16,8 µg/L); höher als in vgl. Grundwässern in Deutschland, insb. im Gebiet Mülsengrund	BEAK (1997)
Schwermetalle	geringe Datenbasis; allg. geogen erhöhte Werte zu erwarten	BEAK (1997)
Ba	< 0,2 mg/L	SMU (1995)
Li	i.d.R. gering, < 0,5 mg/L	

^{*)} eigene Auswertungen (vgl. auch GÖTTELMANN et al. 1998) und wie angegeben

Höher mineralisierte Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke; Tiefenwässer

Der Chemismus von im Rotliegenden der Vorerzgebirgssenke aufgeschlossenen Grundwässern schwankt in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren beträchtlich. Zu diesen Faktoren gehören:

- anthropogene Einflüsse (z.B. durch Landwirtschaft und Altbergbau)
- der Chemismus und Lösungseigenschaften des umgebenden Gesteins (z.B. Salze)
- dabei speziell Lösungseigenschaften von Gesteins-Bindemitteln (z.B. karbonatisch, silikatisch)
- Mittlere Verweilzeiten des Grundwassers im Untergrund und damit die Dauer des Kontaktes mit dem Nebengestein
- Teufe des Grundwasservorkommens (Temperaturfaktor, Sauerstoffgehalt, Redoxpotential)
- Mischungsprozesse mit anderen Grundwässern / Zuströme von Grundwässern anderen Chemismuses

Tiefe Grundwässer weisen gegenüber oberflächennahen „normalen“ Rotliegendgrundwässern (vgl. Tabelle 32) und den Grundwässern des umgebenden Grundgebirges oft deutlich erhöhte Salzgehalte auf. Dies ist einerseits zurückzuführen auf die Lösung von Salzgesteinen bzw. leicht löslichen Gesteinskomponenten. Andererseits führen die sehr geringen Fließgeschwindigkeiten oder stagnierende Verhältnisse in größeren Teufen zu sehr langen Verweilzeiten, die hohe Lösungsgehalte auch bei gering löslichem Nebengestein ermöglichen können.

Diese tiefen Grundwässer sind am Grundwasserfluss als Teilkomponente des hydrologischen

Kreislaufes (Grundwasserneubildung – Grundwasserfluss – Entlastung in die Vorfluter) zu-
meist kaum beteiligt. Eine Vermischung mit gering mineralisierten oberflächennahen
Grundwässern bzw. eine Infiltration aus höheren Schichten und eine Entlastung in Vorfluter
ist der Ausnahmefall. Dennoch kommt es entlang tektonischer Strukturen und in Bereichen
tiefer anthropogener Eingriffe, so z.B. im Bereich des ehemaligen Steinkohlenbergbaus in
Zwickau und Lugau-Oelsnitz, zu Wechselwirkungen zwischen den gering mineralisierten
oberflächennahen Grundwässern und den höher mineralisierten Tiefenwässern.

Dementsprechend schwierig ist eine Abschätzung des Anteils tiefer, mehr oder minder in re-
gionale Grundwasserfließsysteme eingebundener Grundwässer am Grundwasser-
Gesamtumsatz als Teil des hydrologischen Kreislaufes. Die Berechnungen mit dem numeri-
schen Grundwassermodell sollen dazu Anhaltspunkte und grobe Abschätzungen liefern (Ab-
schnitt 4.9).

Wichtige Indikatoren für den Einfluss von Tiefenwässern sind u.a.:

- hohe Chlorid-Konzentrationen, insbesondere im Vergleich zu Sulfat (Chlorid > Sulfat)
- hohe Na-Konzentrationen (Größenordnung: > 100 mg/L)
- erhöhte Ba-Konzentrationen (Größenordnung: > 0,3 mg/L)
- erhöhte Li-Konzentrationen (Größenordnung: > 0,5 mg/L)

4.5.2 Grundwasserfaziestypen

Ziel der **Typisierung** war eine geeignete Zusammenfassung der Grundwässer nach Beschaf-
fenheit und Genese/Vorkommen zur Einordnung in die großräumigen hydrodynamischen
Prozesse in der Vorerzgebirgssenke (Abschnitt 4.2.2). Die Typisierung bildet einen Bestand-
teil des konzeptionellen Modells der Vorerzgebirgssenke (Abschnitt 4.7).

Es wurden drei hydrochemisch und genetisch unterschiedliche Grundwasser-Faziestypen
(Tabelle 33) sowie verschiedene Mischtypen unterschieden die sich zusammenfassend wie
folgt charakterisieren.

Oberflächennahe Grundwässer (Typ 1) mit geringer bis mittlerer Mineralisation. Der
Grundwasserfluss ist i.d.R. zum nächstgelegenen Vorfluter gerichtet (lokales Grundwasser-
fließsystem, Abschnitt 4.2.2). Hierzu gehören i.d.R. die Grundwässer in den Quartärgrund-
wasserleitern der Flußauen und Grundwässer der oberflächennahen Auflockerungszone. Typ
1 Grundwässer sind aufgrund der Ergiebigkeit ihrer Grundwasserleiter für die Brauch- und
Trinkwassernutzung von großer Bedeutung. Sie sind gleichermaßen, in Abhängigkeit von
der Schutzfunktion ihrer Grundwasserleiter, vielfältigen anthropogenen Einflüssen ausge-
setzt. Dies zeigt sich durch das Auftreten anthropogener Schadstoffe wie Nitrat und
Schwermetallspuren (Tabelle 33).

Tiefere ungestörte Grund- bzw. Mineralwässer (Typ 2) mit sehr geringer bis mittlerer
Mineralisation und z.T. erhöhten Chloridgehalten. Sie sind häufig an Störun-
gen/Störungszonen oder Kluftzonen gebunden. Typ 2 Grundwässer sind zumeist in interme-
diäre Grundwasserfließsysteme eingebunden und können auch in weiter entfernte Vorfluter

höherer Ordnung entlasten (Abschnitt 4.2.2). Anthropogene Einflüsse sind i.d.R. nicht nachweisbar. Ausnahmen bilden massiv anthropogen beeinflusste Gebiete wie die Bereiche des Steinkohlenbergbaus im Raum Zwickau.

Zu den Typ 2 Grundwässern gehören viele Rotliegendgrundwässer. Sie sind z.B. in den (Tief)brunnen im Lungwitztal, im Mülsengrund, bei Lichtenstein und in Crotenlaid-/Meerane aufgeschlossen. Sie konnten aber auch oberflächennah, z.B. entlang von Störungszonen wie der Oberhohndorfer Hauptverwerfung, nachgewiesen werden. Dazu gehören z.B. Wässer in der Zwickau-Schedewitz (GUB 2001, HGC 2002, LFUG 2006), die teilweise Mineralisationen in der Größenordnung der Typ 3 Grundwässer (siehe unten) aufwiesen. Wie auch die Grundwässer des Typ 3 (siehe unten) können Typ 2 Grundwässer hohe mittlere Verweilzeiten („Grundwasseralter“) aufweisen. Dies konnte für Rotliegendgrundwässer in der Baugrube am Kornmarkt in Zwickau, entlang der vermuteten Kornmarktstörung, nachgewiesen werden (Abschnitt 4.2.4.1 und Tabelle 34).

Höher mineralisierte (chloridische) Tiefenwässer (Typ 3) mit deutlich erhöhter Mineralisation und hohen Chloridgehalten. Im folgenden werden Grundwässer mit einer Gesamtkonzentration des Lösungsinhaltes von mehr als 2 g/l als höher mineralisierte Typ 3 Grundwässer bezeichnet. Dabei handelt es sich gemäß der Definition nach DAVIS & DE WIEST (1966) um Brackwässer, Salzwässer und Solen (vgl. Definition Abschnitt 2.1). Diese Wässer weisen z.T. große Differenzen in ihren Salzkonzentrationen auf. Dies zeigen z.B. Vergleiche der Wässer aus dem Tiefbrunnen Hy Se 109 in St. Egidien mit den Zwickau-Oelsnitzer Salzwässern und Solen.

Typ 3 Grundwässer treten zumeist in größeren Tiefen auf und verbleiben dort i.d.R. aufgrund ihrer höheren Dichte auch. Entlang von Störungsbereichen können sie lokal aber auch in geringeren Tiefen auftreten, z.B. in St. Egidien nahe der Rödlitzer Hauptverwerfung oder entlang von Störungen in Zwickau Schedewitz (GUB 2001). Typ 3 Grundwässer sind im Vergleich zu den Typen 1 und 2 aufgrund der geringen Durchlässigkeiten in größeren Tiefen jedoch meist sehr immobil und weisen lange Verweilzeiten auf. Die daraus resultierenden langen Kontaktzeiten mit dem umgebenden Gestein können eine Ursache ihrer meist hohen Salzgehalte darstellen. Typ 3 Grundwässer sind – soweit am Fließgeschehen überhaupt beteiligt – zumeist in regionale Grundwasserfließsysteme eingebunden (Abschnitt 4.2.2). Sie entlasten im Bereich der Vorerzgebirgssenke, wenn nicht anthropogen aufgeschlossen, quasi nur über eine Mischung mit Grundwassertyp 2 in den Kontaktbereichen, so z.B. entlang mancher Störungsbereiche (Abschnitt 4.6). Dies kann zu den genannten erhöhten Chloridkonzentrationen bei Typ 2 führen.

Die Herkunft und Hydrodynamik der höher mineralisierten chloridischen Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke wird kontrovers diskutiert (Abschnitte 4.6.3 und 4.6).

Diese Dreiteilung entspricht in einigen Punkten der von HÖLTING et al. (2005), der Grundwässer in Umsatzwässer (vgl. Typ 1), Vorratswässer (Typ 2) und Tiefenwässer oder tiefe Grundwässer (Typ 3) unterscheidet. Eine ähnliche Einteilung verwendet auch VEB HYDRO (1980) für den Bereich der nordwestlichen Vorerzgebirgssenke und die Zeitz-Schmöllner Mulde.

Tabelle 33 Grundwasserfaziestypen in der Vorerzgebirgssenke - Leitparameter ^{*)}

Parameter [mg/L] oder wie angegeb.	Grundwasser-Faziestypen			allgemeine Tendenzen
	Typ 1	Typ 2	Typ 3 ⁸⁾	
Mineralisation	gering bis mittel ¹⁾ (<1.000)	sehr gering bis mittel (<1.000, Mittelwert um 300, C&E 1997)	erhöht bis deutlich erhöht (2.000- >90.000)	mit Tiefe zunehm.
Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	gering bis mittel ¹⁾ (600-1500)	unter 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$	deutlich erhöht	mit Tiefe zunehm.
Cl	unter 50 (HANNAPEL 1996) ¹⁾	gering bis mittel (meist deutlich <100)	deutlich erhöht (>1.000)	mit Tiefe zunehm.
SO₄²⁻	gering bis mittel ¹⁾ , 50-300 (MATTHES 1994)	gering bis sehr gering	erhöht (90->2.000)	mit Tiefe abnehm., Ausnahme: Grundw. d. Sulfat-Typs, Grubenwäss.)
HCO₃⁻	meist Hauptanion, oft 100-250 (MATTHES 1994)	meist Hauptanion, oft 100-250 (MATTHES 1994)	200-500	mit Tiefe abnehm. (Ausnahme: Typ 3, zunehm.)
NO₂⁻	sehr gering ^{1) 7)}	keine	keine	
NO₃⁻	oft erhöht ^{1) 3)}	sehr gering (<5)	gering	mit Tiefe abnehm.
Ortho PO₄³⁻	gering ^{1) 3)}	gering	gering	
Na⁺	gering, bis max. 60 (HANNAPEL 1996) ¹⁾	gering bis leicht erhöht (meist <100)	deutlich erhöht (400- >2.500)	mit Tiefe zunehm.
Ca⁺⁺	8-90 (HÖLTING 1996)	8-90 (HÖLTING 1996)	erhöht (200- >2000)	mit Tiefe abnehm.
Mg⁺⁺	4-40 ¹⁾	4-40	erhöht (>80)	mit Tiefe abnehm., aber Mg/Ca steigt
Fe_{ges}	gering ^{1) 7)}	gering ⁷⁾	gering bis erhöht ⁷⁾	
Mn⁺⁺	meist <0,3 ^{1) 7)}	meist <0,3	gering bis erhöht ⁷⁾	
K⁺	meist gering ¹⁾ (<7, HANNAPEL 1996)	gering (<7, HANNAPEL 1996)	erhöht (25-80)	
NH₄⁺	meist gering ^{1) 7)}	meist sehr gering ⁷⁾	gering bis erhöht ⁷⁾	
Li, (Sr, Ba, Br, I, Rb)	Spuren (Ba <0,0002)	meist gering	z.T. deutl. erhöht (Li $\leq$ 2,3, Br 25)	mit Tiefe zunehm.
Org. Schadstoffe/Schwermetalle	häufig vorhanden / meist erhöht ^{1) 2) 6) 7)}	meist keine ²⁾ /gering ²⁾ ^{6) 7)}	meist keine / gering ^{6) 7)}	kein Tiefeneffekt für Al, As, Cd, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Vd
O₂/Redoxp.	6-12 ⁵⁾ / mittel ^{5) 7)}	mittel bis gering ⁷⁾	meist gering ⁷⁾	mit Tiefe abnehm.
Temp. [°C]	8-12 ⁴⁾	8-12 ⁴⁾	meist erhöht ⁴⁾	mit Tiefe zunehm.
GH (°dH)	meist >8	8-12 (JORDAN u.a. 1995)	stark erhöht (50-2.500)	mit Tiefe zunehm.
KH (°dH)	meist >6	6-8 (JORDAN u.a. 1995)		
pH-Wert	um 7 ⁵⁾	meist neutral bis basisch (6,4-8,0) (HANNAPEL 1996, HGN 1997)	leicht sauer bis basisch; bei Grubenwassereinfluß sauer	

^{*)} Richtwerte und Unterscheidungskriterien; eigene Auswertungen (vgl. auch GÖTTELMANN et al. 1998) und wie angegeben; die Bezeichnungen „gering“, „mittel“ und „erhöht“ verstehen sich in Bezug auf ein „durchschnittliches Rotliegend-Grundwasser“ (vgl. Tabelle 32)

¹⁾ bei massiven anthropogenen Einflüssen z.T. noch deutlich höher (vgl. u.a. HGN 1997) ²⁾ an industriellen Standorten (z.B. Zwickau) häufig vorhanden (vgl. u.a. HGN 1997) ³⁾ erhöht vor allem in Regionen intensiver landwirtschaftlicher Bewirtschaftung (VEB HYDRO 1972-82, ENMOTEC 1992, Hannapel 1996) ⁴⁾ unter 100m Teufe entsprechend der geothermischen Tiefenstufe (Gesteinstemperatur) ⁵⁾ wenn anthropogen unbeeinflusst, sonst meist im sauren Bereich ⁶⁾ im Rotliegenden der VES allg. leicht erhöhte Schwermetallgehalte, insbesondere aber Arsen (1-80 $\mu\text{g}/\text{l}$, besonders hohe As-Gehalte in Grundwasser des Mülsengrunds (BEAK 1997)) ⁷⁾ bei Kontakt des Grundwassers mit Gesteinen mit hohem Anteil an orga-

nischer Substanz bzw. bei anthropogenem Eintrag organischer Substanzen = reduzierende Bedingungen und geringer Sauerstoffgehalt = erhöhte Gehalte an (Schwer)metallen, Fe, As, Ammonium, H₂S und, wenn Nitrat verfügbar, Nitrit ⁸⁾ Orientierungswerte, z.T. aus Analysen von Zuflüssen zu den Zwickauer Gruben (BSA 1981 u.a.) – die Gehalte der ursprünglichen hochmineralisierten Einzelzuflüsse können noch darüber liegen

Die drei Grundwassertypen unterscheiden sich also sowohl in ihrem (hydrochemischen u.a.) Charakter als auch in ihrem Auftreten im Untergrund voneinander. So sind von Grundwassertyp 1 nach Grundwassertyp 3 folgende, sich zum Teil bedingende, Tendenzen erkennbar:

- Zunahme der Teufe ihres Auftretens
- Zunahme Mineralisation (Salinität) der Wässer
(Ausnahme: anthrop. belastete Typ 1-Wässer können ebenfalls höher mineralisiert sein)
- Zunahme Dichte
- Abnahme der Durchlässigkeiten des Grundwasserleiters
- Abnahme Fließgeschwindigkeiten
- Zunahme „Alter“ (Verweildauer der Wässer im Untergrund) und damit der Kontaktzeit mit dem umgebenden Gestein

Auf Grund ihres höheren spezifischen Gewichtes neigen Wässer höherer Dichte im Vergleich zu „leichteren“ gering mineralisierten Wässern, zum Absinken bzw. zur Verharrung in tieferen Bereichen. Aufgrund der mit der Teufe generell abnehmenden Durchlässigkeiten verringert sich mit zunehmender Teufe auch die Mobilität der Wässer, die Fließgeschwindigkeiten sinken. Folgerichtig nimmt die mittlere Verweildauer des Grundwassers im Untergrund zu. Dies wiederum kann zu verstärkter Lösung von Gesteinskomponente führen, was einmal mehr die Dichte des Grundwassers erhöht. Dieses sich wiederholende Szenario könnte eine Ursache für die allgemeine Zunahme der Mineralisation von Grundwässern mit der Teufe sein. Quasi-Stagnationszonen als Orte der Anreicherung von Lösungsinhalten konnten im Rahmen der großräumigen hydraulischen Modellierung simuliert werden. Weitere Möglichkeiten, wie die allochtone Genese der Wässer, werden diskutiert (vgl. Abschnitt 4.6).

Allerdings treffen die aus obigem Szenario abgeleiteten Annahmen zur Einordnung der Grundwässer nicht immer zu. So treten hoch mineralisierte Wässer (Typ 3) zuweilen auch in geringen Teufen auf. So z.B. in verschiedenen Brunnen in St. Egidien, insbesondere in Brunnen 109/84 wo schon in 40 m Teufe Chloridgehalte von 6840 mg/L auftraten (BEIER et al. 1986). In Zwickau konnten höher mineralisierte Wässer in Teufen von deutlich weniger als 100 m nachgewiesen werden (GUB 2001, HGC 2002).

Darüber hinaus gibt es auch in geringen Teufen anthropogen unbeeinflusste Wässer mit hohen mittleren Verweilzeiten (hohem „Alter“) und geringer Mineralisation (Typ 2). Dies gilt z.B. für Grundwässer die vom Autor in nur 15m Teufe im Bereich des Zwickauer Kornmarktes in Zwickau beprobt wurden (vgl. Tabelle 34 und Abschnitt 4.2.4.1).

In beiden genannten Fällen waren diese Wässer an Störungszonen gebunden. Brunnen 109/84 liegt im Bereich der Rödlitzer Hauptverwerfung ein „Aufsteigen“ der Wässer in diesem Bereich ermöglichen würde. Die Grundwässer des Kornmarktes wurden entlang von Klüften nahe der Oberhohndorfer Hauptverwerfung aufgeschlossen. Dies unterstreicht die Bedeutung tektonischer Strukturen für die Dynamik hoch mineralisierter bzw. alter Grundwässer im allgemeinen und für lokale Störungen des „normalen“ hydraulischen Regimes im besonderen.

Eine besonderen „Grundwasserkörper“ stellen die Grubenbaue des ehemaligen Steinkohlen-

bergbaus dar. Auch hier kommt es durch die Schaffung künstlicher hydraulischer Verbindungen zur Beeinflussung oberer Grundwässer/ Grundwasserleiter durch tiefere höher mineralisierte Wässer, wie z.B. im Bereich der Bockwaer Senke in Zwickau nachgewiesen.

Dennoch kann die Verbreitung der Grundwasser-Faziestypen 1 bis 3 generell als teufenabhängig bezeichnet werden. Dabei kann die Dominanz einzelner Grundwasser-Faziestypen in Abhängigkeit von der Teufe kann wie folgt grob abgeschätzt werden:

- Typ 1 (Oberflächennahe Grundwässer): ca. 0-20 m
- Typ 2 (Tiefere Grund- bzw. Mineralwässer): ca. 20- >300 m
- Typ 3 (Höher mineralisierte (chloridische) tiefe Grundwasser / Übergangstypen): deutlich tiefer 300 m; Ausnahmen

Tabelle 34 Lösungsgehalte verschiedener (Grund)wasser-Faziestypen, Beispiele

Parameter [mg/L]	Grundwasserfaziestypen											Misch- wasser	Ober- flächen- wasser	
	Typ 1			Typ 2		Typ 3 Permokarbone (Grund-)wässer, Tiefenwassereinfluss								
Lage, Teufe [m]	A	B	C	Zwi- ckau ³	Zwi- ckau 15 ⁴⁾	Mee- rane ¹¹⁾	St.Egid- ien, 30- 145 ⁵⁾	Zwickau		Oelsnitz 346-634 ¹²⁾		Gruben- wasser, 600 ⁶⁾	Gruben- wasser ⁷⁾	Zwick- Mulde ⁸⁾
	69-78 ⁹⁾	14-22 ¹³⁾	A					B						
LF mS/cm			1,01					14,5	2,19- 2,44	8,14- 4,01	18,33- 30,2			
K ⁺	110	9	4,9	2,6	15,6	112,7		26,1	6,8	17-20	68	73	39,4	4,7
Na ⁺	37	26	42,3	10	71			2460	30	1600-920	3500	2300	2067	27
Ca ⁺⁺	83	107	126	78	13,9	165,6	235	851	300	130-48	820	1880	2058	8,8
Mg ⁺⁺	31	36	21,3	36	26	64,5	97,2	164	89	36-16	940	574	558	13
Li ⁺		0,045	0,033	0,041	0,12			3,46	0,035			2,3		
Sr/Ba ⁺			/0,13					/7,24	7,6/2,2	/0,18-0,43	/0,67			
Mn ⁺⁺			1,8			0,21	0,45	0,43	0,86	330-110	6,8			
Cl ⁻	59	41	208	39	98	92,3	1372	5701	710	2800-1400	8900	6770	6493	30
SO ₄ ²⁻	243	301	53,4	59	59	507	92,5	7	18	200-110	1100	1080	943	97
HCO ₃	189	211	195	274,55	163 ^{**)}	333	146	45,8	190	100-120	350	415	342	49
NO ₃ ⁻	162	1	<1	33			42,5	<1	<0,2	0,2-21	0,22			20
Br ⁻			3,2		0,8			74,1	8	34-<0,1	120	25		
Fe ^{***}			8,7				0,05	0,21	0,13	8,2-15	260	135	27,4	
pH	6,62		6,9				7,3	7,3	7,1	7,9-8,5	5,8-6,4	6,2		7,12
GH ^{°dH}	18,8		4,02				56	27,9	11,1		59	303		4,2

*) nur Orientierungswert **) berechnet *** gelöst, kursiv=gesamt, fett=beide ¹⁾ A) Brunnen, bei Oberrothenbach, Mls-Folge, Auflockerungszone, Probennahmen 1996 (BfS 1999) ²⁾ B) Quartär, Zwickau-Schedewitz, Probennahme 23.3.98 (vgl. Göttelmann et al. 1998) ³⁾ Tiefbrunnen des städtischen Krankenhauses Zwickau, Lkf-Folge, 16.6.1998 (WW Zwickau) ⁴⁾ Baugrube Tiefgarage am Kornmarkt, Lkf-Folge, Zwickau, P1, 12.6.98 ⁵⁾ St. Egidien, Hy Se 109/84 (MKZG 5241V0045), Mischwasser, 2.7.85, Lkf-Folge, Einzelzulaufe bis >19400 µS/cm (30m Teufe) und 8520 mg/L Cl⁻ (STORCH et al. 1996) ⁶⁾ Grubenwasser, Zwickau, Einzelzufluss, Friedr.-Nikolay-Schacht, Probennahme am 4.12.67 (SCHRÄBER 1968) ⁷⁾ Mischwasser aller Zwickauer Gruben, Hauptwasserhaltung (seit 1961) Friedr.-Nikolay-Schacht, 9.2.67; max. Werte von Einzelzulaufen bis 91235 mg/L Cl⁻ (SCHRÄBER 1968) ⁸⁾ Oberrothenbach, nördlich Zwickau, Probennahmen 1996 (BfS 1999) ⁹⁾ Zwickau-Schedewitz, Malzinsel, 2001, GWM 701, unt. Lkf-Folge, im Bereich OHV (GUB 2001) ¹⁰⁾ Zwickau-Schedewitz, Malzinsel, 2001, Quartär (GUB 2001) ¹¹⁾ Brunnen HyMee103/81, Gera-/Mülsen-Folge, 20.03.1981, Soleneinfluss, SCHRÄBER (1983) ¹²⁾ Tiefbohrung Oelsnitz, Tunnelweg, westl. Hedwig-Schacht, Grund- und Flutungswasser, Planitz-Folge bis Oberkarbon, A Analysen vom 25.3., 19.5. und 2.7.2004, Grundwasser Planitz-Folge bis Oberkarbon ohne Grubenwassereinfluss (Alter 225 bis >550a, Jungwasseranteil 1-11%), B Analyse vom 29.11.2006, LF und pH-Bereiche aus verschied. Messungen, Oberkarbon mit Grubenwassereinfluss (Alter 160 bis 300a, Jungwasseranteil 10-16%), LANCAU 2006, FELIX et al. (2006) ¹³⁾ Zwickau-Schedewitz, Schneeberger Strasse, 11.05.2005, MKZG 52416013, Lkf-Folge, im Bereich OHV (zu HGC 2002), Lithium v. 19.10.2004

Die Rotliegend-Grundwässer und die höher mineralisierten Tiefenwässer sind i.d.R. durch mächtige Schluff- und Tonsteinlagen, insbesondere der Leukersdorf-Folge, getrennt. Eine eindeutige Zuordnung der Grundwassertypen 2 und 3 zu einzelnen hydrogeologischen Einheiten ist dennoch, zumindest für das untere Rotliegende (Leukersdorf- bis Härtensdorf-Folge) problematisch.

Neben den Grundwassertypen 1 bis 3 gibt es zahlreiche Misch- und Übergangstypen, die durch Wechselwirkungen/Mischungen zwischen Grundwässern in den Kontaktbereichen, entlang hydraulisch leitfähiger tektonischer Strukturen oder im Bereich anthropogener Strukturen wie Grubenbaue (siehe unten) entstehen. Tabelle 34 zeigt typische Beispiele der für die einzelnen Grundwasser-Faziestypen und Mischwässer.

Eine Unterscheidung untergeordneter Grundwasser-Faziestypen sowie eine vertikal differenziertere Abgrenzung kleinräumiger Grundwasser-Faziesbereiche ist für den Gesamttraum der Vorerzgebirgssenke aufgrund der geringen Messstellendichte bei starkem Einfluss lokaler Faktoren wie Tektonik, Lithologie und anthropogene Einflüsse nicht sinnvoll.

Grubenwässer

Die in den ehemaligen Steinkohlengruben Zwickau und Lugau-Oelsnitz aufgeschlossenen Wässer, allgemein als **Grubenwässer** bezeichnet. Sie weisen gegenüber den typischen Quartär- und Rotliegendgrundwässern i.d.R. eine deutlich höhere Mineralisation und eine spezifische hydrochemische Charakteristik auf (Tabelle 34, vgl. auch GÖTTELMANN et al. 1998). Neben Oxidationsprozessen im Bereich der Grubenbaue ist dies vor allem auf den Zutritt z.T. sehr hoch mineralisierter Grundwässer (sogenannter „Tiefenwässer“) des Typs 3 (siehe oben) zurückzuführen.

Grubenwässer sind Mischwässer aus Grund- und Oberflächenwasser und weisen deshalb in ihrer chemischen Beschaffenheit ein weites Spektrum auf.

Die räumliche Ausdehnung der sich über alle permokarbonen Einheiten und bis in über 1000m Teufe erstreckenden Grubenbaue führt zur „Erschließung“ aller bisher diskutierten Grundwassertypen 1 bis 3 sowie deren Mischungen in variierenden Anteilen (siehe oben). Darüber hinaus wird die Beschaffenheit der Grubenwässer von zwei weiteren Wassertypen beeinflusst.

- Aufgrund der direkten Anbindung der Grubenbaue an die Tagesoberfläche treten bzw. traten beträchtliche Mengen an **Oberflächenwasser** (Niederschlags- und Flusswasser) in die Grubenbaue ein
- In den durch die tiefreichende und lang anhaltende Grubenwasserhaltung entwässerten Gesteinsbereichen kommt es zur **Oxidation von Mineralen** die dann in den Wässern gelöst werden können. Dies betrifft insbesondere sulfidische Einlagerungen in den karbonen bzw. kohleführenden Horizonten/ Flözbereichen. Der Einfluss dieser Prozesse hält auch lange nach Flutung der Grubenbaue an.

Angaben zur chemischen Zusammensetzung der Grubenwässer und von Zuflüssen in die Grubenbaue liegen in den Unterlagen aus der Zeit des aktiven Bergbaus nur selten und dann zumeist unvollständig vor (BSA 1974, BSA 1981, SCHRÄBER 1968). Sie sind in ihrer Zuordnung zu den entsprechenden geologischen Einheiten in Anlage 3 erfasst.

Die Grubenbaue in Zwickau und Lugau-Oelsnitz stellen einen komplexen Reaktions- und Mischungsraum von Wässern bzw. Grundwässern dar. Die Grubenwässer können dabei sowohl für die Beschaffenheit der umgebenden Rotliegendgrundwässer (Abschnitt 4.5.3) in den beeinflussten Grundwasserstockwerken als auch für die hydraulischen Verhältnisse im Umfeld der Gruben (Abschnitt 4.2.5) von Bedeutung. Dies gilt insbesondere seit Abschluss der Flutung der Zwickauer Gruben Anfang der 90er Jahre und der fortschreitenden Flutung der Oelsnitzer Grubenbaue.

Die in den Grubenbauen beprobten Wässer vor der Flutung (vgl. SCHRÄBER (1968) für Zwickau und GUB (2001) für Oelsnitz) und nach der Flutung (vgl. GÖTTELMANN et al. 1998 für Zwickau und FELIX et al. (2006) für Oelsnitz) bieten wichtige Anhaltspunkte zur Zusammensetzung tiefer höher mineralisierter Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke.

4.5.3 Einfluss höher mineralisierter Grubenwässer auf das Grundwasser

Der Einfluss der im Zusammenhang mit dem Kohlenbergbau erschlossenen tiefen Solen, Salz- und Grubenwässer auf ungestörte Grundwässer im Bereich Zwickau-Oelsnitz kann wie folgt zusammengefasst werden.

- In den im Rotliegenden verfilterten Tiefbrunnen im Bereich der Vorerzgebirgssenke insgesamt konnten, außer in Einzelfällen im unmittelbaren Einflussbereich der Grubenbaue, kein Grubenwassereinfluss auf ungestörte tiefere Grundwässer (Grundwasserfaziestyp 2) nachgewiesen werden. Es treten keine wesentlichen Abweichungen der hydrochemischen Parameter von den Erwartungswerten entsprechend des geologischen Hintergrundes (Tabelle 32) auf.
- Auch eine zeitliche Veränderung im Konzentrationsniveau der Inhaltstoffe dieser Grundwässer, die auf Grubenwassereinflüsse hinweisen könnten, wurden nicht festgestellt.
- Nur im Bereich der Bockwaer Senke im Süden Zwickaus kann ein Grubenwassereinfluss auf die Grundwasserbeschaffenheit des tieferen Rotliegend-Grundwassers im unmittelbaren Grubenbereich festgestellt werden. Hierbei handelt es sich um ein Mischwasser aus den Grundwasserfaziestypen 1 und 2 mit sichtbarem Einfluss durch Typ3. Allerdings ist die teufenmässige Lage der Messstelle (BL1 und 2/86) und Anbindung an Grubenräume unsicher.
- Im Gebiet der in Flutung befindlichen Grubengebäude des ehemaligen Reviers Lugau-Oelsnitz wurden für den Rotliegend-Grundwasserleiter (Typ 2) bisher keine Grubenwassereinflüsse nachgewiesen. Hier können sich jedoch im Verlauf der weiteren Flutung durch die Änderung der hydrostatischen Verhältnisse Veränderungen ergeben (vgl. FELIX et al. 2006).

Eine relevante Tendenz in der Entwicklung von Grundwasserstand und Grundwasserqualität in den quartären oder rotliegenden GWL sowie im Grubengebäude, wie z.B. ein genereller Anstieg des Grundwasserspiegels oder die Verschlechterung der Grundwasserqualität durch einen Grubenwassereinfluss, ist aus dem bisherigen Grundwassermonitoring nicht ableitbar.

Für den Raum Zwickau ist für die Zukunft auch kein wachsender Einfluss solcher höher mi-

neralisierter Wässer tieferer Grundwässer zu erwarten, da hier der Flutungsprozess abgeschlossen ist. Das in der Literatur häufig erwähnte Phänomen des "aufsteigenden hochsalinaren Grubenwassers" als Gefahr für das Grund- und Oberflächenwasser ist also im Raum Zwickau bisher nicht nachweisbar. Für den Raum Oelsnitz sollen weiterführende Untersuchungen u.a. prüfen inwieweit Einflüsse des aufgehenden Grubenwassers auf die Umwelt zu erwarten sind (FELIX et al. 2006).

Die Auswertung von Stands- und Beschaffenheitsdaten der Grundwassermessstellen im Rotliegenden des Oelsnitzer Gebiets lassen bisher weder in bezug auf den Grundwasserstand noch auf die Grundwasserqualität Einflüsse des Flutungsprozesses erkennen. Dies wurde auch durch Untersuchungen von Quellen (C&E 2001) bestätigt. Auch die Ergebnisse der Tiefbohrung Oelsnitz (Felix et al. 2006) lassen eine prinzipielle Entkopplung der permokarbonen Grundwasserleiter von den Grubenbauen erkennen. Die hydrochemischen Analysen Ausnahmen bilden die unmittelbar im Grubenbereich liegenden Messstellen. Ilge et al. (2000) ziehen die Möglichkeit in Betracht, dass die Kontamination von Brunnen im Bereich Hohndorf durch chlororganische Verbindungen aus dem Flutungswasser stammen könnten.

Die Größe des möglichen Einflusses „salinarer Tiefenwässer“ im weiteren Bereich der Zwickauer und Oelsnitzer Grubenbaue auf das Grundwasser höherer rotliegender und quartärer Grundwässer wird durch eine Reihe gegeneinander wirkender begünstigender bzw. begrenzender Faktoren bestimmt.

Den „Tiefenwasser“-Einfluß potentiell begünstigende Faktoren:

- Im Vergleich zum „normalen“ Rotliegendgrundwasser weisen höher mineralisierte tiefe Grundwässer häufig extrem hohe Salzgehalte zwischen 10 und 100g/L auf. Schon relativ geringe Mengen können deshalb für den Lösungsinhalt des beeinflussten Grundwassers relevant sein.
- Der Grundwasserspiegel tiefer Grundwässer liegt meist über jenem der oberen Grundwasserleiter. Es besteht also ein Druckgefälle in Richtung oberflächennahes Grundwasser, was eine Infiltration tiefer Grundwässer begünstigt.
- Durch die meist hohen hydraulischen Leitfähigkeiten in den nur unvollständig verfüllten tiefreichenden Grubenbauen sind nahezu ideale hydraulische Voraussetzungen für einen „Aufstieg“ von tiefen Grundwässern in höhere Grubenbereiche bzw. GWL gegeben.
- Die geothermische Tiefenstufe von ca. 3-3,5°/100 m sorgt für mit der Teufe zunehmende Wassertemperaturen, so z.B. von rund 28 °C in 600 m oder 41 °C in 1000 m Tiefe. Dies bewirkt eine Zunahme des temperaturinduzierten Auftriebs mit zunehmender Teufe (Temperatur-induzierte freie Konvektion).

Den „Tiefenwasser“-Einfluß potentiell begrenzende Faktoren:

- die gegenüber geringer mineralisierten Grundwässern höhere Dichte höher mineralisierter Grundwässer bewirkt eine gewisse gravitative „hydraulische Trägheit“ dieser Wässer. Erfahrungen in anderen hydraulischen Systemen (Abschnitte 4.1 und 4.6.3) zeigen, dass dieser durch hohe Lösungsgehalte erzeugte Dichteeffekt, den entgegengesetzt wirkenden Temperatureffekt (siehe oben) häufig dominiert und so Temperatur-induzierte freie Konvektion verhindert.
- Zutritte höher mineralisierter Grundwässer in den ehemaligen Grubenbauen waren zu-

meist auf punktuelle oder lineare Strukturen (entlang von Störungen und Klüften) begrenzt. Die Schüttungsmengen waren im Vergleich zur Summe zulaufenden Oberflächenwassers und gering mineralisierten Grundwassers niedrig.

- bei zahlreichen hoch mineralisierten Zuflüssen in die Grubenbaue verringerte sich die Schüttungsmenge mit der Zeit. Es könnte sich also teilweise um hydraulisch abgekoppelte isolierte Reservoirs gehandelt haben aus denen heute kaum noch Zuflüsse zu erwarten sind. Darüber hinaus setzt der steigende Flutungsspiegel diesen Austritten in den noch in Flutung befindlichen Grubenbauen einen steigenden hydraulischen Druck entgegen was zu verringerten Schüttungsmengen führen kann.

Das Beispiel Zwickau zeigt bisher, dass hier die genannten den Tiefenwasser-Einfluss begrenzenden Faktoren überwiegen.

4.6 Höher mineralisierte Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke

4.6.1 Problemstellung, Definition, Vorkommen

In der Vorerzgebirgssenke sind im Bereich der Grubenbaue des ehemaligen Steinkohlenreviers Zwickau-Oelsnitz sowie in wenigen weiteren tieferen Aufschlüssen (Bohrungen/Brunnen) höher mineralisierte, meist chloridreiche, Grundwässer erschlossen worden. Die Klärung von Herkunft und hydraulischer Positionierung dieser weithin als „Solen“ bezeichneten Grundwässer sowie ihre Wechselwirkungen mit oberflächennahen Grundwässern ist für die Charakterisierung der Grundwasserfließsysteme im Bereich der Vorerzgebirgssenke von großer Bedeutung.

Forschungsarbeiten zu sedimentären Senkenstrukturen in aller Welt beschäftigen sich mit Phänomen oberflächennaher bzw. „aufsteigender“ hoch mineralisierter Grundwässer. Solche Wässer wurden weiträumig auch in nördlich der Vorerzgebirgssenke gelegenen norddeutschen Senkenstrukturen angetroffen und diskutiert (vgl. Abschnitt 4.1.4.2 und 4.6.3).

Als höher mineralisierte Wässer werden im folgenden werden Grundwässer mit einer Gesamtkonzentration des Lösungsinhaltes von mehr als 2g/L bezeichnet (Definition vgl. Abschnitt 2.1). Dies entspricht den in Abschnitt 4.5.2 diskutierten Typ 3 Grundwässern. Allerdings können Grundwässer auch lediglich Einflüsse durch höher mineralisierter Wässer (Typ 3) aufweisen.

Alle bisherigen Interpretationsansätze in Bezug auf die hydraulischen Verhältnisse in den tiefen regionalen Grundwasserfließsystemen (Abschnitt 4.2.2) und damit auch zur Frage der Herkunft hoch mineralisierter Grundwässer werden in ihrer Aussagekraft durch die unzureichende Datenlage begrenzt. Dazu gehören die Arbeiten von ARNOLD (1900), BLÜHER (1960), PIETZSCH (1962), SCHRÄBER (1968), BSA (1981), BRINSCHWITZ (1992), STORCH et al. (1996), GÖTTELMANN et al. (1998), KATER (1999). Defizite im Kenntnisstand bestehen insbesondere zu folgenden Punkten.

- geringe Anzahl von zumeist auch unvollständigen Analysen
- i.d.R. keine Betrachtung von Isotopen und Spurenelementen
- isolierte Analysen, d.h. keine flächige Betrachtung innerhalb eines Grundwasserstockwerkes bzw. entlang einer grundwasserführenden tektonischen Struktur
- keine Zeitreihen
- keine aussagekräftigen Tracerversuche

Vorkommen

Hoch mineralisierte Grundwässer sind in allen rotliegenden Folgen, verstärkt aber im unteren Rotliegenden, sowie im Karbon der westlichen und zentralen Vorerzgebirgssenke aufgeschlossen (vgl. Abschnitt 4.2.1 und Anlage 3). Insbesondere in den Steinkohlengrubenbauen von Zwickau und Oelsnitz sind zahlreiche „Soleaustritte“, meist zwischen 300 und 1000m Tiefe dokumentiert. Ausserhalb der Grubenbaue sind höher mineralisierte Grundwässer auch störungs- oder kluftgebunden in geringeren Teufen und aufgrund von Zumischung geringer mineralisierter Wässer mit z.T. geringeren Konzentrationen (<2g/L) nachgewiesen. Vorkommen höher mineralisierter Wässer sind für folgende Lokationen belegt (vgl. Abschnitt 4.2, Beispiele in Tabelle 34).

- Zwickauer und Oelsnitzer Grubenbaue (Leukersdorf-Folge und Liegendes, 1 Vorkommen in der Mülsen-/Gera-Folge im nördlichen Zwickauer Revier erwähnt)
- Bohrung Bockwaer Senke, Zwickau: B1/86 (Lkf-Folge, Grubenwassereinfluss)
- Tiefbrunnen im Bereich St. Egidien (Lkf-Folge)
- Tiefbrunnen Crotenlaide/Meerane (Gera-/Mülsen-Folge, Einfluss höher mineralisierter Wässer des Sulfat-Typ)
- Zwickau, Schedewitz: GWM 2/2001, Bereich Schneeberger Strasse, Bereich OHV (HGC 2002)
- Zwickau, Schedewitz: GWM 701, Malzinsel, Bereich OHV, Lkf-Folge (GUB 2001)
- Bohrungen Raum Helmsdorf, WISMUT, Mls-, Lkf-Folge (MÖCKEL 2007)
- Tiefbohrung Oelsnitz, Permokarbon (FELIX et al. 2006)

Darüber hinaus wiesen einige flache Rotliegendeaufschlüsse (MOST) im Zwickauer Raum deutlich erhöhte Mineralisationen auf, die zumeist aber auf anthropogene Einflüsse zurückgeführt werden können.

4.6.2 Herkunft höher mineralisierter Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke

Im folgenden werden relevante bisherige Theorien zur Genese bzw. Herkunft der höher mineralisierten Grundwässer („Solen“) diskutiert und bewertet und auf Grundlage neuer Erkenntnisse und unter Berücksichtigung von Forschungsergebnissen zu anderen Senkenstrukturen weiterentwickelt.

Autochthone Genesemodelle

Prinzipiell muss zunächst eine autochthone Entstehung dieser Wässer in den entsprechenden rotliegenden bzw. karbonen Schichtenfolgen, dabei zunächst **Lösungsvorgänge**, in Betracht bezogen werden. So nennen Hannemann et al. (1998) neben residualen Solen, die Lösung von Salz als Quelle der Salzgehalte von höher mineralisierten Wässern in der nördlich der Vorerzgebirgssenke gelegenen Nordostdeutschen Senke.

Bei den in den rotliegenden und karbonen Gesteinen der Vorerzgebirgssenke enthalten zu meist gering löslichen Mineralisationen sind jedoch entsprechend geringe Lösungsraten zu erwarten. Es sind also Lösungsvorgänge über sehr lange Zeiträume erforderlich um die entsprechenden Lösungsgehalte zu erzielen. Gleichmaßen dürfte in dieser Zeit kein wesentlicher Zustrom geringer mineralisierter Grundwässer erfolgen, der zur Verdünnung der Solen führen würde. Die wiederholte tektonische Aktivierung rotliegender Strukturelemente (Abschnitt 3.3) sowie die im Verlaufe des Perms, Meso- und Känozoikums stark schwankenden klimatischen Verhältnisse schließen eine solche „ungestörte“ Grundwasserentwicklung nahezu aus. Darüber hinaus ist unklar welche Zeiträume für eine entsprechende Anreicherung der Lösungsgehalte in den rotliegenden Grundwässer erforderlich wären.

Schwierig bleibt bei dieser Interpretation zudem die Herkunft der hohen Chloridgehalte von bis zu mehr als 90 g/l. C-W-H (1994) weist in diesem Zusammenhang auf den Chloridgehalt der karbonen Steinkohle von bis zu 1 %. Geringere NaCl-Gehalte sind auch in den Rotliegenden selbst enthalten. SCHNEIDER (1999b, 2006) hält dabei eine Herkunft des Chlors als feindispers im Sediment verteilter Verdunstungsrückstand unter ariden Klimaverhältnissen für möglich. Natrium könnte zudem aus verwitterten Vulkaniten des unteren Rotliegenden (Planitz-Folge) freigesetzt werden. Es liegen bisher keine Ergebnisse aus Isotopenuntersuchungen vor, die eine autochthone Entstehung der vorerzgebirgischen Solen eindeutig beweisen oder ausschließen würden.

Gravitative Anreicherung kann nach STORCH et. al (2000), wie in Laborversuchen bis zu einer Größenordnung nachgewiesen, zusätzlich zu deutlichen Aufkonzentrierungen der Salzgehalte (z.B. bei Standwässern) führen und ist in der Vorerzgebirgssenke in Bereichen stagnierender Wässer in Betracht zu ziehen.

Diffusionsprozesse können wie durch ZHANG et al. (2007) für NaCl-Grundwässer beschrieben (vgl. Abschnitt 4.1.4) die Lösungsgehalte von Grundwässern deutlich anreichern. Allerdings sind hierfür primär hohe Lösungsgehalte in Porenlösungen in gering leitenden Medien notwendig. Die permokarbonen Sedimente der Vorerzgebirgssenke (Ton- und Schluffsteine) scheinen dafür geeignet, entsprechend hohe Lösungsgehalte in Porenwässern sind jedoch bisher nicht nachgewiesen. Im Bereich der gefluteten Grubenbaue tragen Diffusionsprozesse sicher zur Mineralisation der Grubenwässer durch die im Bereich der ungesättigten Zone durch Sulfidverwitterung gebildeten hochmineralisierten Porenlösungen bei.

Osmose- oder Umkehrosmose-Prozesse können in der Vorerzgebirgssenke aufgrund der erforderlichen sehr speziellen Randbedingungen (Abschnitt 4.1.4.2), wenn, dann nur lokal in sehr gering durchlässigen Gesteinen wie den Tonsteinen der Leukersdorf-Folge, von Bedeutung sein. Sie können, gleich Diffusionsvorgängen, zur Veränderungen von Lösungsgehalten führen. Ein Nachweis von Osmose in tiefen Senkenbereichen ist sehr aufwendig und an um-

fangreiche Datengrundlagen gebunden, die für die Vorerzgebirgssenke nicht vorliegen.

Anreicherung von Lösungsgehalten unter Permafrost-Verhältnissen

Die höher mineralisierten Grundwässer im Permokarbon der Vorerzgebirgssenke können sich prinzipiell auch die Wirkung des Permafrostes gebildet haben. Dabei führt das Ausfrieren, ähnlich der Eindampfung, zu einer Anreicherung der Grundwasserlösungs-inhalte.

Nach DUPHORN (2000) sind im nördlichen Teil Deutschlands aus den letzten 1 Million

Jahren ca. 100 Tundra- und Frost bzw. Permafrostphasen bekannt (Abbildung 15). Für den Bereich Mitteldeutschlands sind Permafrostböden letztmalig am Ende der Weichsel-Eiszeit vor rund 10000 Jahren nachgewiesen. Im Maximum dieser letzten Vereisungsphase erreichte der Permafrost nach DELISLE (1998) dabei Tiefen bis 140 m unterhalb der heutigen Quartärbasis. Bei manchen Gesteinen, z.B. Salzgesteinen, ist nach BGR (1995) sogar mit Tiefen von bis zu 400m auszugehen.



Abbildung 15 Quartäre Vereisungen der Elster-, Saale- und Weichselkaltzeit in Ostdeutschland (nach LIEDTKE 1981, WALTER 1992, ergänzt)

Die Vorerzgebirgssenke lag während der quartären Vereisungsphasen über lange Zeiträume im den Haupteisrandlagen südlich vorgelagerten Permafrostgebiet und war im Maximum der Elstereiszeit zumindest teilweise von Inlandeis bedeckt. Für eine Entstehung der vorerzgebirgischen Solen auch durch den Einfluss des Permafrostes spricht, dass die Anreicherung der Grundwässer so in den letzten 10 000 bis 1 Million Jahren stattgefunden haben könnte, ein relativ kurzer Zeitraum der von wesentlichen tektonischen Störungen verschont blieb. Darüber hinaus ist über diesen relativ kurzen Zeitraum auch eine Isolation der höher mineralisierten Grundwässer und damit ein Verhindern von Mischung mit gering mineralisierten Wässern bis heute wahrscheinlicher.

Dabei heutige Positionierung der höher mineralisierten Wässer könnte dann durch kleinräumige Migration entlang von Störungen/ Klüften, z.B. aufgrund von freier Konvektion beeinflusst worden sein (Abschnitt 4.6.3).

Para-autochthone Genesemodelle

Zunächst ist ein Zustrom höher mineralisierter Grundwässer aus dem unterlagernden Grundgebirge möglich. Neben Klüften und Kluftzonen können dabei die z.T. sehr tiefreichenden Störungen/Störungszonen, z.B. entlang der Gera-Jáchymov-Zone oder der Zone von Plauen-Leipzig-Dessau-Regensburg (Abschnitt 4.3), als Grundwasserfließwege dienen. Hoch mineralisierte Wässer in kristallinen Gesteinen, auch in den basements sedimentärer Senken, als Folge paläozoischer Meereswasserintrusionen in Kombination mit Gesteinslösungsprozessen sind vielfach nachgewiesen (z.B. FRAPE et al. 2003). Für einen Einfluss solcher Wässer spricht, dass die Druckspiegel der tieferen Grundwässer in der VES i.d.R. auf gespannte Verhältnisse hinweisen und damit hydraulisch die Voraussetzung eines aufwärtsgerichteten Grundwasserstromes vorliegt. Sehr geringe Durchlässigkeiten des unterlagernden Grundgebirges und die chemische Signatur von Grundwässern im umgebenden kristallinen Gestein suggerieren dagegen, dass Grundwässer aus diesem Bereich als Quelle der höher mineralisierten Grundwässer im Permokarbon ausscheiden.

Versinkung von Meereswasser als Quelle höher mineralisierter Grundwässer wird für eine Reihe von Senkenstrukturen weltweit diskutiert und konnte häufig belegt werden (vgl. Abschnitt 4.1 und Anlage 1). STUMM (1999) diskutiert für das benachbarte Vogtland die Herkunft der dortigen salinaren Wässer als „reliktische marine Salzwässer“. Diese Möglichkeit ist auch für die Vorerzgebirgssenke zu prüfen. Dabei wird von einem Eindringen mariner Wässer im Tertiär entlang von Bruchzonen ausgegangen, die infolge der postvariszischen Extensionsregimes entstanden oder aktiviert wurden (vgl. Abschnitt 3.3). Nach HOHL et al. (1981) handelte es dabei um ein zumindest temporär im Gebiet verbreitetes Epikontinentalmeer. Diese Annahme wird durch WALTER (1992) bestärkt.

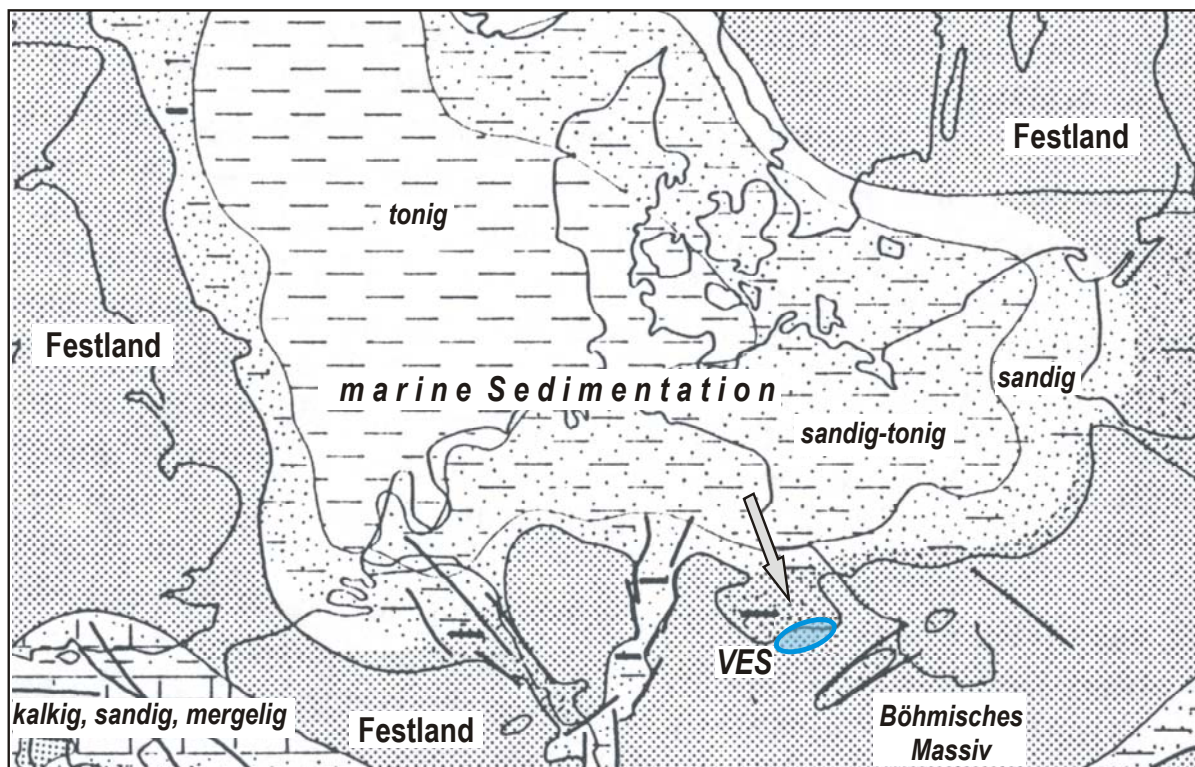


Abbildung 16 Wasser-Land-Verbreitung im nördlichen Mitteleuropa im Oligözän (nach SCHMIDT et al. 1990 und WALTER 1992, ergänzt)

Abbildung 16 zeigt die Wasser-Land-Verbreitung im nördlichen Mitteleuropa im Oligozän. Der Bereich der Vorerzgebirgssenke lag zu dieser Zeit am südlichen Rande eines Epikontinentalmeeres. Transgressionen bzw. Ingressionen können dabei auch zu einer zeitweisen Meeresbedeckung im Bereich der Vorerzgebirgssenke geführt haben.

Diese Salzwässer sanken aufgrund ihrer hohen Dichte durch das Sedimentgestein bis in höher poröse bzw. in durch das Liegende abgedichtete Schichten oder auch bis in die Festgesteine der oberen Kruste. In der VES könnten die als NaCl-haltig bekannten Kohleflöze eine solche Barrierewirkung ausgeübt und ihren Salzgehalt erhalten haben. Dabei erfolgt eine Anreicherung der Salzkonzentration mit der Tiefe. Die These von STUMM (1999) geht auf eine Theorie von BEHR (1994), PIELOW (1994) u.a. zurück. Sie erklären u.a. so das Auftreten der hochsalinaren Wässer in der kontinentalen Tiefbohrung Windischeschenbach. PIELOW (1994) hält dabei Eindringtiefen mariner Wässer von bis zu 10 km für möglich.

Im oberen Miozen erfolgte nach STUMM (1999) eine „Reaktivierung“ und ein Aufsteigen der Wässer durch die Heraushebung des Erzgebirges (Verdünnung des Deckgebirges) und eine Positionierung in höher permeablen Lagen.

In der Vorerzgebirgssenke könnte die im Rahmen der saxonischen Bruchtektonik erfolgte Reaktivierung alter NW-SE Richtungen einen Druckaufbau bzw. die Schaffung neuer Wegsamkeiten entlang der alten Störungen (Gera-Jáchymov-Zone) bewirkt haben. Dies führte dann möglicherweise zu einem entsprechenden Aufstieg höher salinarer Wässer, evtl. auch aus dem liegenden Kristallin (siehe oben), die heute in tiefen anthropogenen Aufschlüssen anzutreffen sind.

Allochthone Genesemodelle

Allochthone Genesemodelle zur Erklärung der im Bereich der Vorerzgebirgssenke auftretenden höher mineralisierten Grundwässer gehen von einem Zustrom solcher „Solen“ aus weiter entfernten Bildungsgebieten aus.

SCHRÄBER (1968, vgl. dort) hat ein solches Genesemodell diskutiert. Er geht dabei von einer Migration NaCl-reicher Wässer auf weitreichenden herzynischen Tiefenstörungen südostwärts in den vogtländischen und vorerzgebirgischen Raum aus. Auch STORCH et al. (1996) halten ein solches Bildungsszenario für die vorerzgebirgischen Solen für möglich.

Diese bisher vorgelegten Argumente für eine allochthone Bildung der höher mineralisierten Wässer halten, unter Vorbehalt der begrenzten Datengrundlage, einer kritischen Überprüfung zunächst nicht stand. Es gibt darüber hinaus eine Reihe von Indizien, die vielmehr auf ein autochthones Genesemodell hinweisen auch wenn dies gleichermaßen bisher nicht sicher nachgewiesen wurde.

Grundwasserspiegel und Kontaminationsfahnen

Die Topographie entlang des vermuteten Migrationpfades Thüringer Becken – Pforte von Meerane – Zwickauer Raum weist insgesamt nur wenig Gefälle, dann aber eher in Richtung des Thüringer Beckens auf. Der vermutete Migrationspfad quert dabei die großen Vorfluter Saale, Weiße Elster, Pleiße und Zwickauer Mulde, die in nördliche bzw. nordwestliche Richtung entwässern. Ein regionaler Topographie-induzierter Grundwasserfluss wäre also eher aus der Vorerzgebirgssenke in Richtung N (NW-NE) zu erwarten (Abschnitt 4.2.2 und 4.9).

Dies bestätigen, soweit dokumentiert, die großräumigen Hydroisohypsenverläufe sowie Kontaminationsfahnen entlang der herzynisch orientierten Oberhohndorfer Hauptverwerfung (Abschnitt 4.2.4.1).

Bei den in SCHRÄBER (1983) für den Raum Meerane genannten südöstlich (also im Sinne von Schräbers Theorie) gerichteten Grundwasserfließrichtungen, dürfte es sich eher um oberflächennahe Grundwasserbewegungen zum lokalen Vorfluter handeln (siehe unten).

Gäbe es einen, von den querenden Vorflutern weitgehend unabhängigen von NW nach SE gerichteten Grundwasserstrom auf herzynischen Störungen entlang der Linie Thüringer Becken – Pforte von Meerane – Zwickau, könnte dieser, zumindest auf Grundlage rezenter hydraulischer Verhältnisse, nicht Topographie-induziert erklärt werden. Möglich wäre ein solcher Grundwasserfluss im Rahmen veränderter hydraulischer Regimes, z.B. während der pleistozänen Vereisungen (vgl. Abschnitt 4.2.2).

Regionaler Migrationspfad

Zwischen den salinaren Grundwässern des Thüringer Beckens und den Solen im Zwickau-Oelsnitzer Revier gibt es keine höher mineralisierten Grundwasservorkommen, die einen den thüringischen Solen vergleichbaren Chemismus aufweisen. Tiefbrunnen im Raum Crotenlaide/Meerane, die im Bereich der Pforte von Meerane am NW-Rand der VES abgeteuft wurden, fördern Grundwässer die eine typische hydrochemische Charakteristik tieferer Grund- bzw. Mineralwässer mit Chloridgehalten unter 100 mg/L (STORCH et al. 1996) aufweisen. Sie stellen höher Grundwässer mit ortstypischen, durch die lokale Geologie beeinflussten, Lösungsinhalten dar (siehe unten und Tabelle 34) und belegen auch hier die Bedeutung von Störungs- und Kluftzonen für das oberflächennahe Auftreten höher mineralisierter Grundwässer. Eine relevante Ähnlichkeit mit den Thüringer und Zwickau-Oelsnitzer Solen bzw. den vorerzgebirgischen höher mineralisierten Wässern ist nicht vorhanden. Die Pforte von Meerane wäre dabei der bei weitem wahrscheinlichste Migrationsweg für aus NW in die VES migrierender Grundwässer, da sie eine alte Sedimentationsrinne zwischen zwei variszischen Rümpfen bildet und zudem im Bereich der tektonischen Schwächezone der Gera-Jachymov-Struktur verläuft.

Hauptionenverteilung

Die von SCHRÄBER (1968) dargestellten Übereinstimmungen im Chemismus hoch mineralisierter Wässer aus dem thüringischen, vogtländischen und erzgebirgischen Raum, sind wie eine komplexe Darstellung der Hauptionen im Piper-Diagramm (KATER 1999) zeigt, nicht überzeugend. So ist das Auftreten ähnlich hoher Gehalte einzelner Wasserinhaltsstoffe für den Nachweis eines genetischen Zusammenhanges zwischen diesen Wässern unzureichend, wenn, wie im Fall der verglichenen Wässer, die relativen Anteile (Equivalentgehalte) der wichtigsten Wasserinhaltsstoffe sehr verschieden sind. Die thüringischen, vogtländischen und erzgebirgischen Wässer weisen danach in Bezug auf ihre Hauptionen eine unterschiedliche hydrochemische Charakteristik auf, die einen eindeutigen Rückschluss auf zusammenhängende Migrationwege nicht zulässt.

Gemeinsamkeiten vorerzgebirgischer tiefer Grundwässer

Vergleicht man die Gruben- und höher mineralisierten Grundwässer des Zwickauer und Oelsnitzer Raumes und die St. Egidien geförderten chloridischen Wässern aus den Tiefbrun-

nen Hy Se 109/84 und Hy Se 108/84, zeigen sich trotz des unterschiedlich hohen Mineralisationsniveaus, ähnliche Verteilungen der Haupt- und Nebenionen (Ausnahmen siehe unten), die sich deutlich von denen der Thüringer Solen unterscheiden (siehe oben).

Die vorerzgebirgischen höher mineralisierten Grundwässer zeichnen sich generell durch eine deutliche Chlorid-Dominanz gegenüber Sulfat und hohe Natrium- und häufig auch Calciumgehalte aus. Eine Ausnahme bildet ein Grundwasser in Meerane, bei dem aufgrund der lokalen geologischen Verhältnisse die realtiven Sulfatgehalte jene von Chlorid überwiegen. In einem Grundwasser in Zwickau-Schedewitz (MKZG 52416013) dominieren Calcium und Magnesiumanteile deutlich über Natrium.

Permokarbone Grundwässer der Nordostdeutschen Senke

Die chemische Beschaffenheit sehr tiefer (um 4000m) permokarboner Grundwässer und Fluide aus der nördlich der Vorerzgebirgssenke liegenden Nordostdeutschen Senke (WOLFGGRAMM et al. 2000, 2003) zeigt in Bezug auf die Hauptionenverteilungen Ähnlichkeiten mit den tiefen rotliegenden Grundwässern der Vorerzgebirgssenke. Sie stellen, wie auch die höher mineralisierten Grundwässer der Vorerzgebirgssenke, relativ Mg-arme Wässer des Ca-Na-Cl-Typs dar und werden als „Rotliegendwässer“ eingeordnet (MÜLLER 1969). Als „In-situ Quelle“ dieser Wässer (und Mineralisationen) werden vor allem liegende permokarbone Vulkanite, untergeordnet permokarbone Sandsteine identifiziert (WOLFGGRAMM et al. 2003). Eine Migration von Wässern aus dem Zechstein in das Rotliegende wird dabei nur als mögliches lokales sekundäres Phänomen diskutiert. Der isotope geochemische Nachweis von SCHMIDT MUMM et al. (2003) der Entstehung des Kupferschiefers in der Nordostdeutschen Senke u.a. durch Aufstieg von permokarbonen Wässern als Träger hoher Mineralisationen (juvenile Anteile schließt WOLFGGRAMM et al. (2003) dabei aus) unterstützt die „chemische Eigenständigkeit“ tiefer permokarboner Grundwässer.

Lithium- und Sulfatgehalte

SCHRÄBER (1968) nennt die in den vorerzgebirgischen und thüringischen Solen gleichermaßen hohen Lithium- und Sulfatgehalte, die eine Verwandtschaft dieser Wässer zeigen sollen.

Hohe Li-Gehalte sind für hoch mineralisierte tiefe Grundwasser generell durchaus normal. So wurden in salinaren Tiefenwässern des Rotliegenden NW-Deutschlands weitaus höhere Lithiumgehalte ermittelt (BÄSSLER 1970).

Die hohen Sulfatgehalte in vielen höher mineralisierten Grundwässern der Vorerzgebirgssenke können einerseits aus der Lösung feindispers im Sediment verteilter Verdunstungsrückstände und sulfathaltiger Bindemittel stammen. Darüber hinaus sind hohe Sulfatgehalte als Ergebnis der Verwitterung dispers verteilter Sulfide (z.B. Pyrit) in den Kohlelagen und Zwischenmitteln typisch. Dies wird durch korrelierende geringe pH-Werte in Grubenwässern bestätigt. Dieser verhält sich, soweit Messwerte vorliegen, umgekehrt proportional zum Sulfatgehalt.

KAULFUß (1994) erwähnt in diesem Zusammenhang auch verwitternde Alaunschieferhalde südlich von Zwickau, u.a. als Sulfatquelle.

STORCH et al. (1996) verweist auch auf das Phänomen der gravitativen Anreicherung von Lösungsinhalten. Danach ergaben Säulenversuche am UFZ Leipzig-Halle GmbH Aufkonzentrierungen um einen Faktor 10 (BÄSSLER 1970). Dies kann in Bereichen mehr oder minder stagnierender oder sehr langsam migrierender Wässer zu Aufkonzentrierungen der

Lösungsinhalte führen.

Höher mineralisierte Grundwässer im südlich angrenzenden Erzgebirgskristallin

Ein Großteil der herzynisch verlaufenden Elemente der Gera-Jachymov Zone setzt sich nach SW über den Rand der Vorerzgebirgssenkung in das Erzgebirgskristallin fort. Folgt man der Annahme Schräbers, wäre ein Auftreten höher mineralisierter Wässer des Thüringer Typs, möglicherweise auch dort zu erwarten. Es konnten in diesem Bereich bisher keine vergleichbaren höher mineralisierten Grundwässer nachgewiesen werden. Einschränkend muss allerdings bemerkt werden, dass hier nur eine geringe Anzahl tieferer Grundwasseraufschlüsse zur Verfügung stehen, was keine sicheren Schlussfolgerungen zulässt.

4.6.3 Hydraulik und Positionierung höher mineralisierter Grundwässer

In Bezug auf das Auftreten höher mineralisierter Grundwässer im Bereich der Vorerzgebirgssenkung können zusammenfassend folgende verallgemeinernde Randbedingungen definiert werden (vgl. Abschnitte 4.2.4.1, 4.2.5, 4.5.3, 4.6.1, 4.1).

- Höher mineralisierte Grundwässer sind in der Vorerzgebirgssenkung vor allem in größeren Teufen (>200-300m) weit verbreitet.
- In einigen Störungs- bzw. begleitenden Kluftbereichen treten höher mineralisierte Wässer kleinräumig und z.T. scheinbar isoliert auch oberflächennah, meist in geringen Ergebenheiten auf.
- Dabei sind auf engem Raum sehr starke Unterschiede in der Mineralisierung sichtbar, hoch mineralisierte Wässer treten in unmittelbarer Nachbarschaft „normaler“ Grundwässer auf, haben aber zumeist andere Druckspiegel
- Es ist keine inverse Schichtung von Grundwässern unterschiedlicher Mineralisation nachgewiesen und aufgrund des Fehlens massiver Evaporitlagerstätten auch nicht zu erwarten
- Wesentliche Temperaturanomalien sind nicht nachgewiesen
- Das Auftreten freier Konvektion in anthropogen ungestörten Bereichen ist deshalb als Haupttriebkraft aufsteigender höher mineralisierter Grundwässer auszuschließen.
- Allerdings kann freie Konvektion lokal und im Zusammenspiel mit anderen Triebkräften wirken

Das hydraulische Verhalten höher mineralisierter Grundwässer in der Vorerzgebirgssenkung wird dabei von folgenden Gegebenheiten bestimmt (vgl. Abschnitte 4.2.2, 4.3 und 4.1).

- Es ist von stark abnehmenden Gesteinsdurchlässigkeiten mit der Teufe, sowohl im Bereich doppelporöser Grundwasserleiter als auch entlang von Störungs- und Kluftzonen auszugehen, schon innerhalb der oberen 100m sind Abnahmen um mehrere Größenordnungen möglich.
- Hydraulisch besser leitende zusammenhängende Bereiche in größeren Teufen beschränken sich auf gröber klastisch ausgebildete Teilbereiche, die i.d.R. jedoch von hydraulisch geringer leitenden bzw. hemmenden Einheiten begrenzt werden

- Störungen und insbesondere die begleitenden Kluftzonen können vertikale Wegsamkeiten zwischen tieferen und höheren Grundwasserstockwerken darstellen
- dabei wird die effektive vertikale Durchlässigkeit der Störung vom Zusammenspiel aller miteinander kommunizierenden Kluft- und Störungsbahnen einer Störungszone bestimmt

Unter bestimmten Randbedingungen können tiefe (hoch mineralisierte) Grundwässer in oberflächennahe Grundwasserleiter migrieren und/ oder in Vorfluter entlasten. Solche Vorgänge sind in zahlreichen sedimentären Senken dokumentiert (Abschnitt 4.1).

Im folgenden sollen Ursachen für die Positionierung höher mineralisierter Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke in oberflächennahen Bereichen diskutiert werden. Grundlage sind die in dieser Arbeit ausgewiesenen Erkenntnisse zu den hydrogeologischen Verhältnissen in der Vorerzgebirgssenke (Abschnitte 4.2 bis 4.6) und in vergleichbaren Senkenstrukturen weltweit (Abschnitt 4.1). Als Abnahme soll dabei von einer autochthonen oder para-autochthonen Entstehung dieser Wässer ausgegangen werden, da hierfür die überzeugendsten Argumente vorliegen (Abschnitt 4.6.2).

Vereinzelt wurden höher mineralisierte Wässer in der Vorerzgebirgssenke auch oberflächennah, in Teufen von wenigen Metern bis 200, 300 Metern aufgeschlossen. Eine in-situ Bildung dieser Wässer in diesen Bereichen ist dabei aber in den meisten Fällen auszuschließen. Die oberflächennahen im allgemeinen relativ gut durchlässigen Grundwasserleiter sind in den meteorischen Wasserkreislauf eingebunden. Die Topographie-induzierte Durchströmung dieser Grundwasserleiter führt dabei zu einer kontinuierlichen Verdünnung primärer höher mineralisierter Grundwässer. Auch für kleinräumige geringer durchlässige Bereiche, z.B. einige Störungsbereiche, kann bei Berücksichtigung geologischer Zeiträume von einer Verdünnung aufgrund von Durchströmung oder aber durch diffusiven Konzentrationsausgleiches ausgegangen werden.

Zudem führen die zumeist geringen vertikalen Durchlässigkeiten und die häufig beobachteten Zusetzung ganzer Störungsabschnitte zu sehr geringen Mengen höher mineralisierter Grundwässer, die in höhere Grundwasserstockwerke entlastenden und im Grundwasser insgesamt i.d.R. nicht nachweisbar sind.

Die Positionierung höher mineralisierter Wässer in oberflächennahen Bereichen kann durch die diskutierten Bildungsszenarien (Abschnitt 4.6.2) allein nicht erklärt werden. Es muss Prozesse geben die für die Migration höher mineralisierter Grundwässer aus den tieferen in oberflächennahe Bereiche verantwortlich sind. Darüber hinaus muss von einer Positionierung dieser Wässer in jüngerer geologischer Vergangenheit ausgegangen werden um eine „Ausspülung“ im Bereich des meteorischen Wasserkreislaufes auszuschließen. Zwei wichtige Prozesse, die in diesem Zusammenhang auch in der Vorerzgebirgssenke von Bedeutung sein können ist das Wirken von Überdrücken und freier Konvektion. Darüber hinaus kann hydrodynamische Dispersion lokal von Bedeutung sein.

Überdrücke

Die Generation von Überdrücken in den tieferen geringdurchlässigen Abfolgen der Vorerzgebirgssenke kann durch verschiedene Prozesse, wie diagenetische Vorgänge, Gesteinsver-

dichtung oder tektonische Ereignisse hervorgerufen werden. Solche Prozesse sind in zahlreichen Senkenstrukturen nachgewiesen worden. LAND (1997) beschreibt den Aufstieg NaCl-reicher Wässer und ihre Entlastung in die Vorfluter im Gulf of Mexico Sedimentary Basin während der Beckenabsenkung. Als Haupttriebkkräfte werden seismisch und diagenetisch (Dehydrierungsprozesse u.a. in Schluffsteine) induzierte Druckregimes genannt (Abschnitt 4.1. Solche Ausbildung von Überdrücken sind auch für tiefere feinklastische Bereiche der Vorerzgebirgssenne denkbar .

Die meist über lange Zeiträume entstandenen Überdrücke können bei Anschluss an geeignete durchlässige Strukturen wie Störungen und Klüfte entlasten. Initiiert werden kann eine solche Entlastung durch Reaktivierung tektonischer Strukturen aufgrund tektonischen Stresses, seltener auch durch Wirken des Überdrucksystems selbst. Die Druckentlastung kann letztlich zum Aufstieg höher mineralisierter Grundwässer führen.

Hydrodynamische Dispersion

Hydrodynamische Dispersion kann nachweislich zur Ausbreitung höher mineralisierter Grundwässer in das Hangende beitragen (z.B. Lavastre et al. 2005, vgl. Abschnitt 4.1.3.2). Das Zusammenwirken von hydrodynamischer Dispersion mit durch Entlastung von Überdrücken induzierten Grundwasserbewegungen kann zur Positionierung höher mineralisierter Wässer in oberflächennahen Bereichen der Vorerzgebirgssenne beigetragen haben.

Aufstieg höher mineralisierter Grundwässer aufgrund von freier Konvektion

Dichte-induzierter Grundwasserfluss ist ein in vielen sedimentären Senkenstrukturen beobachtetes Phänomen (Abschnitt 4.1.3), so auch im nord-, ost- und mitteldeutschen Raum. HECK (1932) nennt zahlreiche Vorkommen salinarer Wässer in der Schleswig-Holstein Senke. MAGRI et al. (2004) nennen mehr als 100 Lokalitäten salinarer Quellen in verschiedenen norddeutschen sedimentären Senken und gehen vom Aufstieg salinarer Wässer als einem dort häufigen Phänomen aus. Auf Grundlage großmaßstäblicher numerischer Modellierungen für den Bereich der nördlich der Vorerzgebirgssenne gelegenen Nordostdeutschen Senke, halten sie das Auftreten vorrangig thermisch induzierter freier Konvektion als Ursache eines solchen Aufstiegs für möglich. Sie betonen dabei jedoch die starke Abhängigkeit dieser Vorgänge von ausreichenden vertikalen Durchlässigkeiten und gehen in Bezug auf geeignete Randbedingungen für weite Bereiche von Situationen nahe „konvektiver Instabilität“ aus.

Für die Vorerzgebirgssenne können aufgrund der wenigen und unvollständigen Analysen in Bezug auf die räumliche Verteilung von Dichte und Temperatur im Grundwasser nur grobe Annahmen zum Auftreten freier Konvektion (Abschnitt 4.1.3.2) und damit zur Dynamik höher mineralisierter Grundwässer getroffen werden. Nachweise für Grundwasserbewegungen aufgrund von freier Konvektion, liegen nicht vor.

Ein Aufstieg salinarer Wässer auf Grundlage freier Konvektion ist nur bei entsprechend hohen Durchlässigkeiten, Temperaturgradienten bzw. dem entsprechenden Versinken von Wässern noch höherer Dichte möglich. Doch gerade diesbezüglich sind die Randbedingungen für freie Konvektion in der Vorerzgebirgssenne weniger geeignet.

In oberflächennahen Bereichen wird freie Konvektion im allgemeinen durch den dominierenden Topographie-induzierten Grundwasserfluss überlagert. Dichte-induzierte Grundwasserbewegungen sind deshalb zumeist an größere Teufen gebunden. In vergleichbaren Senkenstrukturen weltweit konnte allerdings bereits in Teufen von rund 500m (selten sogar oberflächennah) eine Dominanz Dichte-induzierten Grundwasserflusses gegenüber dem Topographie-kontrollierten Grundwasserregime nachgewiesen werden (Abschnitt 4.1). In der Vorerzgebirgssenke wirkt jedoch ein deutlich ausgeprägtes Geländere relief mit einem Wechsel von Tal und Hochlagen flachem Dichte-induzierten Grundwasserfluss eher entgegen.

Massive Salzvorkommen in geeigneter Positionierung (als Voraussetzung für Temperatur-anomalien und Mineralisationsquelle) sind, im Gegensatz zu den nordeuropäischen Senken, in der Vorerzgebirgssenke nicht bekannt. Ein deutlich erhöhter geothermischer Gradient als Triebkraft freier Konvektion ist nicht dokumentiert. Es kann, wie für die Nordostdeutsche Senke belegt (HURTIG 1994) von rund 3 bis 3,5°/100m ausgegangen werden. Die Verteilung der Mineralisation ist (bei geringer Probenzahl) ausgesprochen ungleichmäßig. Die vertikalen Durchlässigkeiten wechseln darüber hinaus im allgemeinen sehr deutlich zwischen leitend und hemmend, vermutlich gerade entlang vieler Störungszonen. Das Schichteinfallen der permokarbonen Folgen ist, selbst in den Senkenrandbereichen in aller Regel kleiner 45°, was schichtparalleler Konvektion entgegenwirkt. Nur Störungszonen (meist herzynischer und erzgebirgischer Orientierung) weisen zumeist ein höheres Einfallen auf (Abschnitt 4.3). Geeignete geometrische Voraussetzungen weisen möglicherweise die massiv anthropogen manipulierten Bereiche der ehemaligen Steinkohlengruben Zwickau und Lugau-Oelsnitz auf (vgl. FELIX et al 2006).

Die hohen Unterschiede in den Lösungsgehalten vorerzgebirgischer Grundwässer (Abschnitt 4.5) bilden prinzipiell geeignete Voraussetzungen zum Auftreten Dichte-induzierten Grundwasserflusses (Abschnitt 4.2.2).

Wenngleich also insgesamt von eher ungünstigen Bedingungen für das Auftreten freier Konvektion in der Vorerzgebirgssenke ausgegangen werden muss, kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass in höher durchlässigen Schichten tieferer Senkenbereiche, entlang der tieferen Senkenflanken und an Störungsabschnitten auch freie Konvektion als dominante Triebkraft des Grundwasserflusses wirkt. Sie wird zudem in Bereichen höher mineralisierter Grundwässer eine mehr oder minder wichtige Antriebskomponente für den Grundwasserfluss darstellen, die auch das lokale Fließregime beeinflussen kann.

Im Zusammenhang mit der Positionierung höher mineralisierter Grundwässer müssen auch tektonisch induzierte Impulse in Betracht gezogen werden, die einen „Aufstieg“ dieser Wässer zum Beispiel entlang von Störungen bewirkt haben können. Solche Impulse sind bis in die jüngste Vergangenheit belegt (Abschnitte 3.3 und 4.3.1). Einmal positionierte höher mineralisierte Wässer haben sich dann nur in quasi stagnierenden Bereichen, ausserhalb des meteorischen Wasserkreislaufes erhalten. Solche „Stagnationsbereiche“ wurden im Rahmen der großräumigen hydraulischen Modellierung simuliert (Abschnitt 4.9).

Ein wesentlicher Einfluss höher mineralisierter Wässer auf die großräumige Grundwasserdynamik und die Gebietswasserbilanzen in der Vorerzgebirgssenke ist nicht zu erwarten.

4.6.4 Fazit

Höher mineralisierte chloridischen Grundwässer (Typ 3) sind im Bereich der Vorerzgebirgssenke in Tiefbohrungen/Tiefbrunnen sowie in den Zwickau-Oelsnitzer Gruben aufgeschlossen. Vereinzelt konnten höher mineralisierte Wässer auch oberflächennah auf isolierten Kluft- bzw. Störungsbereichen nachgewiesen werden. Sie sind - außer im Bereich der ehemaligen Steinkohlengrubenbaue - von den oberflächennahen Quartär- und Festgesteinsgrundwasserleitern hydraulisch getrennt.

Die Herkunft dieser Wässer ist weiterhin ungeklärt. Es wird nach gegenwärtigem Kenntnisstand und im Ergebnis der vorliegenden Arbeit jedoch von einer autochthonen Genese dieser Wässer ausgegangen. Dies ist aus hydraulischer und hydrochemischer Sicht die naheliegendste Erklärung. Gewichtige Gegenargumente liegen nicht vor.

Dennoch kann eine allochtone Genese der höher mineralisierten Grundwässer nicht vollends ausgeschlossen werden. Allerdings lassen eine Reihe von hydrochemischen und hydraulischen Indizien Zweifel an einer solchen Deutung aufkommen. Überzeugende Anhaltspunkte für eine allochtone Entstehung der Wässer liegen nicht vor.

Eine sichere Klärung der Herkunft dieser Wässer im Zwickau-Oelsnitzer Raum kann nur durch weiterführende Untersuchungen erreicht werden. Dazu gehören insbesondere zielgerichtete Probenahmen. Neben der vollständigen Analyse der Haupt- und Nebenelemente sind vor allem auch Isotopen und Spurenelemente in die Betrachtungen einzubeziehen. Integrierte teufenabhängige Tracherversuche entlang geeigneter Störungszonen, wie der Oberhohndorfer Hauptverwerfung oder der Rödlitzer Hauptverwerfung wären dabei von großem Vorteil.

4.7 Das konzeptionelle Modell der Vorerzgebirgssenke für die Umsetzung in der numerischen Modellierung

Modellraum, Betrachtungsmaßstab, Ziel

Das konzeptionelle Modell ist ein Gedankengebäude, das die hydrogeologischen Aspekte der Vorerzgebirgssenke und ihres Umlands beschreibt. Es berücksichtigt dabei Erfahrungen hydrogeologischer Untersuchungen in anderen Senkenstrukturen (Abschnitt 4.1). Das hydrogeologische konzeptionelle Modell stellt eine auf Detailbetrachtungen aufbauende, zusammenfassende und verallgemeinernde Betrachtung im Sinne des Bearbeitungszieles dar. Diese thematischen und regionalen Details behandeln die Abschnitte 4.2 bis 4.6.

Der weite Modellraum und das Ziel der Betrachtung – die großräumige Analyse und hydraulische Modellierung – bestimmen den überregionalen Betrachtungsmaßstab des konzeptionellen Modells.

Entwicklung der Modellvorstellung

Die Vorerzgebirgssenke ist eine regionale sedimentäre Senkenstruktur mit zumeist verfestigten und tektonisch gestörten Abfolgen grob- bis feinklastischer Gesteinsfolgen über kristallinem Untergrund.

Für das konzeptionelle Modell kann deshalb von einem, von mehr oder minder hydraulisch aktiven Störungen durchsetzten, Grundwasserleiter/Grundwasserhemmer Modell ausgegangen werden. Strömung findet dabei in Abhängigkeit vom Gesteinstyp sowohl über Porenräume als auch entlang von Klüften statt.

Die oberflächennahe Auflockerungszone bildet zusammen mit den quartären und tertiären Ablagerungen das hangende Grundwasserstockwerk/e, eine im Vergleich zu den tieferen Festgesteins-Grundwasserstockwerken, im allgemeinen gut durchlässige Zone.

Die Intensität der hydraulischen Verbindung zwischen beiden Sphären wird deshalb i.d.R. von den Eigenschaften der liegenden Festgesteinseinheiten bestimmt. Schwerpunkt der nachfolgenden Betrachtungen sind diese tieferen permokarbonen und präkarbonen Gesteinsfolgen.

Größermaßstäbliche Grundwasserströmung im Festgestein der Vorerzgebirgssenke ist prinzipiell an zwei Arten hydrogeologischer Strukturen gebunden: Schichten und Störungs- bzw. Kluftzonen. Trotz ihres steileren Einfallens an den Senkenrändern sollen die Schichten modellhaft zunächst als mehr oder minder horizontale, Störungen als steile bis vertikale Strukturen - bevorzugt in NW-SE und NE-SW-Richtung, betrachtet werden. Dabei werden sowohl Schichten als auch Störungen untereinander von, zumeist mächtigeren, Bereichen geringer Durchlässigkeiten abgegrenzt. Folgt man dieser Vorstellung ergibt sich ein räumliches Raster schmalerer gut leitender und mächtigerer gering leitender Strukturen. Dieses Raster wird beim Übergang von der Vorerzgebirgssenke in die umgebenden Grundgebirgsbereiche auf seine gut leitende vertikale Komponente reduziert, da die fehlende Schichtung nur lokal durch eine alternativ ausgebildete horizontale Klüftung ersetzt wird.

Doch auch innerhalb der gut durchlässigen Schichten und Störungen treten häufig und in unregelmäßiger Verteilung geringdurchlässige Zonen auf. Diese hemmen den schichtgebundenen Grundwasserfluss in horizontaler, den störungsgebundenen Grundwasserfluss in vertikaler Richtung. Das zuvor entwickelte räumliche Raster wird dadurch in unterschiedlich große hydraulische Teilsysteme getrennt. Einige dieser Teilsysteme sind entlang durchgehend durchlässiger horizontaler und/oder vertikaler Strukturen miteinander verbunden, andere aber hydraulisch nahezu isoliert. Modellhaft können auch die Grubenbaue der ehemaligen Steinkohlenreviere Zwickau und Lugau-Oelsnitz als solche Teilsysteme betrachtet werden.

Diese Modellvorstellung beschreibt also eine räumliche Diskretisierung in gut durchlässige, dabei intern aber hydraulisch inhomogene, Teilsysteme unterschiedlicher Größe, die von größeren geringer durchlässigen Bereichen voneinander abgegrenzt werden. Nur einige dieser Teilsysteme sind hydraulisch miteinander verbunden. Diese stellen im regionalen Kontext präferentielle Fließwege dar. Sie repräsentieren die intermediären bis regionalen Grundwasserfließsysteme (Abschnitt 4.2.2, Abbildung 10) und sind deshalb für den großmaßstäblichen Grundwasserfluss von besonderer Bedeutung.

Die bis hierher entwickelte Modellvorstellung wird von einem weiteren wichtigen Faktor ergänzt, der generellen Abnahme der Durchlässigkeit von Schichten und tektonischen Strukturen mit zunehmender Teufe (Abschnitte 4.1 und 4.2.2). Dieser Teufeneffekt muss dem Systemmodell insgesamt aufgesetzt werden.

Voraussetzung für eine Grundwasserbewegung im Untergrund ist neben dem Vorhandensein entsprechend durchlässiger Strukturen, das Wirken geeigneter Antriebskräfte. Außer dem oberflächennah dominierenden Topographie-induzierten Grundwasserfluss sind mit zunehmender Teufe vor allem Dichte- und Druck-induzierter Grundwasserfluss von Bedeutung (Abschnitt 4.1). Berücksichtigt man die Teufenlage der Vorerzgebirgssenke wird der Grundwasserfluss oberflächennah von Topographie-induzierten, in Teufen ab einigen 100m von Dichte-induzierten Triebkräften bestimmt (Abbildung 8).

Die oben entwickelte Modellvorstellung der räumlichen Verteilung von Grundwasserwegsamkeiten muss also mit der Modellvorstellung zu den Antriebsmechanismen kombiniert werden.

Im Ergebnis entsteht ein konzeptionelles Modell der Vorerzgebirgssenke, dass in beschriebener Weise durch das Zusammenwirken von preferentiellen Fließwegen (miteinander verbundene hydraulisch aktive Teilsysteme) und dominierenden Antriebsmechanismen (Topographie- und Dichte-induzierter Grundwasserfluss) charakterisiert wird.

4.8 Das hydrogeologische Strukturmodell der Vorerzgebirgssenke

4.8.1 Einführung und Zielstellung

Das hydrogeologische Strukturmodell bildet zusammen mit dem Parametermodell die Grundlage der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung in der Vorerzgebirgssenke und ihrem Umland. Die Strukturmodellierung wurde mit den Programmen GOCAD (Abschnitt 2.9) und GMS (Abschnitt 2.10) durchgeführt. Das Strukturmodell besteht im wesentlichen aus den folgenden Teilen:

- digitales Geländemodell
- hydrogeologische Einheiten
- strukturelles Inventar
- Informationsebenen zu hydrologischen, geologischen und hydrogeologischen Themen (Vektordaten)
- Kartengrundlagen (Rasterdaten)

Während des Modellierungsprozesses wurden zahlreiche Arbeitsmodelle als methodische Zwischenschritte erstellt. Solche Arbeitsmodelle beinhalten oft auch Modellteile, die durchaus realistische Modellvarianten repräsentieren, die letztlich aber nicht in das resultierende Strukturmodell übergehen. Dazu gehören z.B. hochauflösende Modellierungen von Störungsfragmenten oder Schichtflächen.

Neben den methodischen Aspekten stehen in der vorliegenden Arbeit jedoch hydrogeologische Fragestellungen, auch in Hinblick auf das numerische Strömungsmodell im Vordergrund. Deshalb wurde bei der Umsetzung geologischer Strukturen in Teile des hydrogeologischen Modells, die Berücksichtigung geologischer Details im Interesse der angestrebten Gesamtlösung hinten an gestellt. Das bedeutet im Einzelfall, dass z.B. eine im Detail modellier-

te kleinräumige Schwellenstruktur an der Karbonbasis oder eine bestimmte Auffächerung der Oberhohndorfer Hauptverwerfung zum Hangenden nicht in das hydrogeologische Strukturmodell übernommen wird. Bei der Umsetzung der hydrogeologischen Strukturen in das Gitter des Strömungsmodells sind solche Details aufgrund der technisch erforderlichen größeren Maschenweiten großräumiger Modelle einerseits nicht nachbildbar. Andererseits zeigen Erfahrungen und Modellrechnungen, dass für großräumige Betrachtungen die modelltechnische Umsetzung eines lokal erhöhten Kenntnisstandes, der in den meisten übrigen Modellregionen nicht erreicht wird, keine wesentliche Verbesserung des Modellierungsergebnisses liefert. Dies gilt um so mehr, wenn die hydrogeologische Parametrisierung der entsprechenden Modellbereiche nur unscharf bekannt ist und der numerische Modellfehler den Einfluss der Verallgemeinerung bei weitem übertrifft.

Ziel war es also im Hinblick auf die Grundwasserströmungsmodellierung einen dem Grundsatz „so genau wie nötig, so ungenau wie möglich“ gerecht werdenden Kompromiss zu finden, der zudem den begrenzenden technischen Anforderungen an die Modellkomplexität (Abschnitt 2.9.5) gerecht wird.

Die Strukturmodellierung basiert auf Daten verschiedenster Quellen (Abschnitt 2, Tabelle 2). Wichtigste geometrischen Grundlage bildeten die Aufschlussdatenbanken und Interpretationen lokaler hydrogeologischer Strukturen (Abschnitt 4.2). Für den nordwestlichsten Modellrandbereich (Zeititz-Schmöllner Mulde), standen neben den Aufschlussdatenbanken nur wenige weitere Anhaltspunkte (z.B. PIETZSCH 1951, HECHT 1980) zu den tieferen hydrogeologischen Strukturen zur Verfügung.

4.8.2 Das Digitale Geländemodell

Das digitale Geländemodell der Vorerzgebirgssenke und ihres Umlandes definiert die Höhenlage der Geländeoberfläche im gesamten Modellraum und stellt als Flächenelement somit die obere Begrenzung des räumlichen hydrogeologischen Struktur- und Strömungsmodells dar.

Ausgangspunkt für die Erstellung des Geländemodells waren zwei Höhenmodelle (Punktdatensätze) des Landesvermessungsamtes, das DGM_500 und das DHM_M745 (LVA 1999). Dabei handelt es sich um Raumpunkte (x,y,z) im Gauß-Krüger Koordinatensystem.

Das Höhenmodell DGM_500

Hierbei handelt es sich um Raumpunkte im 500*500m x,y Raster. Das DGM_500 deckt mit rund 13.500 Stützpunkten das gesamte Modellierungsgebiet ab. Das DGM_500 wurde lediglich für die äußersten Bereiche des weiteren Modellgebiets verwendet. Diese Bereiche mussten im wesentlichen aufgrund hydraulischer Kriterien (Abschnitt 4.7) in den Modellraum einbezogen werden. Die Verwendung eines so weitständigen Rasters ist gerechtfertigt, da die exakte kleinräumige Nachbildung der Geländeoberfläche war hier nicht notwendig war. Das DGM_500 bildet größere Täler und Hochlagen ausreichend genau ab, die vollständige Umsetzung kleinräumiger Höhenzüge und enger Täler ist dagegen nicht immer gewährleistet.

Das Höhenmodell DHM_M745

Das DHM_M745 ist ein von der Deutschen Bundeswehr verwendetes digitales Höhenmodell und wurde auf Grundlage der militärtopographischen Karte 1:50.000 (M_745) erstellt. Der Abstand der Raumpunkte beträgt hier rund 25m. Das DHM_745 enthält damit allein im engeren Modellbereich rund 1.000.000 Stützpunkte. Die Höhengenaugigkeit schwankt je nach Relief zwischen $\pm 5\text{m}$ in den Ebenen, $\pm 9\text{m}$ im Berg- und Hügelland und $\pm 15\text{m}$ in steilen Gebirgsbereichen. Das DHM_745 bietet damit, unter Berücksichtigung der angestrebten Genauigkeit bzw. des Bearbeitungsmaßstabes des hydrogeologischen und hydraulischen Modells, eine sehr hohe Genauigkeit/Auflösung. Auch kleinere Täler und einzelne Bergkuppen sind einwandfrei abbildbar. Es wurde deshalb für die Simulation der Geländeoberfläche/Modelloberkannte im Bereich der Vorerzgebirgssenke und des unmittelbaren Umlandes verwendet.

Umsetzung der Punktmodelle (Höhenmodelle) in ein digitales Geländemodell

Für die Bestimmung der Geländehöhe liegen praktisch unendlich viele Aufschlusspunkte zur Verfügung die in unterschiedlich genauen Höhenmodellen repräsentiert werden. So bietet das digitale Landschaftsmodell des Landesvermessungsamtes Sachsen noch höhere Auflösungen und Genauigkeiten als die oben genannten Höhenmodelle.

In Bezug auf die Genauigkeit des Geländemodells stellten sich für den Bereich der Vorerzgebirgssenke als Hauptinteressengebiet und für das Umland unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit (Abschnitt 4.8.1).

Ziel war es die Ausgangsdaten der Höhenmodelle (DHM und DGM) auf eine Fläche (Geländemodell) zu übertragen, die mit möglichst geringer Stützpunktzahl eine für die Bedürfnisse der Struktur- und vor allem der Strömungsmodellierung ausreichend exakte Nachbildung der Geländeoberfläche darstellt.

Für derartige Berechnungen stellt GOCAD ein ausgezeichnetes Werkzeug dar (Abschnitt 2.9). Zunächst wurden beide Höhenmodelle als Punktdaten in GOCAD importiert und zusammengeführt. An den über 1.000.000 Stützpunkten wurden zunächst verschiedene Filteroperationen getestet um eine Optimierung/Verringerung des Datensatzes zu erreichen. Dadurch sollten vernachlässigbare Punkte eliminiert und der Datensatz bis auf eine flexibel und schnell verwendbare Größe verkleinert werden. Im Ergebnis wurde eine Stützpunktausdünnung in flachen Geländeteilen erreicht, bei der Punkte die von Nachbarpunkten gleicher Höhe umgeben waren entfernt wurden. In Bereichen mit steileren Reliefs wurden dagegen viele oder alle Stützpunkte erhalten. So konnte die Genauigkeit der ursprünglichen Höhenmodelle im angepassten kombinierten Höhenmodell weitgehend erhalten bleiben.

Das Höhenmodell wurde nun als Interpolationsdatensatz für die Geländeoberfläche des Struktur und Strömungsmodells verwendet (Geländemodell). Die Genauigkeit des interpolierten Geländemodells hängt dabei einerseits vom Interpolationsdatensatz (Höhenmodell), andererseits von der Auflösung (Gitter- bzw. Punktabstände) des Geländemodells selbst ab.

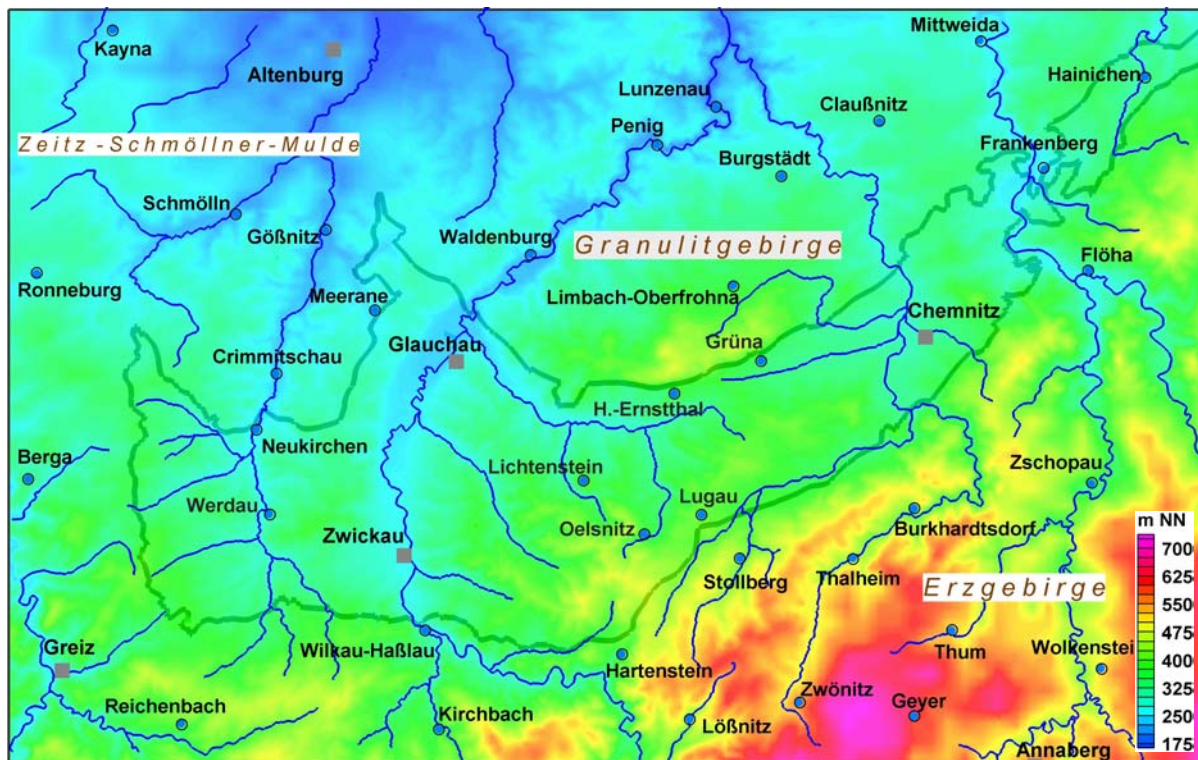


Abbildung 17 Digitales Geländemodell der Vorerzgebirgssenke und ihres Umlandes

4.8.3 Modelle Aufschluss- und Schichtdaten

Wichtige Grundlage des hydrogeologischen Modells bildeten die digital erfassten Aufschluss- und Schichtdatenbanken (Abschnitte 2.9 und 2.10). Sie wurden als Auszüge aus dem Fachinformationssystem (FIS) Hydrogeologie vom LfUG Sachsen (DUTELOFF 1998-2006) und aus Datenbanken der Thüringer Landesanstalt für Geologie (TLUG 2006, 2007) zur Verfügung gestellt. Für die thüringischen und sächsischen Aufschlussdatenbanken wurden einheitliche Kennungen für Materialien, Horizonte und HGUs verwendet (vgl. unten). Die Aufschlussdaten wurden in Abhängigkeit von der Fragestellung in den GMS-Modellen zusammengeführt. Abbildung 18 gibt einen Überblick über die Dichte und Verteilung verfügbarer Aufschlussdaten im Modellgebiet mit der Angabe des erreichten Endhorizontes. Das Abfragegebiet umfasst den Koordinatenraum (Gauss-Krüger): 5652500, 4511700 (NW-Ecke) bis 5610900, 4576200 (SE-Ecke). Der eingezeichnete Umriss markiert die Begrenzung der Vorerzgebirgssenke.

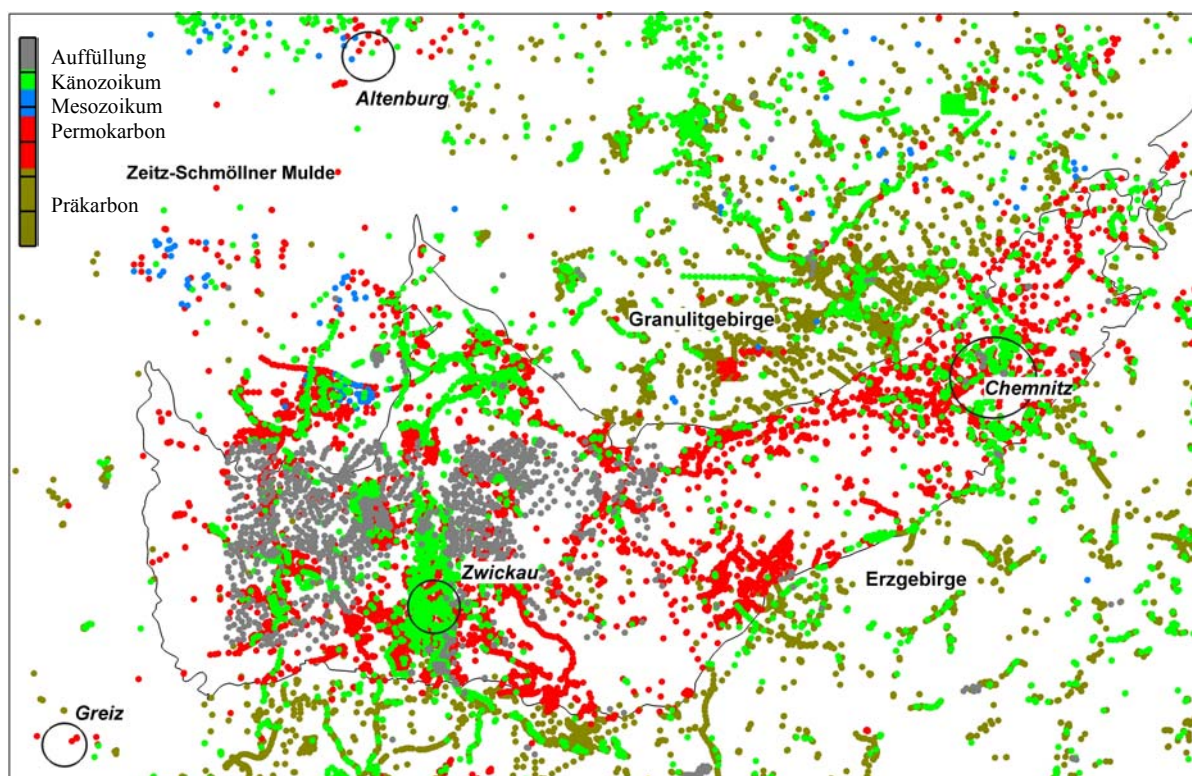


Abbildung 18 Dichte und Verteilung von Aufschlussdaten mit Kennung des Endhorizontes

Aufschlussdaten im Bereich des Landes Thüringen

Für den nordwestlichen Bereich des weiteren Modellgebietes der bereits im Land Thüringen liegt wurden Aufschlussdaten in verschiedener Form vom TLUG bereit gestellt (Abschnitt 2.5.1). Sie bildeten die Grundlage der Aufschlussdatenbank Thüringen zum Modellgebiet. Aufgrund des kleinen Gebietes und der geringen Aufschlussdichte standen nur wenige tiefere Aufschlüsse zur Verfügung (Tabelle 35).

Tabelle 35 Aufschlussdaten in der Aufschlussdatenbank Thüringen

Anzahl/ erschlossene Schichten	gesamt	tiefer 15m	0-15m	nicht verwendbar
Anzahl Aufschlüsse,	33	17	7	9
Anzahl der Schichtansprachen	350	343	7	-
davon - Känozoikum		106		-
- Trias		92		-
- Zechstein		124		-
- Rotliegendes		18		-
- Silur		10		-

Die Datenbankauszüge des FIS Hydrogeologie des LFUG Sachsen zum Stichtag 18.08.2006 wurden zunächst in je eine Aufschluss- und Schichtdatenbank (Anlage 6) überführt und dort ausgewertet. Die Aufschlussdatenbank führt u.a. Grund- und Stammdaten aller Aufschlüsse und darauf aufbauende Berechnungen. In der Schichtdatenbank wurden alle erfassten Schichten, zugeordnete Eigenschaften und Auswertungen gespeichert. Die folgenden Angaben beziehen sich, wenn nicht anders angegeben, auf diesen Stichtag der Datenbankabfrage.

Aufschlussdatenbank Sachsen: Aufschlussorientierte Auswertung

90% der Aufschlüsse im Modellgebiet weisen Teufen von weniger als 25m auf (Tabelle 36). Nur rund 1% (687) der Aufschlüsse sind tiefer 100m, 0,6% (297) tiefer als 200m. Rund 59% (16.500) der Aufschlüsse des Modellgebietes liegen in der Vorerzgebirgssenke, die übrigen im Umland. Bei knapp 5% ist die stratigraphische Zuordnung unsicher, bei 1,1% der Aufschlussdaten liegen keine hydrogeologischen Schichtdaten vor.

Tabelle 36 Kurzcharakteristik Aufschlussdaten, Allgemeine Angaben und Teufen

Allgemeine Angaben							Anzahl			%
Aufschlüsse, gesamt							27.957			100
- davon Aufschlüsse im unmittelbaren Bereich der VES							rund 16.500			59
- davon Lageduplikate ¹⁾ (Lagekoord. wurden angepasst)							159			0,57
- davon ohne hydrogeologische Schichtdaten							298			1,1
- davon ohne sichere stratigraphische Zuordnung							1.345			4,81
- davon mit Angaben zu hydraulischen Kennwerten							902			3,2
Aufschlussverteilung nach Teufenintervallen [m u GOK]										
0-<5	5-10	10-25	25-50	50-75	75-100	100-200	200-500	500-1000	>1000	Teufe [m u GOK]
1232	7882	5150	1157	427	332	390	130	127	40	Anzahl
2										
44,07	28,19	18,42	4,14	1,53	1,19	1,39	0,46	0,45	0,14	%
44,07	72,27	90,69	94,83	96,36	97,54	98,94	99,40	99,86	100,00	% kumulativ

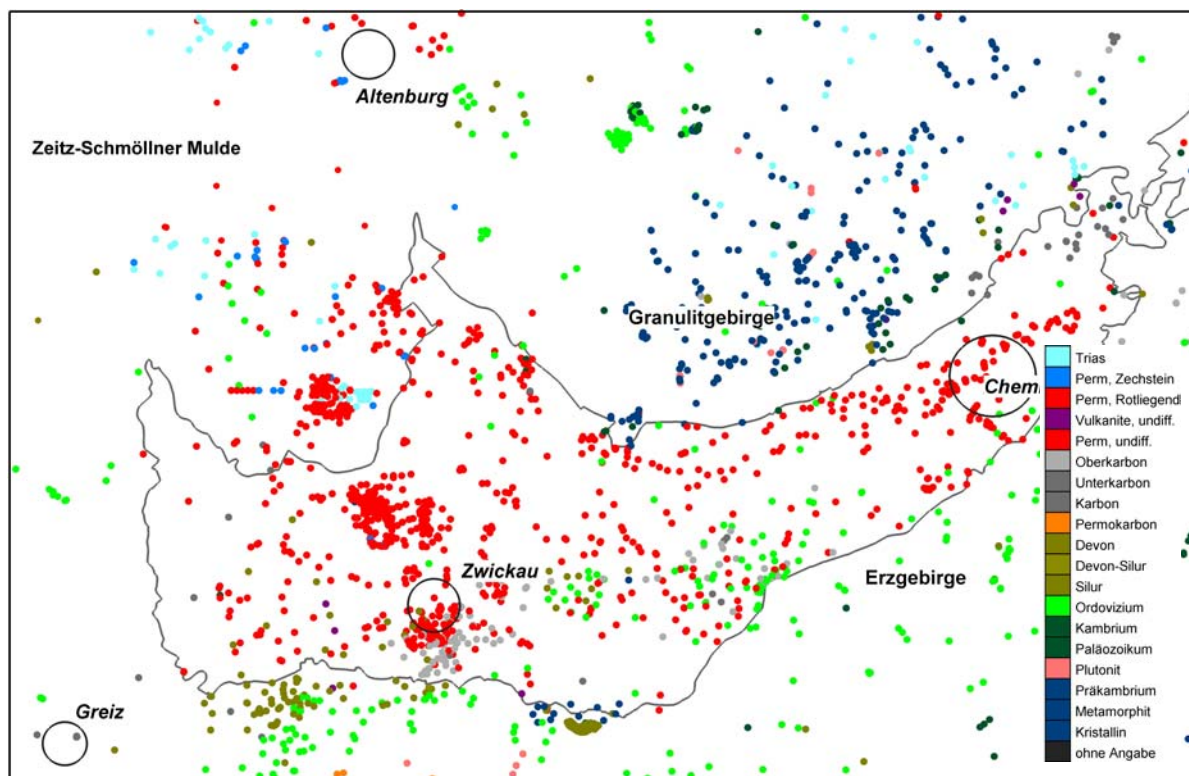


Abbildung 19 Verteilung von Aufschlussdaten mit Teufen größer 25m mit Kennung des Endhorizontes (inklusive Aufschlussdaten Thüringen)

Rund 23% der Aufschlussdaten sind Quartäraufschlüsse, 67% erschließen paläozoische und ältere Schichtenfolgen (Tabelle 37). Abbildung 19 zeigt die Verteilung von Aufschlussdaten mit Teufen von mehr als 25m mit Angabe des erreichten Endhorizontes.

Knapp 38% (10.501) der Bohrungen wurden bis in das Rotliegende abgeteuft (Endteufe). Insgesamt erschließen rund 11.000 stratifizierte Aufschlüsse das Rotliegende. Davon sind rund 86% (9500) weniger als 25m tief, 14% oder 1500 Aufschlüsse erreichen Teufen von mehr als 25m. Die Qualität der stratigraphischen Ansprache (Auflösung, Plausibilität) ist dabei sehr unterschiedlich.

Tabelle 37 listet zudem die Verschlüsselung der stratigraphischen Horizonte (HOR) und Materialzuweisungen (MAT in Spalte ID) für die Auswertung in der Aufschlussdatenbank und das GMS-Aufschlussdatenmodell auf (Anlage 6). Das GMS-Aufschlussdatenmodell wurde auf Grundlage der Aufschlussdatenbank erstellt und diente innerhalb von GMS zusammen mit dem Schichtdatenmodell (siehe unten) zur Anpassung des hydrogeologischen Strukturmodells an die aktuell im FIS-Hydrogeologie erfassten Aufschlussdaten.

Tabelle 37 Kurzcharakteristik Bohrlochmodell-Aufschlussdaten, Stratigraphie

Erreichtes stratigraphisches Niveau bzw. Gesteinstyp bei Endteufe	Anzahl Aufschlüsse				ID ¹⁾	
	einzel (Anzahl, %)		kumulativ (Anzahl, %)		HOR	MAT
ohne stratigraphische Angabe	1.344	4,81	1.344	4,81	98	9000
Auffüllung	314	1,12	1.658	5,93	26	100
Quartär	6.441	23,04	8.099	28,97	25	300
Tertiär	853	3,05	8.952	32,02	24	400
Känozoikum, undifferenziert	71	0,25	9.023	32,27	23	500
Kreide	32	0,11	9.055	32,39	22	1500
Trias (Keuper)	3	0,01	9.058	32,40	21	3200
Trias (Buntsandstein)	130	0,46	9.188	32,86	20	3400
Trias, undifferenziert	1	<0,01	9.189	32,87	19	3500
Perm (Zechstein)	322	1,15	9.511	34,02	18	4500
Perm (Rotliegend)	10.501	37,56	20.012	71,58	17	5000
Perm, undifferenziert	751	2,69	20.763	74,27	15	5500
Oberkarbon	381	1,36	21.144	75,63	14	5600
Unterkarbon	126	0,45	21.270	76,08	13	5700
Karbon, undifferenziert	75	0,27	21.345	76,35	12	5800
Permokarbon, undifferenziert	77	0,28	21.422	76,62	11	5900
Devon	455	1,63	21.877	78,25	10	6000
Lochov (Devon/Silur)	2	0,01	21.879	78,26	9	6100
Silur	78	0,28	21.957	78,54	8	6200
Ordovizium	2447	8,75	24.404	87,29	7	6300
Kambrium	1050	3,76	25.454	91,05	6	6400
Paläozoikum, undifferenziert	437	1,56	25.891	92,61	5	7000
Präkambrium	1951	6,98	27.842	99,59	3	8000
Vulkanite	10	0,04	27.852	99,62	16	5400
Plutonite	27	0,10	27.879	99,72	4	7500
Metamorphite	26	0,09	27.905	99,81	2	8500
Kristallin	52	0,19	27.957	100,00	1	8800

¹⁾ Horizont- (HOR) und Material- (MAT) kennung in GMS

Unter den Materialkennungen (IDs) in GMS werden typische hydrogeologische und weitere Eigenschaften geführt. Materialien in GMS können sogenannte SOILs („Böden“) oder HGUs („Hydrogeological Units“) sein (siehe unten). Da diese Kennungen global in GMS verwendet werden sind die im Rahmen der Arbeit verwendeten Material-IDs (Soils und HGUs) eindeutig (vgl. Tabelle 37, Tabelle 39 und Tabelle 47).

Aufschlussdatenbank Sachsen: Schichtdatenorientierte Auswertung

Zu den im FIS-Hydrogeologie am 18.08.2006 für den Modellraum abgefragten 27.659 Aufschlussdaten sind **174.953 Schichtdatensätze** erfasst.

Die Auswertung der Schichtdateninformationen wurde unter Verwendung der Datenbanken/Kalkulationsprogramme MS-ACCESS und MS-EXCEL durchgeführt.

Tabelle 38 zeigt die Aufschlüsselung aller Schichtdatensätze auf verschiedene stratigraphische Horizonte.

Tabelle 38 Anzahl der Schichtdatensätze in stratigraphischer Aufschlüsselung

Horizont	Anzahl Schichtdatensätze	Anteil an Gesamtzahl der Schichtdaten [%]	
		absolut	kumulativ
keine Zuordnung	1.184	0,7	0,7
Quartär, davon	92.735	53,0	53,7
anthrop. Bildungen	30.022	17,2	-
Tertiär	7.305	4,2	57,9
Prä-Tertiär, davon	73.729	42,1	
Mesozoikum	1.488	0,9	58,8
Permokarbon	48.689	27,8	86,6
Prä-Karbon	23.552	13,5	(100)

Die große Mehrzahl der erfassten Schichtendaten beschreiben quartäre Ablagerungen (Tabelle 38) und/oder sind an sehr flache Aufschlüsse gebunden (Tabelle 36). Diese oberflächennahe Zone ist u.a. durch die landesamtliche hydrogeologische Kartierung des oberen Grundwasserleiters/Grundwasserstockwerkes (HYK50 2006, HÜK200 2006, TLUG 2006) hydrogeologisch hinreichend beschrieben (Abschnitt 4.9.4.1., Tabelle 46).

Verbleibend sind, auch im Sinne der Zielstellung der vorliegenden Arbeit, die tieferen Bereiche, unterhalb der Auflockerungszone/des oberen GWL von vorrangigem Interesse. Die weitere schichtdatenbezogene Auswertung bezieht sich deshalb auf Schichtansprachen von Aufschlüssen tiefer als 15m. In 3.977 der 27.659 vorhandenen Aufschlüsse sind insgesamt 40.665 dieser tieferen Schichtdaten erfasst (Tabelle 39). Abbildung 20 zeigt eine perspektivische Darstellung der Aufschlüsse mit Teufen größer als 15m als Auskopplung aus dem 3D-Strukturmodell. Der eingezeichnete Umriss markiert die Begrenzung der Vorerzgebirgssenke.

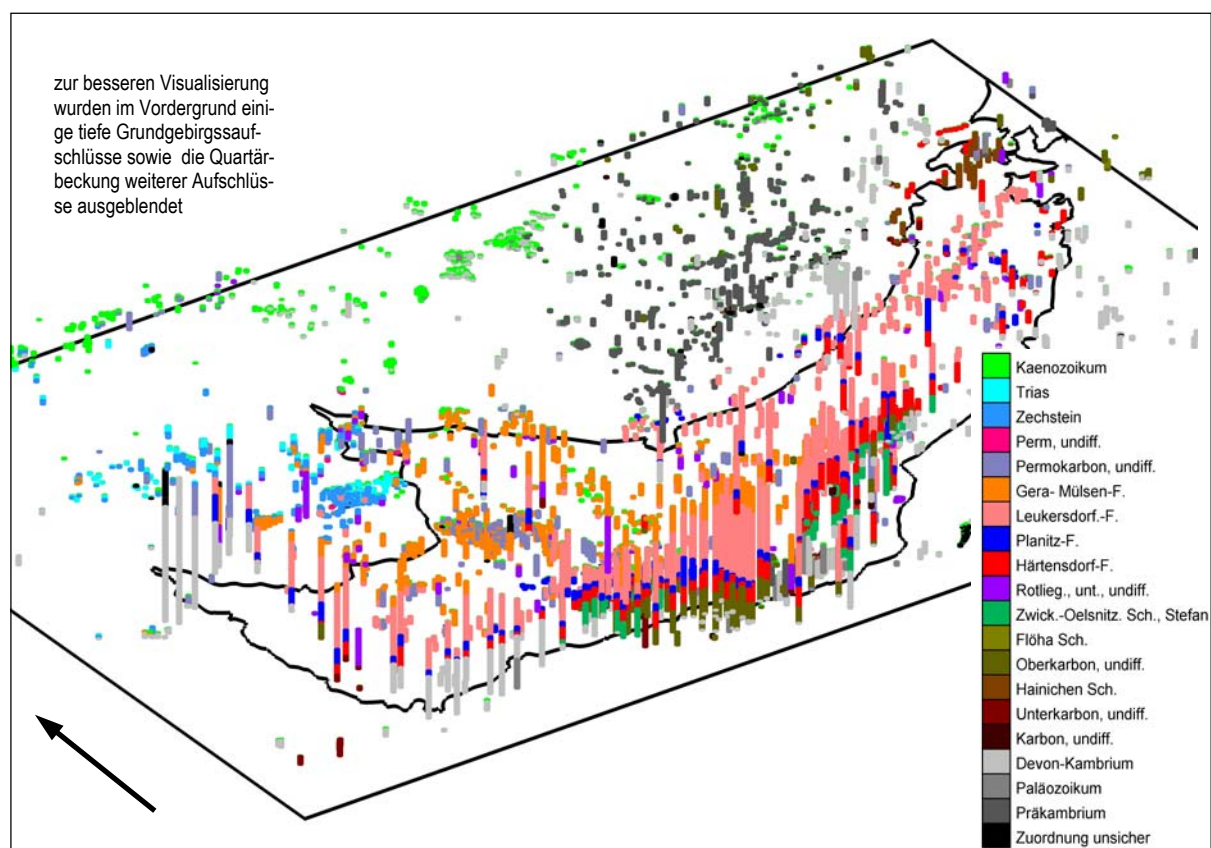


Abbildung 20 Aufschlüsse mit Teufen größer 15m, perspektivische Darstellung

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in der zugehörigen Aufschlussedatenbank (Anlage 6) für alle Aufschlüsse tiefer 15m auch die zugehörigen flacheren Schichtansprachen geführt. Die Gesamtzahl der Schichtdaten in diesen Aufschlüssen beträgt damit 59.704.

Tabelle 39 Schichtdatenbezogene Auswertung des FIS für Ansprachen tiefer 15m

Markerbezeichnung	Ansprachen / Bemerkungen	Anzahl Aufschlüsse	Ansprachen (Basis erreicht)	Hor/ Soil ID ¹⁾	HGU/ Nr. ⁵⁾
Anthrop. Ablag.		2570	1141 (1068)	80	Kaeno- zoikum (120)
Quartär		8798	3076 (2960)	79	
Quartär/Tertiär	undifferenzierte Ansprache	93	33 (30)	78	
Tertiär		4178	716 (497)	77	
Trias	überwiegend Buntsandstein	1013	240 (175)	76	Trias/119
Perm	undifferenzierte Ansprache	50	11 (0)	75	Perm/118
Zechstein, hemm. ²⁾	bindige Lithologien, div. Salze	1510	269 (74)	74	Zechstein/ 117
Zechstein, leitend ²⁾	Konglomerate, Sandst., Karbonate, Dolomite, Anhydrite, terrestr. Zechstein ohne Leine-Flg.	541	201	73	
Rotliegend	undifferenzierte Ansprache	1702	454 (26)	72	PK*/ 116
Gera-Mülsen-Folge	inkl. Ansprache Oberrotliegend	3332	570 (147)	71	MlsF/115
Leukersdorf-Folge		9190	685 (210)	70	LkF/114
Planitz-Folge		2424	287 (178)	69	PIF/113
Härtensdorf-Folge		2422	273 (184)	68	Htf/112

Markerbezeichnung	Ansprachen / Bemerkungen	Anzahl Aufschlüsse	Ansprachen (Basis erreicht)		Hor/ Soil ID ¹⁾	HGU/ Nr. ⁵⁾
Rotliegend, unteres	unddifferenziert inkl. Rochlitz-F.	788	157	(14)	67	RU*/111
Permokarbon	undifferenzierte Ansprache	90	8	(5)	66	PK*/116
Zwickau-Oelsnitz-Sch.	inkl. Ansprache Stefan	1943	85	(32)	65	ZO*/110
Flöha-Schichten		65	3	(1)	64	FIS*/109
Oberkarbon, sed. ³⁾	undiff. Ansprache, Eingrenz. nach Lithologie	3664	125	(57)	63	Oberkarbon, undiff. /108
Oberkarbon, extrusiv ³⁾		42	5		62	
Oberkarbon, intrusiv und metamorph ³⁾		371	92		61	
Hainichen Schichten	inkl. Anspr. Mittelsächs. Kulmgruppe, Vise	232	23	(0)	60	HaS*/107
Unterkarbon	undifferenzierte Ansprache	320	65	(31)	59	UntK*/106
Karbon	undifferenzierte Ansprache	85	32	(2)	58	Karbon/105
Devon ⁴⁾	alle Ansprachen	6315	272	(15)	57	Devon bis Kambrium /104
Devon/Silur ⁴⁾	alle Ansprachen (Lochkov)	67	12		56	
Silur ⁴⁾	alle Ansprachen	998	106		55	
Ordovizium ⁴⁾	alle Ansprachen	2360	388		54	
Kambrium	inkl. Kambroordovizium	1272	181		53	
Paläozoikum	undiff. Ansprache; unklare Zuord.	519	84	(8)	52	Paläoz./103
Präkambrium	einschließl. Übergang Kambrium/Proteroz.	2289	534	(8)	51	Präkambrium/102
Sedimentgesteine	Sedimentgest.unklarer Zuordnung	94	84	-	50	Zuord. unsicher/101
Stratigraphie unklar	unklare stratigraph. Zuordnung	367	235	-	49	

* PK=Permokarbon, RU=Unterrotliegendes, ZO=Zwickau-Oelsnitz Schichten, FIS=Flöha Schichten, HaS=Hainichen Schichten, UntK=Unterkarbon, undiff., ¹⁾ Horizont- (HOR) und Material- (MAT) kennung in GMS ²⁾ „grundwasserleitend“ bedeutet hier „potentiell grundwasserleitend“ aufgrund mittel- bis grobklastischer ($\geq$ Feinsandfraktion), bzw. entsprechend klüftungsfreundlicher oder zu Karst neigender Lithologien. Schichtansprachen mit im allgemeinen grundwasserhemmenden Petrographien können im Einzelfall auch eine „leitende“ Horizontkennung zugewiesen werden, wenn der zugehörige stratigraphische Horizont insgesamt aus petrographischer Sicht eher „grundwasserleitende“ Eigenschaften besitzt (Stratigraphiezugehörigkeit hat Priorität über Lithologie) ³⁾ inklusive undifferenzierte Ansprachen zu Westfal und Namur ⁴⁾ Differenzierung of unsicher ⁵⁾ HGU: GMS Hydrogeological Unit, Kurzbezeichnung/ Nummer

Die Schichtdaten wurden entsprechend ihrer stratigraphischen bzw. petrographischen Ansprache in Horizonte unterteilt. Die Horizontenteilung ist Grundlage des Aufschlussesdatenmodells in GMS. Horizonte wurden weiterhin als GMS- HGUs (Hydrogeological Units) kodiert (Tabelle 39). Dieses dient u.a. der Profilerstellung in GMS.

Schichtdatenqualität und Plausibilitätsprüfung

Die Qualität der Schichtansprachen ist in den knapp 60.000 Datensätzen sehr unterschiedlich, meist zurückzuführen auf die stark schwankende Dichte und Qualität von den der Datenbank zugrunde liegenden Aufschlussedokumentationen.

Im Rahmen der Datenaufbereitung erfolgte eine Plausibilitätsprüfung der einzelnen Einträge. Ziel war es die Ansprachen in Hinblick auf ihre Relevanz für das hydrogeologische Modell zu prüfen und falls notwendig zu korrigieren bzw. entsprechend auszuweisen.

Die Prüfung und Korrektur erfolgte zunächst über Abfragen in der Aufschlussesdatenbank in ACCESS und EXCEL (Anlage 6). Verbliebene Inkonsistenzen wurden durch Einzelfallprüfungen und Abgleich mit dem bisherigen GOCAD- und GMS-Strukturmodell sowie auf Grundlage geologischer Karten geprüft, korrigiert oder entsprechend ausgewiesen (als stra-

tigraphischer Bereich oder als nicht zuordbar). Eine Einzelfallrecherche konnte aufgrund der großen Anzahl von Schichtdaten nicht durchgeführt werden.

Die rotliegenden bis oberkarbonen Ansprachen im Bereich der Vorerzgebirgssenke zeigten sich insgesamt als relativ schlüssig. Auch die Schichtdokumentationen des Zechsteins und Mesozoikums des nordwestlichen Modellgebietes (Pforte von Meerane) wiesen geringe Widersprüche auf.

Allgemein geringe Fehlerquoten konnten für das känozoische Deckgebirge verzeichnet werden. Diese betrafen zumeist die Nichtausweisung anthropogener Ablagerungen als solche, sowie die Ausweisung quartärer Sedimente als Tertiär und umgekehrt.

Die meisten Fehlansprachen betrafen Schichtansprachen prä-oberkarbonen Alters im nördlichen Granulitgebirgs- und südlichen Erzgebirgsbereich. Hier waren die Ansprachen mancher kompletter Aufschlüsse so widersprüchlich, dass eine Zuordnung unmöglich bzw. nur in grober stratigraphischer Auflösung möglich war. So war die Differenzierung der präkarbonen Gesteinseinheiten oft unsicher, insbesondere die Unterscheidung devoner bis ordovizischer Gesteine. In zahlreichen Aufschlüssen war die Zuweisung proterozoischer und karboner Ansprachen offensichtlich inkorrekt. War die Konsistenz des Aufschlusses insgesamt durch plausible Korrektur von einzelnen Schichtansprachen nicht herzustellen, wurde eine Zusammenfassung der Ansprachen auf Grundlage der Häufigkeit, Abfolge und Plausibilität der Einzelansprachen bzw. durch entsprechende Ausweisung der Problemhorizonte durchgeführt. Aufgrund der höheren Relevanz der permokarbonen bis känozoischen Folgen für das hydrogeologische Modell, wurden dort verallgemeinernde Zusammenfassungen weitgehend vermieden.

Die Korrekturen der Schichtansprachen für die Verwendung im hydrogeologischen Modell sind im Einzelfall in der Schichtdatenbank (Anlage 6) dokumentiert.

4.8.4 Die hydrogeologischen Einheiten

Die Modellierung der großräumig verbreiteten hydrogeologischen Einheiten als Flächen (Surfaces/TINs) und Körper (Solids) wurde zunächst mit GOCAD durchgeführt (Abschnitt 2.9). Dann erfolgte der Export in GMS (Abschnitt 2.10). Wichtigste Schnittstelle war hier ein von HADRYANTO (2003) und dem Autor entwickelter FORTRAN-Code (Abschnitt 2.10.3), der die GOCAD- Raumpörper und Flächen in die entsprechenden GMS-Formate umschrieb. In GMS erfolgte eine Anpassung und Ergänzung des hydrogeologischen Strukturmodells sowie die Parametrisierung für die hydraulische Modellierung (Abschnitt 4.9). In diesem Zusammenhang wurde eine weitere Differenzierung des primären hydrogeologischen Modells durchgeführt. Dies betraf insbesondere die Auflockerungszone, die Gera-Mülsen-Folge, den nordwestlichen Abstrombereich (Zechstein und Mesozoikum) und das Grundgebirge.

Das hydrogeologische Strukturmodell enthält, vom Hangenden zum Liegenden, die folgenden hydrogeologischen Einheiten: Auflockerungszone, Quartär, Tertiär, Buntsandstein und Zechstein am nordwestlichen Modellrand, Gera-/Mülsen-Folge, Leukersdorf-Folge (hangender Bereich), Leukersdorf-Folge (liegender Bereich), Planitz-Folge, Härtensdorf-Folge (hangender Bereich, lokal weiter untergliedert), Härtensdorf-Folge (liegender Bereich), Westfal C/D (Zwickau-Oelsnitzer Schichten), Grundgebirgsbereiche/Umland.

Leitgedanke bei der Modellierung

Die Entscheidung welche hydrogeologischen Einheiten im Model wie berücksichtigt wurden (Genauigkeit, Untergliederung) leitet sich insbesondere aus der Kombination von hydrogeologischem Kenntnisstand und Zielen/Schwerpunkten für die hydrogeologische Modellierung ab.

Randbedingung Kenntnisstand:

- relativ guter Kenntnisstand zum obersten Grundwasserleiter/-stockwerk, aber auch hier regional und in Abhängigkeit von der anstehenden hydrogeologischen Einheit sehr unterschiedlich: Guter bis mittlerer Kenntnisstand (Quartär und Gera-Mülsen-Folge) bis i.d.R. geringer Kenntnisstand (Leukersdorf-, Planitz- und Härtensdorf-Folge)
- Konzentration von Informationen in Flusstälern und Störungsbereichen
- Konzentration von Informationen in den Bergbaugebieten, gleichzeitig dort aber massive Störung der natürlichen hydrogeologischen Bedingungen
- Sehr geringe Kenntnisse zu den hydraulischen Eigenschaften der Gesteine in den tieferen Grundwasserstockwerken
- Sehr geringe Kenntnisse zur Übertragbarkeit hydraulischer Eigenschaften oberflächennaher Folgen auf tiefer gelegene stratigraphisch vergleichbare Einheiten bzw. zur Ableitung von Tendenzen aus der oberflächennahen hydraulischen Situation für tiefere Bereiche

Resultierende Hauptziele/Schwerpunkte:

- Großmaßstäbliche verallgemeinernde Betrachtungsweise: Die Vorerzgebirgssenke und ihre Anbindung an das Umland
- Simulation der hydraulischen Verhältnisse im Sinne der Entwicklung von Szenarien:
 - Schwerpunkt: Regionaler und überregionaler Grundwasserfluss
 - Schwerpunkt: Tiefe Grundwasserströmung
 - Schwerpunkt: Grundwasserfluss entlang tektonischer Strukturen

Bei der Auswahl der im Modell zu berücksichtigenden hydrogeologischen Einheiten ist deshalb eine Zusammenfassung und Verallgemeinerung notwendig. Dies kann im Einzelfall zu einer Glättung von spezifischen strukturellen und hydraulischen Informationen in kleinräumigen Bereichen führen (vgl. Abschnitt 4.8.1), z.B. wenn die Informationsdichte dort wesentlich differenzierter ist als in den umliegenden Bereichen. So ist die räumliche Abgrenzung höher durchlässiger Bereiche von gering durchlässigen Bereichen oft äußerst problematisch, so z.B. bei Einschaltungen von lithologisch unterschiedlich ausgebildeten Linsen innerhalb der Leukersdorf-Folge und der Härtensdorf-Folge.

Es ist im vorgegebenen Maßstab und aufgrund der bekannten starken räumlichen Inhomogenität der hydrogeologischen Eigenschaften nicht sinnvoll lokal weitere hydrogeologische Einheiten zu definieren, deren Übertragbarkeit auf Nachbarregionen rein spekulativ ist.

Allerdings gehen solche (hydraulischen) Detailinformationen einerseits in die Ableitung der größeräumigen hydraulischen Parameter ein. Andererseits können sie im Rahmen der Parametrisierung des Modells in gewissem Umfang berücksichtigt werden (Abschnitt 4.9.4).

Auflockerungszone

Die oberflächennahe Verwitterungs- oder Auflockerungszone umfasst den Bereich der obersten 25m aller hydrogeologischen Einheiten und damit in grober Näherung den Bereich der Einwirkung oberflächennaher Verwitterungs- und Entspannungsprozesse auf die Gesteinen.

Da die Teufenwirkung von Verwitterungs- bzw. Auflockerungsprozessen in Abhängigkeit von der anstehenden hydrogeologischen Einheit und tektonischen Beanspruchung stark schwankt dient diese Auflockerungszone im Rahmen der hydraulischen Modellierung lediglich als Ausgangspunkt für die Parametrisierung der oberflächennahen Bereiche des hydrogeologischen Modells anhand von Durchlässigkeitsklassen des oberen Grundwasserleiters (Abschnitt 4.9).

Quartär

Die Quartärverbreitung wurden der Hydrogeologischen Karte 1:50.000 (ZGI 1984) entnommen und für den Bereich Zwickau unter Nutzung von Kenntnissen aus der "Komplexuntersuchung zu Auswirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus im Raum Oelsnitz-Zwickau" (BRAUSE 1999) lokal präzisiert. Kleinermaßstäbliche Vorkommen sind i.d.R. nicht berücksichtigt.

Die Mächtigkeit des Quartär wurde aus den im FIS Hydrogeologie erfassten Bohrdaten abgeleitet. Lokal wurden weitere Einzelaufschlüsse verwendet (BFS 1999). Für Bereiche ohne Angaben wurden Mächtigkeiten aus nächstgelegenen Aufschlüssen oder aus der Auswertung von Unterlagen (Abschnitt 4.2) abgeleitet. Drei Einschränkungen sind bei der modellierten Quartärverbreitung zu beachten (diese gelten in abgeschwächter Form auch für das Tertiär, vgl. unten).

Erstens, erschwerte der im Höhenmodell enthaltene Fehler in der Geländehöhe (Abschnitt 4.8.2) die Modellierung der Quartärbasis, da die Mächtigkeit des Quartärs selbst meist nur wenige Meter beträgt und selten über 5-10m hinausgeht. Darüber hinaus kann, insbesondere in Bereichen mit wenigen aufschlussbasierten Stützpunkten der Quartärbasis, die interpolierte Quartärbasis erheblich von der Realität abweichen. So kann sie lokal einerseits zu tief liegen, was überhöhte Mächtigkeiten vortäuscht. Im anderen Extrem liegt die modellierte Quartärbasis dann scheinbar über der Geländeoberfläche. In letzterem Fall wurde die Quartärbasis in Anlehnung an die umliegenden Mächtigkeiten unter das DGM verschoben. Das DGM mit seiner quasi unendlich hohen Aufschlusszahl stellt hier die obere Grenze dar.

Zweitens führt die unterschiedliche hohe Auflösung der beiden Flächen „DGM“ und „Quartärbasis“ in den Ausstrichbereichen des Quartärs zu einem weiteren Effekt. So überlagert an der Kontaktlinie die Quartärbasis scheinbar das DGM, obwohl alle Stützpunkte unterhalb des DGM liegen. Dieser Effekt wurde größtenteils durch Anpassungsoperationen in GOCAD ausgeglichen. Dabei wurde, bis auf Ausnahmen, auf eine manuelle Bearbeitung aufgrund des hohen Aufwandes verzichtet, gleichermaßen auf Verschneidungen beider Flächen, da dies Nebeneffekte wie die Veränderung des Ausstrichverlaufes nach sich zieht.

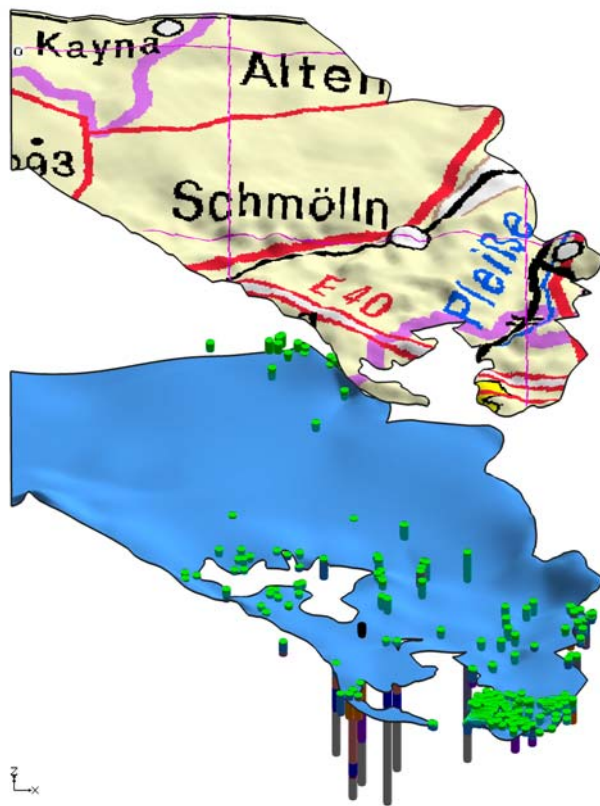
Und drittens, erwiesen sich die aus dem FIS-Hydrogeologie abgeleiteten Raumdaten zur Lage der Quartärbasis zum Teil als fehlerhaft. Einerseits wurden anthropogene Ablagerungen gelegentlich fälschlich dem (natürlichen) Quartär zugeordnet. Andererseits sind ein Teil der als Quartär erfassten Sedimente sicherlich tertiären Alters (und umgekehrt). Deutlich sichtbar wird diese Diskrepanz in der gemeinsamen Darstellung der aus dem FIS abgeleiteten

quartären Aufschlusspunkte und der Quartärverbreitung.

Für die Umsetzung des Quartärs im hydraulischen Modell wurde auf die direkte Übertragung der hydrogeologischen Einheit Quartär verzichtet. Dagegen wurde die im Rahmen der landesamtlichen hydrogeologischen Kartierung HyK 200 ausgehaltene Typ-Klassifizierung für den oberen Grundwasserleiter (HÜBSCHMANN 2006) in angepasster Form verwendet. Diese repräsentiert die Verteilung der hydraulischen Eigenschaften des oberen Grundwasserleiters bzw. Grundwasserleitestockwerkes in ihrer Gesamtheit weitaus besser (Abschnitt 4.9.4).

Tertiär

In das Modell wurden die wichtigsten, größeren Tertiärvorkommen (nach ZGI 1984) integriert. Die Mächtigkeiten wurden wie beim Quartär aus der Aufschlussdatenbank des FIS-Hydrogeologie abgeleitet. Lokal traten wie im Quartär auch bei der Modellierung des Tertiärs die durch Interpolationsfehler und den Fehler des Höhenmodells bedingten Probleme auf (vgl. Absatz Quartär). Allerdings waren diese aufgrund der höheren Mächtigkeiten des Tertiärs weniger relevant. Ebenso gelten die fürs Quartär festgestellten Einschränkungen in bezug auf die Ausstrichbereiche und die Fehleinordnung quartärer bzw. anthropogener Ablagerungen als Tertiär im FIS Hydrogeologie.



Trias und Zechstein

Im Bereich der nordwestlich an die VES angrenzenden Pforte von Meerane und Fortsetzung in die Zeitz-Schmöllner Mulde treten auch Gesteine des Zechstein und der Trias auf (Abschnitt 3.2), die für die hydraulische Anbindung der VES und das nordwestliche Umland von Bedeutung sind (Abschnitt 4.2, Anlage 3). Die Aufschlussituation insbesondere in Bezug auf die tieferen Bereiche ist hier sehr ungünstig, was weiten Raum für Interpretationen lässt. Die besonderen hydrogeologischen Eigenschaften dieser Abfolgen wurden auch bei der Parametrisierung des hydraulischen Modells entsprechend berücksichtigt (Abschnitt 4.9).

Abbildung 21 Perspektivische Darstellung der Basis Trias im NW des Modellgebiets (4fach überhöht)

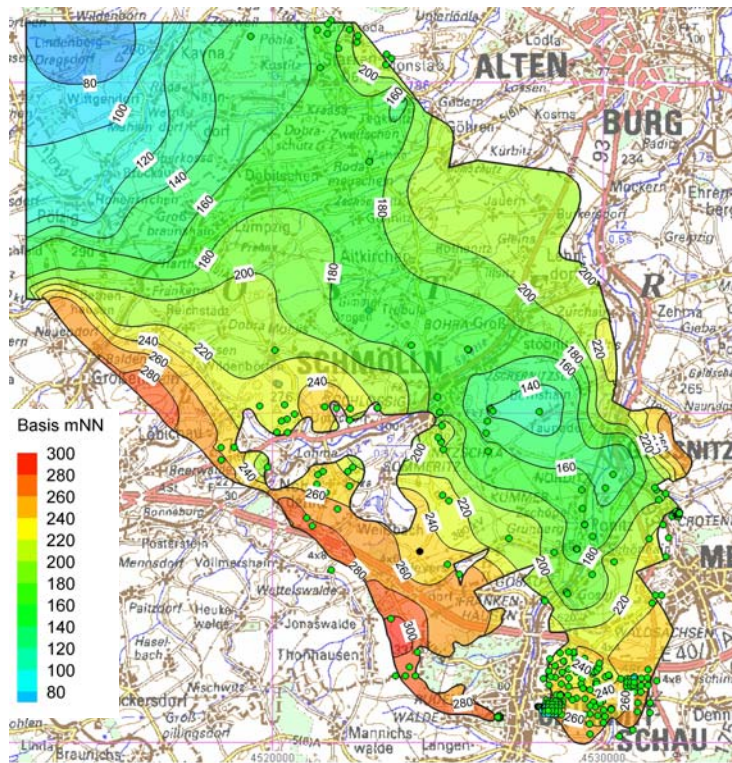


Abbildung 22 Basiskonturen Trias mit Aufschlussdaten

Gera-/ Mülsen-Folge

Grundlage der Modellierung der hydrogeologischen Einheit Gera-Mülsen-Folge bildeten im wesentlichen die Bohrungsdaten in der Aufschlussdatenbank des FIS-Hydrogeologie. Darüber hinaus gingen weitere Daten aus Schächten/ Grubenrissen im Zwickauer Revier, Bohrungsdaten der Wismut, Angaben zur Verbreitung aus hydro-/geologischen Karten (ZGI 1984, GK25 1875-1911) und Informationen aus den Basiskarten zur Kenntnisstandsanalyse der VES (GFE 1969) in die Modellierung ein. Die Gera-/ Mülsen-Folge weist in den meisten Bereichen sehr hohe Mächtigkeiten auf. Deshalb erreichen, außer in den Randbereichen, nur wenige Bohrungen die Basis der Folge.

Auch in Bereichen mit zahlreichen tiefen Bohrungen, so z.B. im Raum Zwickau-Helmsdorf, die Leukersdorf-Folge im Liegenden oft nicht erreicht. Aus diesem Grunde stützt sich die Modellierung der Basis der Gera-Mülsen Folge in zahlreichen Regionen nur auf wenige Stützstellen. Für das hydraulische Modell ist die Genauigkeit der Nachbildung der Gera-Mülsen-Folge in weiten Teilen, insbesondere im Zwickau-Helmsdorfer Raum ausreichend (Abbildung 24). Im Nordwesten des Gebietes läuft die Gera-Mülsen Folge in äquivalente Einheiten/ Zechstein im Bereich der Pforte von Meerane/ Zeitz- Schmöllner Mulde aus. Unter Verwendung „intelligenter“ Interpolationsalgorithmen (z.B. GOCAD-DSI) (Abschnitt 2.9.1) wurde versucht dennoch eine möglichst plausible Abbildung der Schichtbasis zu erreichen. Die Modellierung der Basisfläche lässt in Teilbereichen Hinweise auf tektonische Verschiebungen in der Gera-Mülsen-Folge erkennen, was auf eine Fortsetzung verschiedener Störungsbahnen bis in die Gera-/ Mülsen-Folge hindeutet.

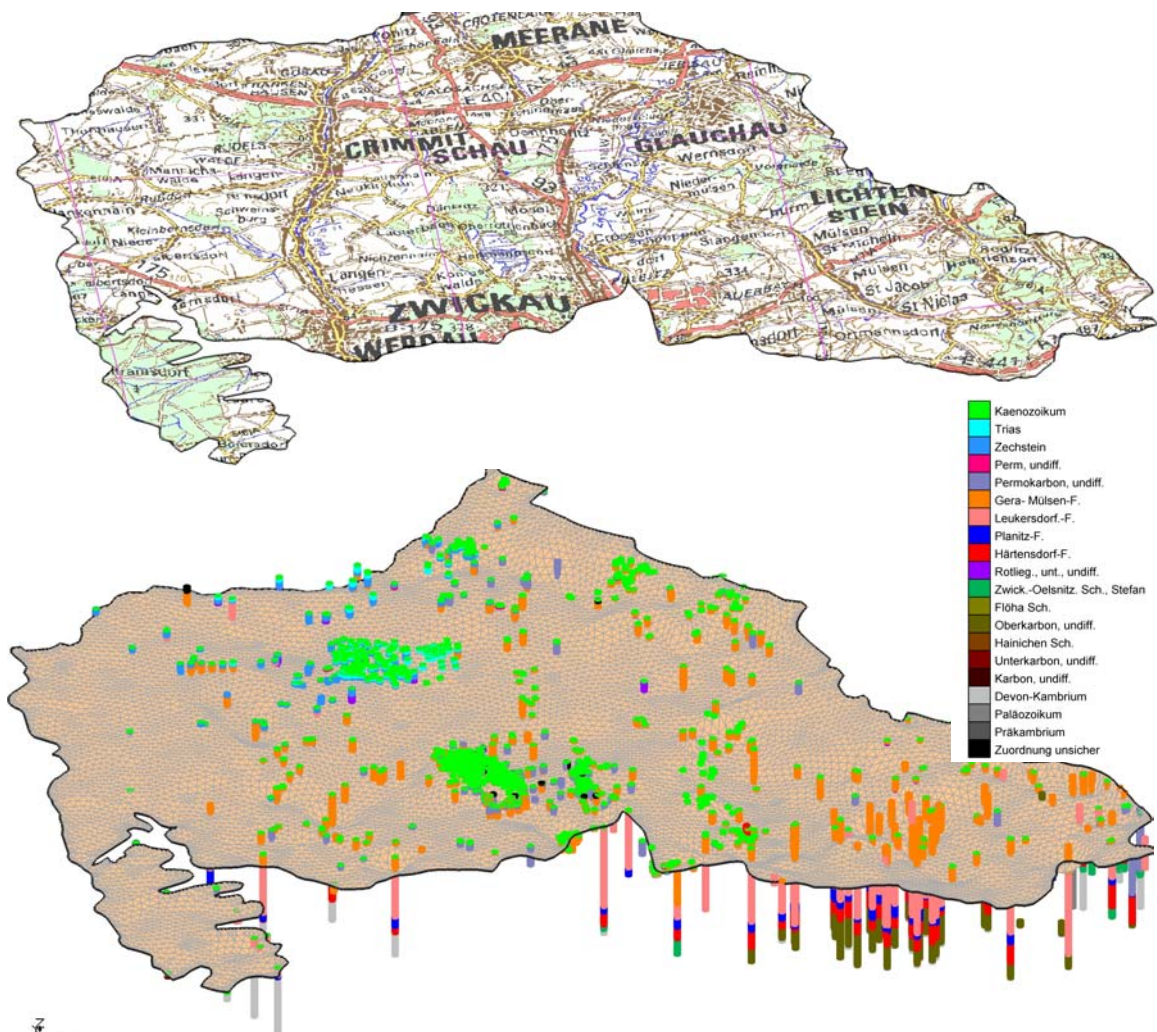


Abbildung 23 Aufschlussdaten mit Basislage der Mülsen-Folge

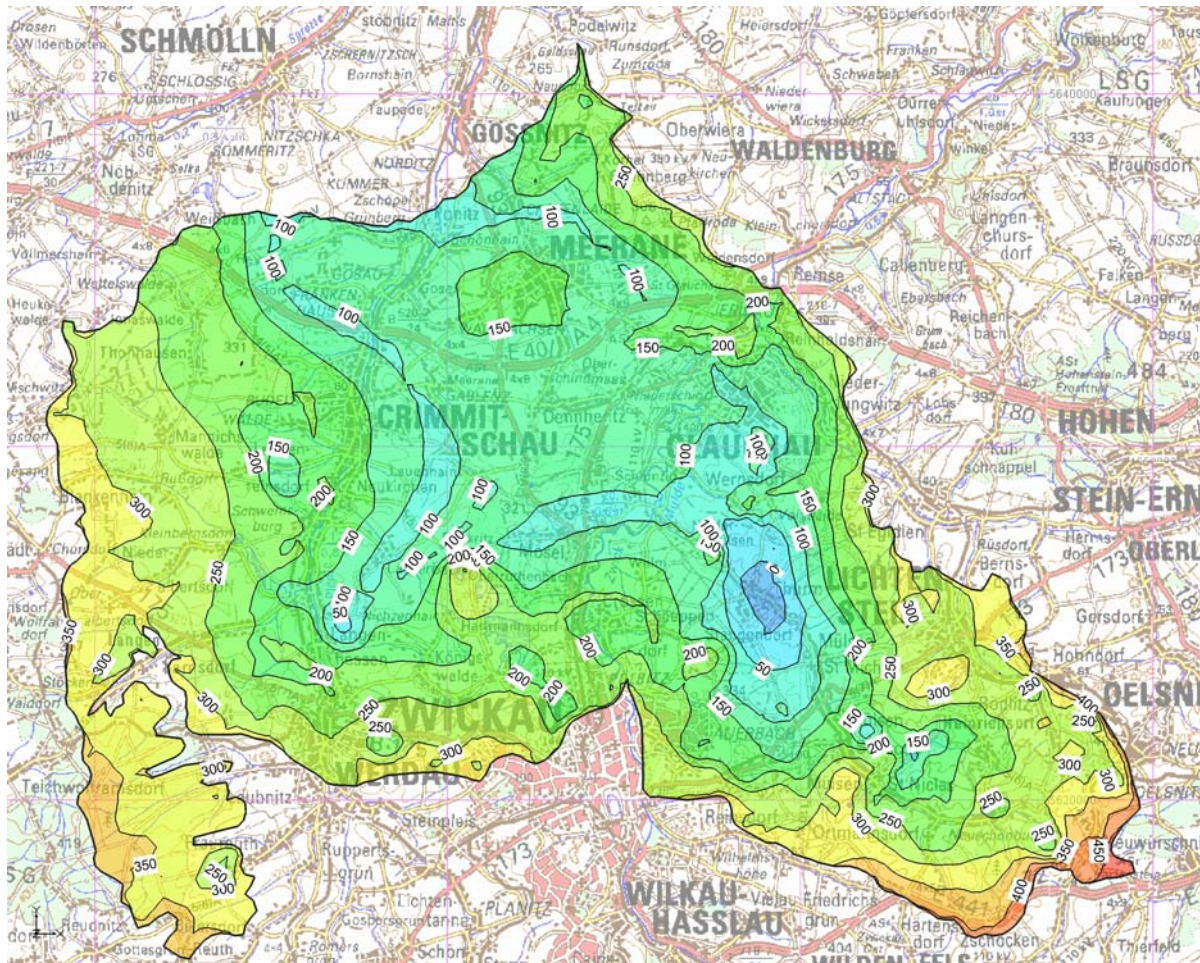


Abbildung 24 Basislage der Gera-Mülsen-Folge (Versetzungen geglättet)

Leukersdorf-Folge: Hangender und liegender Teil

Die Leukersdorf-Folge wurde im wesentlichen auf Grundlage der Aufschlussdatenbanken des FIS-Hydrogeologie und des TLUG modelliert. Auch hier gingen weiterhin, Bohrungsdaten der Wismut und Schachtdaten des Steinkohlenbergbaus, soweit nicht im FIS enthalten, sowie Angaben zur Verbreitung aus hydro-/geologischen Karten (ZGI 1984, GK25 1875-1911) und Informationen aus den Basiskarten zur Kenntnisstandsanalyse der VES (GFE 1969) in die Modellierung ein.

Die Bedeutung der Aufschlüsse des Steinkohlenbergbaus in Zwickau und Lugau-Oelsnitz für die Konstruktion der Basis der Leukersdorf-Folge nimmt im Vergleich zu den hangenden Einheiten deutlich zu, da die meisten Schächte die Basis der Leukersdorf-Folge durchteufen und deshalb Marker ihrer Tiefenlage vorlagen. In den beckenzentralen Teilen der VES sind für die Leukersdorf-Folge, wie auch für die liegende Planitz- und Härtensdorf-Folge, nur wenige Aufschlussdaten vorhanden. Hier wurde mit Expertenwissen (z.B. Berücksichtigung von Gesetzmäßigkeiten bei Sedimentationsvorgängen, der tektonischen Entwicklung des Gebietes – Abschnitt 3.3, Interpretationen Dritter) unter Verwendung geeigneter Interpolationstools in GIS und GOCAD (DSI) die vermutliche Lage der Basisfläche konstruiert. Allerdings sind größere Abweichungen von der realen Lage bis in den Bereich mehrerer 10er Meter möglich. Auch im Bereich der Leukersdorf-Folge sind aus den Aufschlussdaten ver-

schiedene Störungsindikationen ableitbar.

Innerhalb der Leukersdorf-Folge wurden im Ergebnis einer großmaßstäblichen verallgemeinernden Betrachtung zwei in ihrer Gesamtheit hydraulisch unterschiedlich wirkende Teil-Abfolgen unterschieden:

- Obere vorwiegend pelitische Abfolgen
- Tiefere vorwiegend psammitisch-psephitische Abfolgen

Diese Einteilung stellt zugleich den Ausgangspunkt der Parametrisierung der Leukersdorf-Folge im hydraulischen Modell dar (Abschnitt 4.9).

Abbildung 25 gibt einen Überblick über prä-känozoischen hydrogeologischen Einheiten im Vorerzgebirgsraum als Grundlage für die Umsetzung in das hydraulische Modellgitter (Parametrisierung) (Abschnitt 4.9).

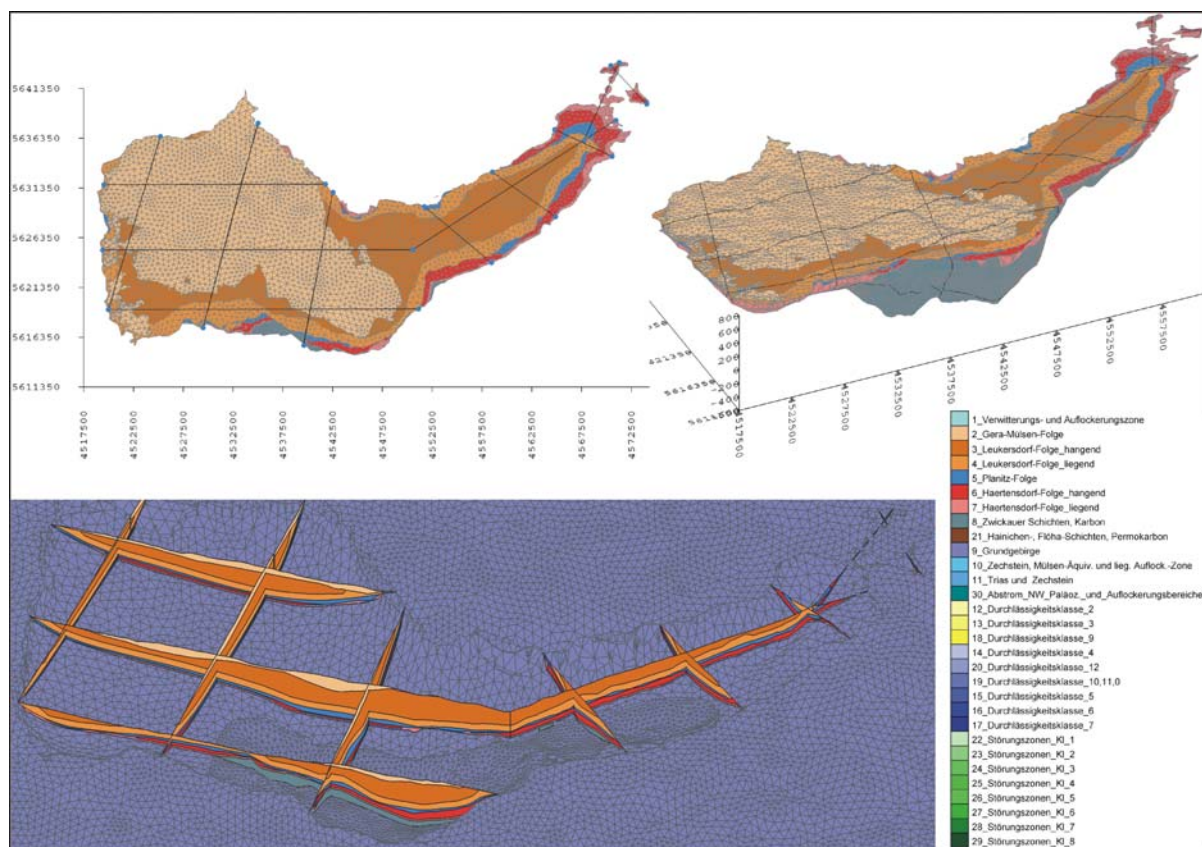


Abbildung 25 Hydrogeologische Einheiten im Vorerzgebirgsraum

Planitz-Folge und Härtensdorf-Folge (Hangender und liegender Teil)

Für die Modellierung der Tiefenlage der Basisflächen der Planitz- und Härtensdorf-Folge standen nur wenige Aufschlussdaten zur Verfügung. Dies betraf insbesondere die beckenzentralen Bereiche abseits der senkenrandlichen Ausstriche und der ehemaligen Steinkohlenreviere Zwickau und Lugau-Oelsnitz, in denen Schächte und Bohrungen diese Einheiten durchteufen.

In den zentralen Senkenbereichen gelten, bei vergleichbarer Methodik der Modellierung der

Planitz- und Härtensdorf-Folge deshalb die selben Einschränkungen wie für die Leukersdorf-Folge (siehe oben). In diesen Bereichen musste verstärkt auf die Annahmen der im Rahmen der Kenntnisstandsanalyse VES erarbeiteten Basiskarten (GFE 1969) zurückgegriffen werden. Die Abweichungen der modellierten Schichtbasis von der realen Lage kann auch hier bis mehrere 10er Meter betragen. Die für die Leukersdorf –Folge abgeleiteten Störungsindikationen setzen sich in der Planitz- und Härtensdorf-Folge fort.

Innerhalb der Härtensdorf-Folge wurden im Ergebnis einer großmaßstäblichen verallgemeinernden Betrachtung zwei gröberklastische Lagen ausgehalten, die sich hydraulisch vom übrigen Teil der Folge absetzen.

- Obere vorwiegend pelitische Abfolgen (4)
- Obere vorwiegend psammitisch-psephitische Abfolgen (3)
- Tiefere vorwiegend pelitische Abfolgen (2)
- Basale Konglomerate (1)

Diese Einteilung basiert auf der Auswertung geologischer und hydrogeologischer Anhaltspunkte und Indizien. Aufgrund der geringen Anzahl von Aufschlüssen und verwertbaren Schichtansprachen, insbesondere im tieferen Abschnitten der Härtensdorf-Folge, handelt es sich dabei aber um eine unsichere Annahme. Deshalb wurde im GMS-Strukturmodell bei Vernachlässigung der geringmächtigen hangenden gröberklastischen Lage (3), lediglich eine liegende gröberklastische (1) und eine hangende feinklastische Abfolge (2+4) unterschieden (Abbildung 25). Die 4-Schicht Gliederung wurde nur lokal und bei entsprechender Schichtzahl (layer) im 3D-Modellgitter in dieser Auflösung umgesetzt. (Abschnitt 4.9).

Karbon (Zwickau-Oelsnitzer Schichten)

Die Zwickauer Schichten (Westfal D) weisen gegenüber den Rotliegendfolgen einige Besonderheiten, welche die Methodik ihrer Modellierung beeinflussen. Zunächst ist die Verbreitung des Karbons deutlich engräumiger, da es in Richtung Beckenzentrum auskeilt und sich auf den Großraum Zwickau-Oelsnitz beschränkt (Abbildung 25). Darüber hinaus waren die Steinkohlen des Karbons Ziel eines intensiven Steinkohlenbergbaus in diesen Regionen. Dadurch ist es durch eine Reihe von Schachtaufschlüssen sowie durch Auffahrungen gut erschlossen.

Viele große Störungen, deren Fortsetzung im hangenden Rotliegenden vermutet wird, sind lagemäßig sicher nur aus dem Karbon bekannt (vgl. Abschnitt 4.8.5). Aufgrund des guten Kenntnisstandes wurde bei der Modellierung der Karbons eine mit höheren Gitterauflösungen gearbeitet um alle Stützpunkte zu berücksichtigen. Auch der Verlauf großer Störungen konnte im Karbon recht genau berücksichtigt werden.

Grundgebirge

Das die VES umgebende und unterlagernde altpaläozoische und proterozoische Grundgebirge setzt sich aus sehr unterschiedlichen Gesteinen zusammen (Abschnitt 3.2, Abbildung 25). Gemeinsam ist ihnen, dass sie im Vergleich zu den Einheiten des

- Quartär
- Tertiär
- Buntsandstein

- oberen Rotliegenden und Zechstein
- unteren Rotliegenden in Bereichen gröberklastischer Ausbildung
- der oberflächennahen Auflockerungszone insgesamt

sowie zu vielen Störungsbereichen im Rotliegenden, in aller Regel relativ geringe hydraulische Durchlässigkeiten aufweist. Im Rahmen der Kalibrierung des hydraulischen Modells wurden die Grundgebirgseinheiten, insbesondere im unmittelbaren Liegenden der permokarbonen und mesozoischen Einheiten bezüglich ihrer hydraulischen Parameter differenziert (Abschnitt 4.9).

Die Modellierung hydrogeologischer Einheiten dient der Abgrenzung von sich in ihren hydrogeologischen Eigenschaften grundsätzlich unterscheidenden Teilbereichen des Strukturmodells. Durch die Zuweisung eines einheitsspezifischen definierten Materials (Abschnitte 4.9.3 und 4.9.4) werden sie gleichzeitig Träger der primären hydraulischen Parametrisierung des hydraulischen Modellgitters.

4.8.5 Das strukturelle Inventar

Die Erfassung des tektonischen Inventars im digitalen hydrogeologischen Modell erfolgte zunächst in Form von Vektordaten auf Grundlage verschiedener Quellen, z.B. hydrogeologischer Karten, Gutachten und neuer Kartierungen des LfUG und TLUG (Abschnitt 2.5, Abbildung 11).

Ausgewählte Störungen und Kluftzonen wurden auch räumlich (Flächen, Körper), als eigenständige Elemente modelliert. Dazu gehören einerseits wichtige, meist weitreichende Störungen bzw. Störungszonen (Schichtversatz nachgewiesen) mit hydraulischer Anbindung an andere Störungssysteme. Andererseits werden darunter auch wichtige hydraulisch aktive Kluftzonen erfasst. Zu letzteren zählt z.B. die Lungwitztalzone (LTZ). Bei beiden handelt es sich um Strukturen mit nachgewiesener oder vermuteter hydraulische Wirkung. Diese zeigt sich in einem deutlichen hydraulischen Kontrast zum Nebengestein, wobei hier in der Regel von einer gegenüber dem Nebengestein erhöhten hydraulischen Leitfähigkeit ausgegangen werden kann (Abschnitt 4.3).

Aufgrund des erhöhten Kenntnisstandes in der zentralen Vorerzgebirgssenne wurden dort auch Strukturelemente berücksichtigt, die aufgrund von Aufschlussdaten und geophysikalischen Untersuchungen nur in tieferen geologischen Horizonten nachgewiesen wurden, einen Versetzungsbetrag von mindestens einigen Metern aufweisen und mit ausreichender Sicherheit interpoliert werden können.

Weitere Störungen und Kluftzonen wurden auf Grundlage einfacher Indizien auf hydraulische Aktivität gefällt werden. Dazu gehören insbesondere punktuelle hydraulische Tests bzw. Schlussfolgerungen aus hohen Förderkapazitäten von Brunnen, das Auftreten von Quellen sowie topographische Anhaltspunkte.

Für den zentralen Teil der VES ist die Fortsetzung der meisten, durch den Steinkohlenbergbau im Raum Zwickau und Lugau-Oelsnitz, aus dem Karbon bekannten Störungen in das Rotliegende unsicher. Im Modell wurden diese Störungen im Rotliegenden zwischen der aus Aufschlüssen bekannten Lage im Karbon/Unteren Rotliegenden und den Ausstrichen an der Tagesoberfläche, unter Berücksichtigung zu erkennender Trends interpoliert. Hier bestehen

aber nach wie vor große Unsicherheiten, die nur durch weitere Aufschlussdaten oder geophysikalische Untersuchungen minimiert werden können.

Wenn Indizien zum Einfallen, z.B. aus tektonischen Messungen in Steinbrüchen oder durch benachbarte ähnlich streichende Elemente, Hinweise auf ihren möglichen Verlauf im Untergrund lieferten wurde diese Struktur im Einzelfall unter Annahme der wahrscheinlichsten tektonischen Orientierung als Fläche in den Untergrund extrapoliert.

Im einzelnen wurden folgende bedeutende Störungszonen bzw. Teile dieser, als dreidimensionale Raumelemente erfasst (von E nach W). Ihnen wurden die Kurzbezeichnungen S1 bis S12 zugeordnet. Erweiterungen (z.B. S8_1 oder S8_2_A) bezeichnen unterschiedliche Teilabschnitte einer Störung oder Fragmente, die separat und/oder in höherer Auflösung modelliert wurden. Die genannten Störungen verlaufen, wenn nicht anders bezeichnet, in herzynischer Richtung.

- **Störungsbahn** zwischen Leukersdorf und Jahnsdorf (S1)
- **Störungsbahn** zwischen Langenberg, Wüstenbrand, Ursprung und Jahnsdorf (S2)
- **Pluto-Verwerfung** (S3)
- **Rödlitzer Hauptverwerfung (RHV)** (S4)
- **2. Pöhlauer Sprung** (S5)
- **1. Pöhlauer Sprung** (S6)
- **Reinsdorfer Sprung** (S7_1 und S7_2)

S7_1 ist die dreidimensionale Störungsbahn die sich aus dem Grundgebirge bis in das obere Rotliegende fortsetzt. S7_2 zeigt ein Störungsfragment des Reinsdorfer Sprungs im Karbon nach RENNER 1998

- **Brückenberg Sprung** (S8_1, S8_2_A, S8_2_B, S8_3)
S8_1 zeigt die räumliche Lage des nördlichen Abschnittes des Brückenberg Sprunges. Er wurde aus dem planaren Störungsfragment nach RENNER 1998, der geologischen und strukturellen Karte und der Lage der Schnittpuren im Karbon (GFE 1969) erstellt. Aufgrund der bekannten komplizierten Geometrie des Brückenbergsprungs im Karbon wurde der tiefere Teil der Störung separat modelliert (S8_3). S8_2 zeigt die nach RENNER 1998 aus den Flözrissen des Steinkohlenbergbaus modellierte Lage eines Störungsabschnittes des Brückenberg Sprunges im kohleführenden Karbon (Fläche). Mit S8_2_A bis S8_2_D wurden Teile dieser Störungsschar in das Hangende extrapoliert um Schnittpuren in der Karbonbasis und in der Basis der Härtensdorf-Folge zu erzeugen.
- **Oberhohndorfer Hauptverwerfung (OHV)**, südöstlicher Teil, mit Parallelstörung (S9_1, S9_2, S9_4, S9_5)
Dreidimensionale Darstellung der südlichen Abschnitte der OHV. Grundlage der Modellierung waren u.a. die Schnittpuren in der Karbonbasis und den einzelnen Flözen, Bohrungsdaten, das seismische Profil Zwickau (GGD 1997) und die tektonische Karte. In die Abschnitte S9_1 und S9_2 wurden die von RENNER 1998 modellierten Störungsfragmente (S9_5) eingearbeitet. Aus dem Störungsmodell wird deutlich, dass von einer durchgehenden Verbindung der einzelnen Abschnitte der OHV im Stadtgebiet von Zwickau ausgegangen werden kann.

- **Oberrothenbacher Störung (S9_3)**

Erzgebirgisch orientierte Störungsbahn nördlich von Zwickau. Sie gliedert die OHV in einen nördlichen und südlichen Teil

- **Oberhohndorfer Hauptverwerfung (OHV), nordwestlicher Teil (S9_4)**

- **Lungwitztalzone (LTZ) (S10)**

Die um E-W (von herzynisch im Westen nach Ost in erzgebirgische Richtung umschwenkend) verlaufende LTZ wird, wenngleich nicht als Störungszone sicher nachweisbar, als wichtige hydraulisch aktive Kluftzone im Modell räumlich abgebildet.

- **Granulitgebirgsrandstörung (10 Segmente, S11_1 bis S11_10)**

- **Querstörungen zur Granulitgebirgsrandstörung (10 Segmente, S12_1 bis S12_10)**

Die wichtigsten Querstörungen zur Granulitgebirgsrandstörung sind hier als Flächen im Raum dargestellt. Die leicht versetzte nördliche Fortsetzung der RHV in das Grundgebirgskristallin wurde als 3D-Objekt modelliert.

Zu den Störungen S3 bis S9 liegen einer Reihe sehr konkreter Anhaltspunkte aus Bohrungen bzw. den Aufschlüssen des Steinkohlenbergbaus vor. Diese Datenbasis wird durch Aufarbeitung alter Materialien und Erfassung neuer Bohrungen im FIS auch aktuell erweitert und neu interpretiert (FELIX et al. 2006). Als Grundlage der Implementierung hydrogeologisch wirksamer Störungen im hydraulischen Modell ist die Genauigkeit des vorliegenden Strukturmodells ausreichend.

Die Mächtigkeit der Störungen beträgt meist zwischen 50 m und 200 m, die Lungwitztalzone ist lokal möglicherweise mächtiger. Die meisten dieser tektonischen Elemente setzen sich weit in das Grundgebirge fort. Im Strukturmodell wurden sie jedoch nur bis unter die Basis der Zwickauer Schichten (Westfal) modelliert. Da ab dieser Teufe keine verlässlichen Anhaltspunkte zur Existenz und Lage dieser Störungen mehr vorliegen, ist die Weiterführung der Störung dort lediglich eine Extrapolation des Störungsverlaufes im Hangenden. Unklar ist häufig auch die laterale Fortsetzung von im Permokarbon kartierten Störungen in Präkarbon des Senkenumlandes.

Bezüglich der Einschätzung der hydraulischen Eigenschaften von Störungen ist die Situation noch ungünstiger. Sind Störungsverläufe häufig noch sicher bis vermutet aus geologischen Kartierungen bekannt (GK25 1875-1911 und aktuelle regionale Anpassungen) muss in Bezug auf ihre hydraulische Aktivität zumeist auf durch Indizien begründete Schätzungen zurückgegriffen werden (Abschnitte 4.2.3, 4.2.4, 4.3). Dies gilt umso mehr für die tieferen Störungsabschnitte. Hier mussten entsprechende Annahmen getroffen und durch Modellrechnungen, soweit möglich, in ihrer Plausibilität geprüft werden (Abschnitt 4.9).

Die oben aufgeführten, als eigenständige Objekte modellierten Störungen und Kluftzonen bzw. deren Teilabschnitte, stellen nur einen Teil der relevanten hydraulisch wirksamen Störungen und Kluftzonen im Modellraum dar. Zu vielen bekannten oder vermuteten Störungs- und Kluftzonen liegen abgesehen von den aus der tektonischen Entwicklung abgeleiteten Indizien (Abschnitt 4.3) aufgrund mangelnder Untersuchungen keine spezifischen Informationen zu ihrer hydraulischen Wirkung vor. Eine solche ist aber möglich und häufig sogar wahrscheinlich.

Im hydraulischen Modell wurde eine Auswahl wichtiger Störungs- und Kluftzonen als Bereiche höherer bzw. geringer hydraulischer Durchlässigkeiten implementiert (Abschnitt 4.9).

Die nicht als räumliche Objekte modellierten Störungen und Kluftzonen wurden zunächst als Vektordaten erfasst (Abschnitt 4.8.6). Im Rahmen der Parametrisierung des hydraulischen Modells wurden dann auf Grundlage der hydrogeologischen Analyse dieser Strukturen (Abschnitt 4.3) ausgewählte Elemente mit bekannter oder vermuteter hydraulischer Wirkung in das Modell inkorporiert (Abschnitt 4.9.4).

4.8.6 Informationsebenen zur Hydrogeologie, Hydrologie und Geologie

Das hydrogeologische Strukturmodell enthält zahlreiche Informationsebenen zu hydrologischen, geologischen und hydrogeologischen Themen in Form von Vektorobjekten. Sie sind entweder als GMS Feature Objekte oder als GIS Objekte, letztere zumeist im shp – Format, in das Modell inkorporiert. Zu den wichtigen im Modell geführten Informationsebenen gehören:

- Grenzen geologischer Einheiten
- Verlauf tektonischer Strukturen
- Diverse Gebietsabgrenzungen, Ortslagen und Lineationen
- Einzugsgebietsgrenzen (u.a. WALTER 1999) mit Grundwasserneubildungshöhen aus GEOFEM 2000-2004
- Bilanzgebietsabgrenzungen
- Fließgewässer und punktuelle Grundwasserstandsdaten (WALTER 2006)
- Interpretierte Grundwasserstandsdaten aus verschiedenen Quellen (HÜK200 2006, TLUG 2006, ZGI 1984)
- Diskretisierungsvorgaben für das Modellgitter des hydraulischen Modells
- Durchlässigkeitsverbreitung nach HÜK 200 (HÜK200 2006, TLUG 2006)
- Modellränder und Randbedingungsebenen

Diese Informationsebenen dienen einerseits der Visualisierung von Ausgangsdaten, Modell- bzw. Arbeitsergebnissen und anderen Modellinhalten.

Sie sind darüber hinaus eine Grundlage für die Modellierung der Modellschichten und Körper (z.B. als Lineationen der Ausstriche geologischer Schichten und Störungen). So bilden diverse Typen von Vektordaten Zwischenschritte bei fast allen Modellierungsvorgängen in GOCAD und GMS. Weiterhin sind Informationsebenen als Teil des konzeptionellen GMS-Modells eine Voraussetzung der hydraulischen Modellierung (Abschnitt 4.9). So werden verschiedene Randbedingungen im Modell als Vektorebenen geführt, z.B. Einzugsgebiete für die Abgrenzung der Grundwasserneubildung, Flussrandbedingungen, Modellränder und Grundwassermessstellen.

4.8.7 Kartengrundlagen

Bei den im Modell bzw. im Rahmen der Modellierung verwendeten Kartengrundlagen handelt es sich um analoge oder digitalisierte (Rasterformat) geologische, topographische und hydrogeologische thematische Karten. Sie dienen in erster Linie der Visualisierung von Modellinhalten. Die verwandten Karten sind in Abschnitt 2.5 aufgeführt.

4.9 Das Grundwasserströmungsmodell der Vorerzgebirgssenke

4.9.1 Einführung, Berechnungsverfahren und Zielstellung

Schwerpunkt der hydraulischen Modellierung war die Simulation großräumiger und tiefer Grundwasserregimes in der Vorerzgebirgssenke und damit die Darstellung regionaler und intermediärer Grundwasserfließsysteme. Dabei sollte geprüft werden inwieweit Störungszonen als Transportbahnen weitreichender Grundwasserströme in Betracht kommen können. In tiefen Aufschlüssen, insbesondere in den Steinkohlenbergbaugebieten von Zwickau und Lugau-Oelsnitz wurden höher mineralisierte Wässer erschlossen. Es war zu testen inwieweit diese tiefen Grundwässer höherer Dichte in das Fließgeschehen in der Vorerzgebirgssenke eingebunden sind und ob Rückschlüsse auf ihre Herkunft, möglicherweise im Zusammenhang mit Strömung entlang großer Störungszonen, getroffen werden können.

Die numerische Modellierung der Grundwasserströmung im Bereich der Vorerzgebirgssenke und ihres Umlandes erfolgte auf Grundlage des in GOCAD erstellten und in GMS aktualisierten und weiterentwickelten hydrogeologischen Modells (Abschnitt 4.8). Die Modellierung wurde unter Verwendung des Finite Elemente Programmcodes FEMWATER (LIN et al. 1997-2003) durchgeführt (Abschnitt 4.9.2).

Für die Mehrzahl von Grundwasserströmungsmodellierungen weltweit werden Finite Differenzen Verfahren verwendet, die in Bezug auf ihre Verbreitung, Bedienbarkeit, Laufstabilität und Rechenzeiten, insbesondere bei kleineren Modellen häufig Vorteile gegenüber Finite Elemente Modellen aufweisen. Für das nachfolgende Modellierungsvorhaben wurde dennoch ein Finite Elemente Modell verwendet, weil dieses Verfahren dem vorgenannten in einigen entscheidenden und für die Fragestellung wichtigen Punkten überlegen ist. Dazu gehören z.B.:

- die beliebige, auch unregelmäßige der notwendigen Genauigkeit angepasste räumliche Diskretisierung des Modellraumes und der Modellränder
- die exakten Abbildung von geometrisch komplexen und/oder unterschiedlich parametrisierten Modellelementen (z.B. Störungen)
- einfache Umsetzung von Heterogenität und Anisotropie (z.B. in Grundwasserleitern)
- und damit ggf. auch die Einsparung von Speicherkapazitäten und Rechenzeit durch Vermeidung hoher Diskretisierungen in weniger relevanten Modellregionen

4.9.2 Der Programmcode FEMWATER

FEMWATER ist ein räumliches numerisches Modellierungsprogramm zur Simulation von Strömung und Transport als gekoppeltes System in der ungesättigten und gesättigten Zone. Es berücksichtigt dabei die besonderen Eigenschaften (Dichte) höher mineralisierter Wässer. Die Lösung der zugrunde liegenden partiellen Differentialgleichungen zur Beschreibung von Strömung, Transport und Randbedingungen erfolgt auf Grundlage der Finite Elemente Methode (Abschnitt 4.9.1).

Grundlage des Programmcodes FEMWATER (LIN et al. 1997-2003) waren die Modelle

3DFEMWATER für 3D-Strömung (YEH 1987) und 3DLEWASTE für Transport (YEH 1990). Diese separaten Programmcodes wurden unter neuer Programmstruktur und auf Grundlage aktueller FORTRAN Codes gekoppelt. Dieser neue Programmcode FEMWATER ist Ergebnis der Kooperation des Laboratory of the U.S. Environmental Protection Agency (AERL) und der US Army Engineer Waterways Experiment Station (WES). Bestandteil der Neuentwicklung war die Einbindung des neuen Codes in das Groundwater Modeling System (GMS) des Department of Defense (Abschnitt 2.10.1). Darüber hinaus wurden neue Lösungsalgorithmen sowie die Möglichkeit der Simulation dichteabhängigen Transports in FEMWATER integriert (LIN et al. 1997-2003).

Aufgabenspezifische Anpassung des FEMWATER-Programmcodes

Für Umsetzung des großräumigen hydrogeologischen Modells der Vorerzgebirgssenke in ein numerisches Strömungsmodell waren Anpassungen des FEMWATER-Programmcodes erforderlich. Ursachen hierfür sind:

- die Größe und Tiefe des Modellraumes (Großraummodell)
- die relativ hohe vertikale Diskretisierung
- die für den Modellmaßstab hohe räumliche Differenzierung der Randbedingungen und der hydraulischen Parameter

Tabelle 40 Parameter zur Modelldimensionierung im FEMWATER-Programmcode in GMS

Parameter	Beschreibung	Belegung im Programmcode, Werte		
		Default	Modelle, ca.	Anpassung
Modellgeometrie				
MAXNPK	Max. Anzahl 3D-Gitterpunkte	52.000	137.111	200.000
MAXELK	Max. Anzahl 3D-Gitterelemente	90.000	248.184	350.000
MXBESK	Max. Anzahl Randelement-Flächen	30.000	50.000-60.000	100.000
MXBNPK	Max. Anzahl Randelement-Punkte	38.400		120.000
Materialeigenschaften				
MXMATK	Max. Anzahl Materialien	15	16-30	30
Randbedingungen				
MXDNPH	Max. Anzahl Gitterpunkte Head RB (Drichlet)	15.000		30.000
MXDPRH	Max. Anzahl Profile Head RB (Drichlet)	200	853	1000
MXNNPH	Max. Anzahl Gitterpunkte Flux RB (Neumann)	15.000	10.547	30.000
MXNESH	Max. Anzahl Element-Flächen Flux RB (Neumann)	15.000	20.682	50.000
MXCNPH	Max. Anzahl Gitterpunkte Flux RB (Cauchy)	15.000	10.547	30.000
MXCESH	Max. Anzahl Element-Flächen Flux RB (Cauchy)	15.000	20.682	50.000
MXVNPH	Max. Anzahl Gitterpunkte Variable RB	15.000	10.547	21.000
MXVESH	Max. Anzahl Element-Flächen Variable RB	15.000	20.682	30.000
XY1 Card, Feldparameter				
MXXYS	Definition Zeitschritte, weitere	250	1373	2000
MXXYP		100		800
MXRSCB	Dimensionierung der Rechenmatrizen	13.800	16106	30.000
KTMP		55.200	67.884	80.000
MXPOST	Dimensionierung Postprocessing-Matrizen	200		350

Diese Anpassung erfolgte im Sinne einer Erweiterung der Dimensionierung ausgewählter Datenfelder/ Variablen, insbesondere für die Anzahl geometrischer Elemente, Materialeigenschaften und Parameter der Randbedingungen (Tabelle 40).

Auf Grundlage der vorgegebenen Neudimensionierung wurde ein neuer angepasster FEMWATER-Programmcode kompiliert und für die weiteren Modellberechnungen verwendet.

4.9.3 Modellgeometrie

Geometrische Basis des hydraulischen Modells in GMS-FEMWATER ist ein dreidimensionales Modellgitter, als Träger der ortsgebundenen Modellinformationen wie hydraulische Parameter, Randbedingungen und Berechnungsergebnisse.

Neben der Modellparametrisierung (Abschnitt 4.9.4) ist die Geometrie dieses Gitters von entscheidender Bedeutung für den Erfolg der Grundwasserströmungsmodellierung, da sie unmittelbar die Laufstabilität und Laufzeit der Berechnung sowie die Qualität der Ergebnisse beeinflusst. Deshalb mussten bei der Erstellung des Modellgitters Maximalziele und notwendige Grenzen bezüglich des Designs und der Auflösung gegeneinander abgewogen werden, um einen beiden Anforderungen gerecht werdenden Kompromiss zu finden (Tabelle 41).

Tabelle 41 Umsetzung des Strukturmodells in das Gitter des Strömungsmodells

Ziel	Begrenzung	Lösung/Umsetzung
exakte Umsetzung der hydrogeologischen Struktur	zu kleine/geringmächtige Elemente sind ungeeignet	Definition einer Mindestmächtigkeit der Elemente/Layer
genaue Implementierung der Störungs- und Kluftzonen	Umsetzung ist an d. Auflösung d. Modellgitters gebunden	feinere Diskretisierung in Bereichen wichtiger Störungs-, Kluftzonen
mehrere vertikale Modellschichten für jede Einheit	führt zu hohen Schichtanzahlen	nur dort mehrere Schichten wo hydraulische Differenzierung möglich
Allgemein hohe Auflösung (Diskretisierung) des Modellgitters	begrenzte mögliche Elementzahl aufgrund begrenzter Rechenkapazität und -dauer	Diskretisierung in Abhängigkeit von Gebietspriorität, hydraul. Grad. und der Verteilung hydraul. Parameter
Vermeidung v. extremen vertik. Grad. im Schichtverlauf	numerische Instabilitäten bei der Berechnung möglich	Verteilung des Höhenwechsels auf mehrere Elemente
Vermeidung eines extremen k_r -Wert Gefälles zwischen benachbarten Elementen	numerische Instabilitäten bei der Berechnung möglich	graduelle Abstufung der von einem Wert zum anderen

Ergebnis dieser Abwägung war differenziertes Modellgitter (Abbildung 26) mit den in Tabelle 42 dargestellten Eigenschaften. Weitere Erläuterungen zur Modellgitterentwicklung gibt Abschnitt 2.10.6.

Tabelle 42 Eigenschaften des dreidimensionalen Gitters des hydraulischen Modells

Parameter	Wert/Eigenschaft
Anzahl Nodes / Anzahl Elemente (Typ)	137.111 / 248.184 (Prismen)
Anzahl Modellschichten (Layer)	12
Modellhöhe Z: Maximum/ Minimum [m]	731 / -1400
Diskretisierung horizontal (Min./ Max.) [m]	100/ 1100, stark variabel

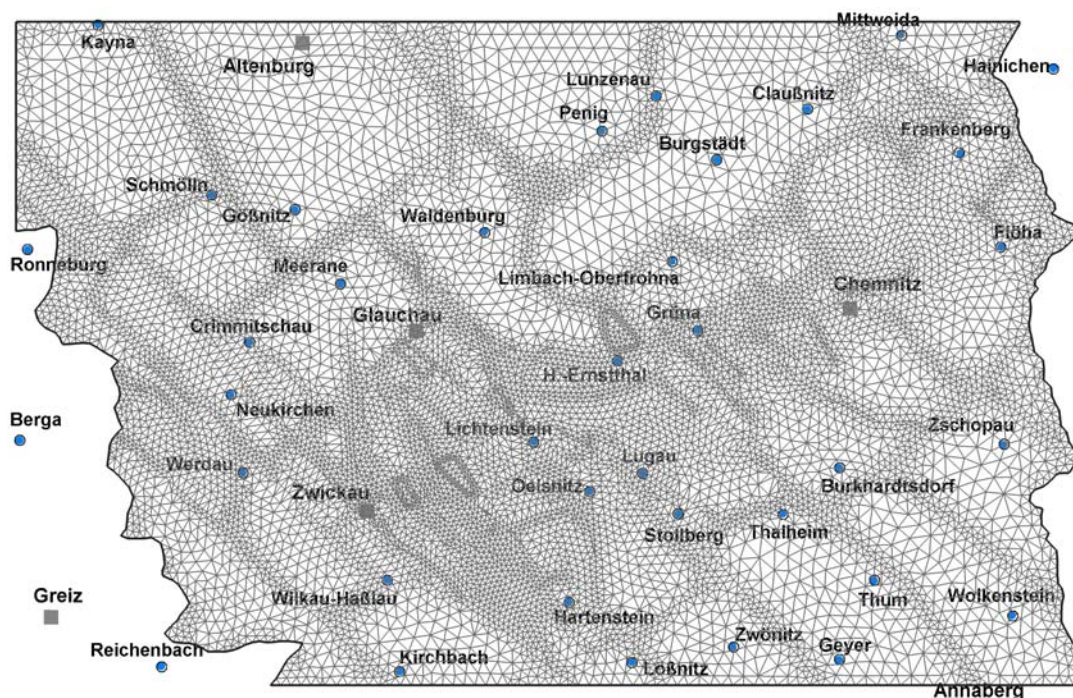


Abbildung 26 Räumliche Diskretisierung des Gitters des hydraulischen Modells

4.9.4 Modellparameter und Randbedingungen

4.9.4.1 Hydrogeologisches Parametermodell

Die Parametrisierung des hydrogeologischen Modells erfolgt in GMS-FEMWATER über die Zuweisung von Materialien zu den Modellelementen. In den Materialien sind die für die hydraulischen Berechnungen notwendigen Parameter wie Durchlässigkeiten / Anisotropien in der gesättigten und ungesättigten Zone, Porositäten und Transportparameter hinterlegt.

Die folgenden Tabellen (Tabelle 43 bis Tabelle 46) zeigen zunächst die aus der hydrogeologischen Analyse des Modellraumes (Abschnitte 4.1 bis 4.4) abgeleiteten zusammengefassten hydraulischen Eigenschaften der hydrogeologischen Einheiten inklusive Störungs- bzw. Kluftzonen. Anschließend erfolgte die Zuordnung zu den Materialklassen des hydraulischen Modells. Die angegebenen Durchlässigkeiten beziehen sich, wenn nicht anders angegeben,

auf die mittlere maximale Durchlässigkeit in schichtparalleler Richtung bzw. auf die mittlere Durchlässigkeit parallel zu Störungs- bzw. Klüftflächen.

Tabelle 43 Kennwerte der hydrogeologischen Einheiten (Modellierungsansätze)

Hydrogeologische Einheit		k_f [m/s]	Transmissivität [m ² /s]	Mächtigkeiten, ca. [m]	n ¹⁾
Anthropogene Auffüllungen ²⁾		$5 \cdot 10^{-5}$ ($2 \cdot 10^{-4}$ - $2 \cdot 10^{-5}$)	10^{-3}	5-50	0,05-0,35
Quartär	GWL	$1,25 \cdot 10^{-4}$ (10^{-3} - 10^{-5})	$5 \cdot 10^{-4}$	1-3, lokal bis >9	0,2
	GWGL	10^{-6} (10^{-5} - 10^{-7})	$2 \cdot 10^{-6}$	0,5-2	0,03
Tertiär		10^{-5} - 10^{-6}	$5 \cdot 10^{-5}$	4-40	0,1-0,12
Auflockerungs- und Delithifizierungszone	geklüftet	$5 \cdot 10^{-6}$ ($4 \cdot 10^{-4}$ - $4 \cdot 10^{-7}$)	10^{-4} (10^{-2} - 10^{-5})	15-45	0,2
	verlehmt	$4 \cdot 10^{-10}$	10^{-8}		0,1
Buntsandstein (oberflächennah/tief)		$5 \cdot 10^{-5}/2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$ (10^{-4} - $5 \cdot 10^{-3}$)	50-100 (senkennah)	0,18
Zechstein (oberflächennah/tief)		$4 \cdot 10^{-5}/10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$ (10^{-2} - 10^{-4})		0,12
Gera-/ Mülsen-Folge oberflächennah ³⁾ tiefere Abfolgen		10^{-5} < $7 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$ < $5 \cdot 10^{-5}$	bis >315 bis 200 bis >315	0,15
Leukersdorf-Folge oberflächennah ³⁾ obere vorwieg. Pelitische Abfolgen tiefere vorwieg. Psamm./pseph. Abf.		$2 \cdot 10^{-6}$ $5 \cdot 10^{-7}$ $2 \cdot 10^{-6}$	10^{-5} (10^{-4} - $5 \cdot 10^{-6}$) 10^{-5} - 10^{-6} 10^{-5}	bis >700 bis 200 0-695 130-160	0,12 0,08
Planitz-Folge oberflächennah ³⁾ tiefere Abfolgen		$5 \cdot 10^{-6}$ $5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-5}$ (10^{-4} - 10^{-5}) $7 \cdot 10^{-5}$ - 10^{-7}	bis > 265 bis 200 0-265	0,2
Härtensdorf-Folge ⁴⁾ oberflächennah ³⁾ obere vorwieg. pelitische Abfolgen obere vorwieg. psamm./pseph. Abf. tiefere vorwieg. pelitische Abfolgen tiefere vorwieg. psamm./pseph. Abf.		$5 \cdot 10^{-6}$ $5 \cdot 10^{-7}$ $5 \cdot 10^{-6}$ $5 \cdot 10^{-8}$ $5 \cdot 10^{-6}$	10^{-4} $7 \cdot 10^{-5}$ - 10^{-6} $5 \cdot 10^{-5}$ $7 \cdot 10^{-5}$ - 10^{-6} 10^{-5}	bis > 265 bis 200 bis >59 um 10 bis >163 um 30	0,11 0,07
Hainichen- und Flöha-Schichten oberflächennah ³⁾ tiefere Abfolgen		$7 \cdot 10^{-6}$ < 10^{-6}	um 10^{-4} < $5 \cdot 10^{-5}$	bis 200 >200	0,15
Zwickauer Schichten oberflächennah ³⁾ tiefere Abfolgen		$5 \cdot 10^{-7}$ 10^{-8}	$5 \cdot 10^{-5}$ $7 \cdot 10^{-5}/10^{-7}$	bis > 335 bis 200 bis > 335	0,15
Grundgebirge oberflächennah ³⁾ tiefere Einheiten		10^{-7} 10^{-8}	10^{-5} - 10^{-6} 10^{-7}	bis 200 >200	0,05

Abnahme der Durchlässigkeit mit der Teufe: nach dem Modell WILSON et al. (1999) für das San Joaquin Becken nimmt die Durchlässigkeit um 1 Größenordnung pro 1km (0,057 bis 0,1 Größenordnungen pro 100m) Teufe ab; in anderen GWL ist die Abnahme mit 2-4 Größenordnungen noch deutlich höher (Großbritannien, DOWNING et al. 1987); Grundannahme für die Modellvorstellung der VES ist aufgrund des hohen Verfestigungsgrades der Gesteine eine Abnahme der Durchlässigkeit von 0,1 Größenordnungen pro 100m Teufe. Fußnoten: ¹⁾ Nutzbare Porosität n [Volumenanteil von 1] ²⁾ sehr inhomogen und nur lokal verbreitet, im Modell nicht flächendeckend umgesetzt; in Kippen-/Deponiebereichen Durchlässigkeiten oft geringer (k_f um 10^{-6} m/s) ³⁾ Vorparametrisierung; die hydraulischen Parameter für den hangenden Grundwasserleiter/Grundwasserleiterstockwerk wurden aus der Hydrogeologischen Kartierung HyK 200 (TLUG 2006, HÜBSCHMANN 2006) abgeleitet. ⁴⁾ Umsetzung aller 5 vertikalen Zonen unterschiedlicher hydraulischer Parametrisierung nur wenn entsprechende Schichtanzahl im Modellgitter vorhanden. Standardumsetzung: 1. oberflächennahe Bereiche (oberster GWL/GWL-Stockwerk), 2. hangende pelitische Abfolgen, 3. basale psammisch-psephitische Abfolgen

Die Ableitung der in Tabelle 43 zusammengefassten hydraulischen Kennwerte der hydro-

geologischen Einheiten erfolgte insbesondere auf Grundlage des Abschnittes 4.2 und der Anlage 3. Die Analyse der in Tabelle 44 zusammengefassten Eigenschaften der im Strukturmodell räumlich modellierten Strukturelemente konzentriert sich vor allem auf den Abschnitt 4.3.

Tabelle 44 Hydraulische Kennwerte wichtiger räumlich modellierter struktureller Elemente (Modellierungsansatz)

Name (Kurzbezeichnung)	k_f [m/s] ⁵⁾	T [m ² /s] ²⁾	M [m] ³⁾
Herzynische Störungen, hydraulisch aktive Elemente, allg. ¹⁾	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$10^{-4} - 10^{-5}$	75
Erzgebirgische Störungen, hydraulisch aktive Elemente, allg. ¹⁾	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$10^{-4} - 10^{-5}$	75
Räumlich modellierte Störungs- und Kluftzonen mit regionaler Bedeutung			
Störungsbahn zwischen Leukersdorf und Jahnsdorf (S1)	10^{-7}	$5 \cdot 10^{-5}$	50-100
Störungsbahn zwischen Langenberg, Wüstenbrand, SE-Abschnitt	10^{-7}	$5 \cdot 10^{-5}$	50-100
Ursprung und Jahnsdorf (S2) NW-Abschnitt	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-4}$	50-100
Pluto-Verwerfung (S3)	10^{-6}	10^{-4}	um 100
Rödlitzer Hauptverwerfung (S4) SE-Abschnitt	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	50-150
NW-Abschnitt	10^{-6}	$0,5 - 1 \cdot 10^{-4}$	50-150
2. Pöhlauer Sprung (S5) SE-Abschnitt	10^{-4}	$> 10^{-3} - 10^{-4}$	um 100
NW-Abschnitt	$3 \cdot 10^{-7}$	$10^{-4} - 10^{-5}$	um 150
1. Pöhlauer Sprung (S6)	(10^{-6})	10^{-4}	um 100
Reinsdorfer Sprung (S7) SE-Abschnitt	$9,3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	um 75
NW-Abschnitt	$7 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$ (Rotl.)	50-75
	$2 \cdot 10^{-5}$	10^{-3} (Zechst.)	
Brückenberg Sprung (S8)	$(2 \cdot 10^{-6})$	10^{-4}	um 50
Oberhohndorfer Hauptverwerfung, südl. Abschnitt (S9_2)	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$	25-100
Oberhohndorfer Hauptverwerfung, mittl. Abschnitt (S9_1, S9_2)	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-3}	75-200
Oberrothenbacher Störung, Bereich OHV (versetzt OHV) (S9_3)	$2 - 6 \cdot 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-5}$	50-200
Oberhohndorfer Hauptverwerfung, nördl. Abschnitt (S9_4)	$3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4}$	75-200
Lungwitztalzone (S10) (um E-W) E-Abschnitt	$7 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	50-100
Mittl. Abschnitt	$7 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$	50-100
W-Abschnitt	$1,3 \cdot 10^{-5}$	10^{-3}	100-150
Granulitgebirgsrandstörung (um E-W) (S11_1 bis S11_10)	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$	50-100
Querstörungen zu S11 (um N-S) (S12_1 - S12_10)	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	50-100

Quellen: u.a. Störungen S1 und S2 nach ZGI (1984), zur Herleitung der übrigen Annahmen vgl. Abschnitt *** ¹⁾ wenn nicht näher eingrenzbar ²⁾ Transmissivität ³⁾ Schätzwert für die mittlere wirksame Mächtigkeit (Teufenwirkung) der hangenden Störungsabschnitte ⁴⁾ Nutzbare Porosität n [Volumenanteil von 1] ⁵⁾ mittlerer maximaler Durchlässigkeitsbeiwert. Entspricht dem Wert in Streichrichtung; Wert quer zum Streichen beträgt 50%, die vertikale Durchlässigkeit 200% des Ausgangswertes. Die angegebenen Werte sind bei Grundwassererkundungs-, sanierungs- oder -gewinnungsarbeiten häufig im Bereich besser durchlässiger Störungsabschnitte ermittelt worden. Sie sind häufig vermutl. nur für einzelne Störungsabschnitte gültig und entsprechen deshalb, wenn auf größere Störungsabschnitte und wirksame angewandt, eher als ein Szenario maximaler Störungsdurchlässigkeiten (vgl. Abschnitt 4.3); SZ = Störungszone; k_f -Werte: aus T und Mächtigkeit abgeschätzt; in Klammern = grobe Schätzung; im Kursivdruck = aus konkreten Messwerten abgeleitet

Tabelle 45 listet die im Rahmen der hydrogeologischen Analyse abgeleiteten hydraulischen Eigenschaften weiterer Störungs- bzw. Kluftzonen im Modellgebiet. Im hydraulischen Modell werden auch in den Tabellen nicht aufgeführten, aber kartographisch erfassten Störungen bzw. vermuteten Störungen, spezifische hydraulische Parameter zugeordnet, die sich an Parametern (z.B. in Bezug auf ihre geographische Lage, Orientierung) vergleichbarer Strukturelemente orientieren.

Tabelle 45 Hydraulische Kennwerte weiterer wichtiger struktureller Elemente

Name (Kurzbezeichnung)		k_f [m/s] ⁵⁾	T [m ² /s] ²⁾	M [m] ³⁾
Weitere im Modell hydraulisch implementierte herzynisch orientierte Störungs- und Kluftzonen				
Störung bei Niederalbertsdorf		$(8 \cdot 10^{-6})$	$10^{-3} - 10^{-4}$	25-150
Störung im Kobebachtal		10^{-5}	um $6 \cdot 10^{-4}$	25-150
Störungsscharen südlich von Werdau (regionale Störungszone ?)		$(6 \cdot 10^{-6})$	$10^{-3} - 10^{-4}$	50-100
Störungsschar um Meerane		$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	um 100
Wernsdorfer Störung (südl. Fortsetzung im Bereich des 2. Pöhlauer Sprunges)		$6 \cdot 10^{-6}$ (im $S=2 \cdot 10^{-4}$)	um 10^{-3}	50-150
Rothenbacher Störung		10^{-5}	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-5}$	100-150
Gühne- und Karl-Schacht Verwerfungen		um $5 \cdot 10^{-7}$	um 10^{-5}	50-100
Störungsscharen im Chemnitztal (vermutet)	S-Abschnitte	(10^{-5})	um $5 \cdot 10^{-4}$	25-150
	N-Abschnitte	$(5 \cdot 10^{-6})$	um $1 \cdot 10^{-4}$	25-150
Weitere im Modell hydraulisch implementierte erzgebirgisch orientierte Störungs- und Kluftzonen				
Störungsscharen im Raum Helmsdorf		$2 - 6 \cdot 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-5}$	50-200
Störung zwischen Neukirchen (bei Crimm.) und Dennheritz		10^{-5}	um $5 \cdot 10^{-4}$	25-100
Muldenstörungen im Bereich Glauchau		10^{-6}	10^{-4}	25-150
vermutete Bruchzonen südöstl. Glauchau bis St. Egidien		10^{-6}	$5 \cdot 10^{-5}$	25-50
vermutete Bruchzone Ortslagen Auerbach, St. Micheln, Lichtenst.		$3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$	50-150
vermutete Bruchzone Ortslagen Pöhlau, St. Jacob, Lichtenstein		10^{-6}	$2 \cdot 10^{-5}$	um 50
Bruchzone zwischen St. Niclas u. Lichtenstein/Rödlitz		$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2}$	50-150
Hypothetischer Bruch zwischen Ortmannsdorf und Oelsnitz		$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	50-125
Zschockener Störung		10^{-5}	$5 \cdot 10^{-4}$	-100
Weitere im Modell hydraulisch implementierte anders orientierte Störungs- und Kluftzonen				
Störungsschar im Pleißeetal (um N-S)		$2 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-6}$	um $7 \cdot 10^{-4}$	50-150
Störungsschar südl. v. Kuhschappel (rhein. N-S bis NNW-SSE)		$7 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-5}$	100
Störungszweig östlich von Mittelbach		$4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	um 50

Quellenangaben und Fußnotenerläuterung, siehe Tabelle 44

Parametrisierung oberer Grundwasserleiter / Grundwasserleiterstockwerk

Im Rahmen der landesamtlichen Kartierungen zur Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (HYK50 2006) und zur Hydrogeologischen Übersichtskarte 1:200.000 (HÜK200 2006, HÜBSCHMANN 2006, TLUG 2006) wurden für den oberen Grundwasserleiter bzw. das obere Grundwasserleiterstockwerk Durchlässigkeitsklassen räumlich abgegrenzt (Tabelle 46). Sie wurden für die Modellparametrisierung des hangenden GWL verwendet und ersetzen im wesentlichen die im hydrogeologischen Strukturmodell abgegrenzte Auflockerungs- bzw. Verwitterungszone. Nur in Bereichen ohne Angabe (Durchlässigkeitsklasse 0) oder bei stark variablen Durchlässigkeiten (Durchlässigkeitsklasse 11) wird die initiale Parametrisierung der Auflockerungszone verwendet.

Tabelle 46 Durchlässigkeitsklassen für den oberen GWL / Grundwasserleiterstockwerk

Durchlässigkeitsklasse		k _f [m/s]			Durchlässigkeitsklasse		k _f [m/s]	
		Bereich	Mittel				Bereich	Mittel
2	hoch	$>10^{-3}$ - 10^{-2}	$5 \cdot 10^{-3}$		9	mittel bis mäßig	$>10^{-5}$ - 10^{-3}	10^{-4}
3	mittel	$>10^{-4}$ - 10^{-3}	$5 \cdot 10^{-4}$		10	gering bis äußerst gering	$<10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$
4	mäßig	$>10^{-5}$ - 10^{-4}	$5 \cdot 10^{-5}$		11	stark variabel		
5	gering	$>10^{-7}$ - 10^{-5}	10^{-6}		12	mäßig bis gering	$>10^{-6}$ - 10^{-4}	10^{-5}
6	sehr gering	$>10^{-9}$ - 10^{-7}	10^{-8}		0	keine Angaben		
7	äußerst gering	$<10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$					

Durchlässigkeitsklasseneinteilung nach HÜK200 (2006) und TLUG (2006); die Klassen 1 (sehr hohe Durchlässigkeit; $k_f > 10^{-2}$ m/s) und 8 (sehr hohe bis hohe Durchlässigkeit; $k_f > 10^{-3}$ m/s) sind im Modellbereich nicht vertreten

Modellparametrisierung durch Materialien

Die Zuweisung von hydraulischen Parametern auf die Modellelemente erfolgt in GMS-FEMWATER über Materialien. Aufgrund der nicht unbegrenzten Modelldimensionen wurde die Anzahl der verwendeten Materialien und damit der k_f-Wert Gruppen auf 30 beschränkt (Tabelle 47). Um den Bezug zur hydrogeologischen Struktur bzw. zur Genese der Einheit im hydraulischen Modell weitgehend zu erhalten, wurden für hydrogeologische Einheiten, die vergleichbare hydraulische Eigenschaften besitzen sich jedoch genetisch und/oder strukturell grundsätzlich von einander unterscheiden separate Materialien verwendet. Dem waren jedoch aufgrund der begrenzten Anzahl zur Verfügung stehender Materialien gewisse Grenzen gesetzt. Für die hydraulischen Berechnungen wurden Materialien mit gleichen Eigenschaften zusammengefasst um den Rechengang zu beschleunigen.

Als Richtwert für die molekulare Diffusion kam der Diffusionskoeffizient von Wasser (10°C) von 10^{-9} m²/s zur Anwendung. Zur Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften der ungesättigten Zone werden die Parameter Feuchtegehalt, relative Durchlässigkeit und Wasserkapazität als Funktion des Druckspiegels („pressure head“) berücksichtigt. Da keine geeigneten Messergebnisse zu diesen Parametern vorlagen, wurden die Abhängigkeiten empirisch unter Verwendung des van Genuchten Ansatzes (Kurven) (van Genuchten 1980) für repräsentative Boden- bzw. Gesteinstypen ermittelt (nach CARSEL et al. 1988).

Abbildung 27 zeigt Modellparametrisierung (Materialien) der oberflächennahen Bereiche (oberes Grundwasserstockwerk). Horizontalschnitte durch das hydraulische Parametermodell in verschiedenen Teufenniveaus zeigt Abbildung 28.

In einem weiteren Modellierungsschritt wurden wichtige Störungszonen in unterschiedlicher Parametrisierung implementiert. Die Standarddifferenzierung zeigt Abbildung 29. Dunkelgrüne (tief) bis hellgrüne (oberflächennah) Farben bezeichnen unterschiedliche Teufenlagen von Störungen im die Vorerzgebirgssenke und die Zeitz-Schmöllner Mulde umgebenden und unterlagernden Grundgebirge. Nach gleichem Schema stehen Blautöne für erzgebirgisch und N-S orientierte Störungen, Rottöne für herzynische Störungen und die Lungwitztalzone.

Tabelle 47 Materialien des hydraulischen Modells

Materia ID	Bezeichnung	k_f [m/s] hor. ¹⁾	k_f [m/s] vert. ²⁾	effekt. Poros.	Dispersivität ⁴⁾ long./ transv. [m]	unges. Zone Preset-Typ ³⁾
Hydrostratigraphische Einheiten						
1	Verwitterungs-; Auflockerungszone	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	0,2	0,1/ 0,01	loamy sand
2	Gera-Mülsen-Folge	$7 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	0,15	2/ 0,2	sandy loam
3	Leukersdorf-Folge, hangend	$5 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	0,12	45/ 4,5	silt loam
4	Leukersdorf-Folge, liegend	$2 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-7}$	0,08	10/ 1	sandy loam
5	Planitz-Folge	$5 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	0,2	25/ 2,5	sandy clay loam
6	Härtensdorf-Folge, hangend	$5 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	0,11	20/ 2	silt loam
7	Härtensdorf-Folge, liegend	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	0,07	10/ 1	sandy loam
8	Zwickauer Schichten	10^{-8}	$3 \cdot 10^{-9}$	0,15	40/ 4	silty clay
9	Grundgebirge	10^{-8}	$3 \cdot 10^{-9}$	0,05	50/ 5	loam
10	Zechstein und vgl. Folgen	10^{-5}	$3 \cdot 10^{-6}$	0,12	20/ 2	sandy loam
11	Buntsandstein und vgl. Folgen	$2 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-6}$	0,18	5/ 0,5	sandy loam
21	Hainichen- und Flöha-Schichten	$5 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	0,15	10/ 1	loam
Durchlässigkeitsklassen des hangenden Grundwasserleiters /-stockwerkes						
12	Durchlässigkeitsklasse 2	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	0,15	0,5/ 0,05	sand
13	Durchlässigkeitsklasse 3	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,15	0,25/ 0,025	loamy sand
14	Durchlässigkeitsklasse 4	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	0,15	0,15/ 0,015	sandy loam
15	Durchlässigkeitsklasse 5	10^{-6}	$3 \cdot 10^{-7}$	0,1	0,05/ 0,005	sandy clay loam
16	Durchlässigkeitsklasse 6	10^{-8}	$3 \cdot 10^{-9}$	0,05	0,01/ 0,001	loam
17	Durchlässigkeitsklasse 7	$5 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$	0,01	0,005/ 0,0005	clay loam
18	Durchlässigkeitsklasse 9	10^{-4}	$3 \cdot 10^{-5}$	0,15	0,2/ 0,02	sandy loam
19	Durchlässigkeitsklassen 10, 11, 0	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	0,08	0,07/ 0,007	sandy clay loam
20	Durchlässigkeitsklasse 12	10^{-5}	$3 \cdot 10^{-6}$	0,13	0,1/ 0,01	sandy loam
Störungs- und Kluftzonen ⁴⁾						
22	Störungszonen Kl. 1 ($>10^{-4}$)	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,25	5/ 0,5	sandy loam
23	Störungszonen Kl. 2 (10^{-4} - $5 \cdot 10^{-5}$)	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	0,25	10/ 1	sandy loam
24	Störungszonen Kl. 3 ($<5 \cdot 10^{-5}$ - 10^{-5})	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,25	15/ 1,5	sandy loam
25	Störungszonen Kl. 4 ($<10^{-5}$ - $5 \cdot 10^{-6}$)	$7 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-5}$	0,2	20/ 2	sandy loam
26	Störungszonen Kl. 5 ($<5 \cdot 10^{-6}$ - 10^{-6})	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	0,2	25/ 2,5	sandy clay loam
27	Störungszonen Kl. 6 ($<10^{-6}$ - $5 \cdot 10^{-7}$)	$7 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-6}$	0,15	30/ 3	sandy clay loam
28	Störungszonen Kl. 7 ($<5 \cdot 10^{-7}$ - 10^{-7})	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0,15	35/ 3,5	sandy clay
29	Störungszonen Kl. 8 ($<10^{-7}$, stauend)	10^{-8}	10^{-7}	0,15	40/ 4	loam
30	tieferer Abstrom NW	10^{-6}	$3 \cdot 10^{-7}$	0,1	10/ 1	sandy loam

¹⁾ Grundannahme: Abnahme Durchlässigkeit entspricht 1 Größenordnung je 1000m Teufenzunahme ²⁾ Grundannahmen: k_f (vertikal) entspricht rund = k_f (horizontal)/3, bei Störungen: k_f (parallel zum Streichen) = k_f (quer zum Streichen)*10; k_f (vertikal) = k_f (quer zum Streichen)*100 ³⁾ Van Genuchten-Ansatz, nach VAN GENUCHTEN (1980) und CARSEL et al. (1988) ⁴⁾ Schätzwerte, auf Grundlage von Literaturangaben

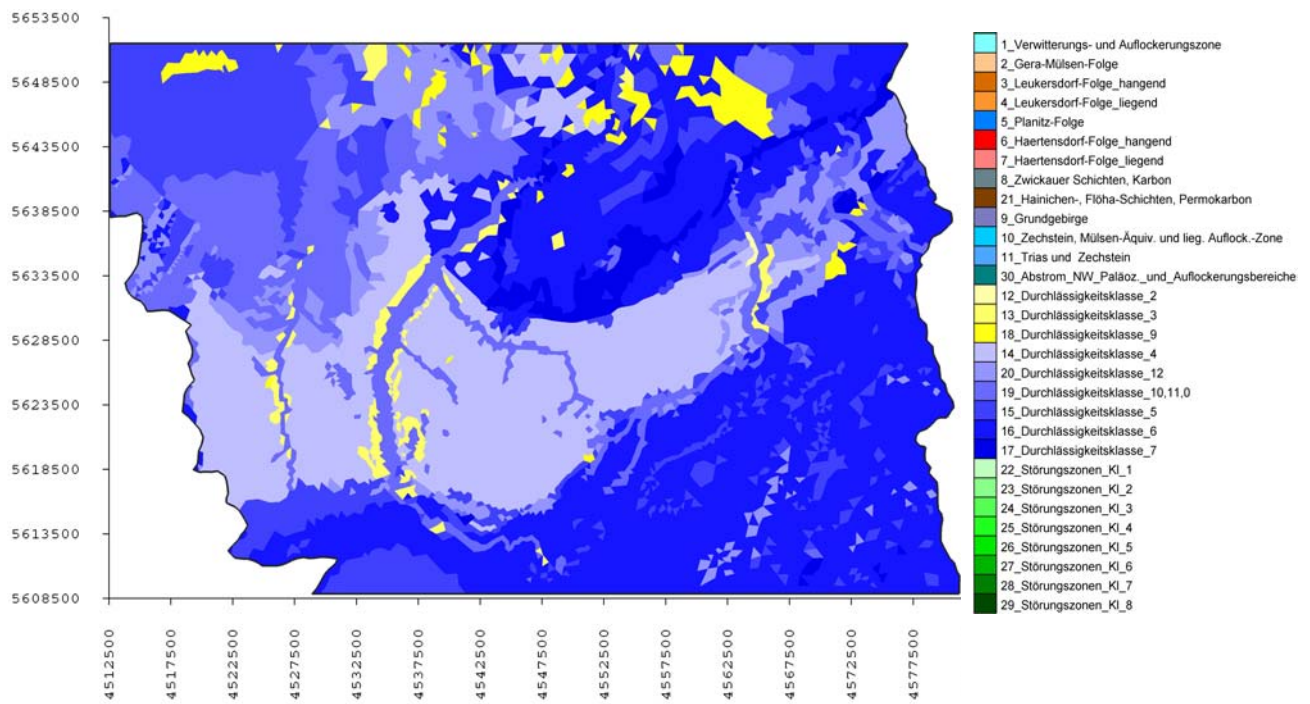


Abbildung 27 Hydraulisches Parametermodell (Materialien), oberes Grundwasserstockwerk

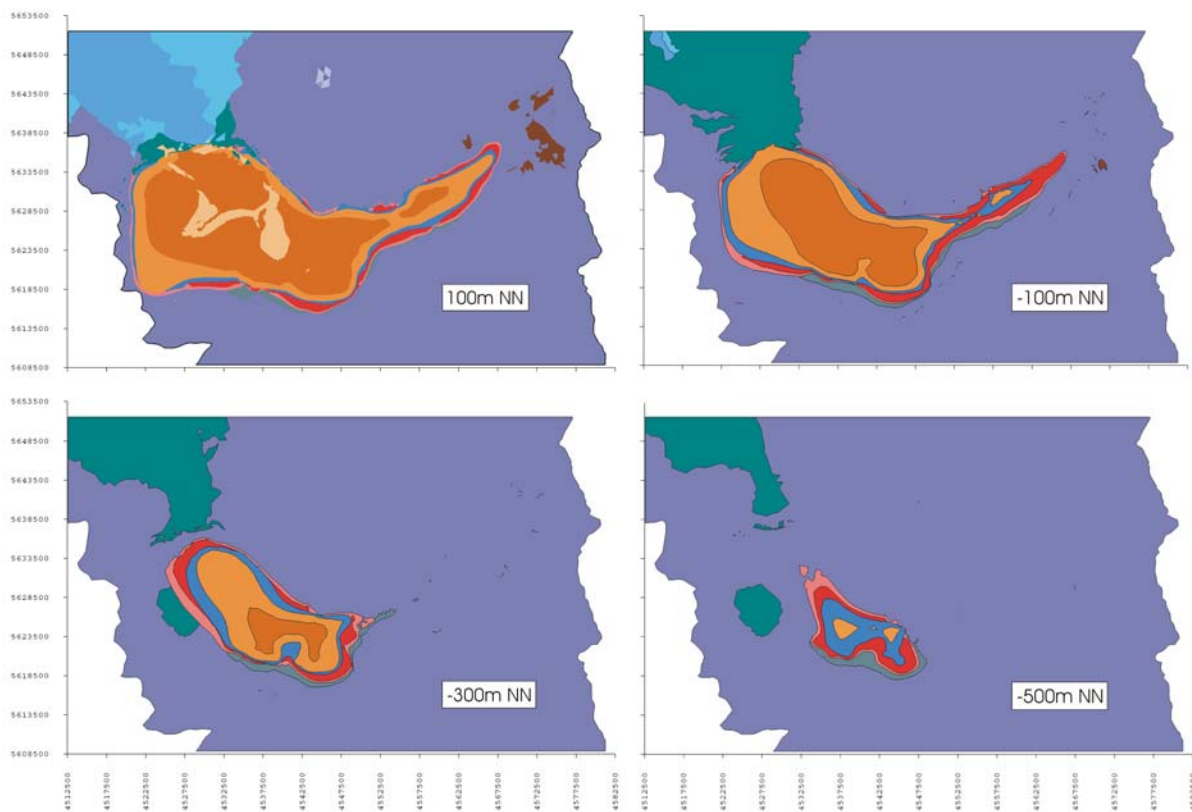


Abbildung 28 Horizontalschnitte durch das hydraulische Parametermodell (ohne separate Störungsimplementierung)

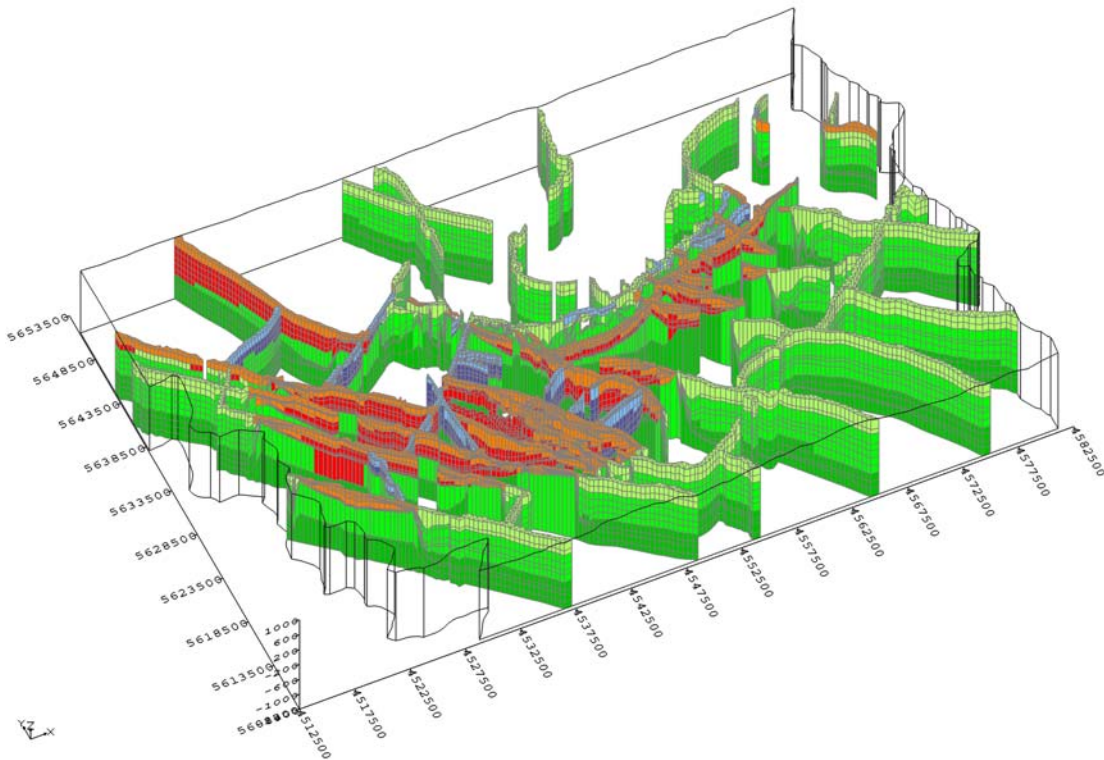


Abbildung 29 Implementierung von Störungszonen im hydraulischen Modell (Erläuterung vgl. Text)

4.9.4.2 Randbedingungen

Angaben und Verweise zur Recherche, Erhebung oder Berechnung der Randbedingungsdaten für die hydraulische Modellierung finden sich, soweit nicht im folgenden diskutiert, in Abschnitt 2.10.7. Neben geschlossenen Randbedingungen („no flow“) wurden an den äußeren Modellrändern Randbedingungen 1. und 2. Art, Variable Randbedingungen (Kombination 1. und 2. Art) sowie Flussrandbedingungen verwendet.

Geschlossene Randbedingung („no flow“)

Im finalen Modell wurden „no flow“-Randbedingungen entlang von Grundwasserscheiden am südwestlichen und dem überwiegenden Teil des östlichen Modellrandes verwandt. Bei der Festlegung der Lage dieser Modellränder wurde versucht, innerhalb der maximal möglichen Dimensionierung des Modellraumes, eine möglichst große Entfernung der Ränder zu den Hauptaussagebereichen des Modells zu wahren.

Davon kann im Osten des Modellgebietes sicher ausgegangen werden. Die als Modellrand verwandte Grundwasserscheide liegt hier im weiteren Einzugsgebiet der Freiburger Mulde, zwischen der Zschopau und Flöha/Freiburger Mulde. Die den Modellrand kreuzende Flöha wurde im Bereich des Pegels Hetzdorf als Flussrandbedingung in das Modell inkorporiert (Abbildung 30).

Der westliche Modellrand verläuft im weiteren Einzugsgebiet der Weißen Elster. Die Randbedingung folgt im SW beginnend zunächst rund 3km der SW-NE verlaufenden Hauptgrundwasserscheide zwischen Zwickauer Mulde und Weißer Elster. Sie schwenkt dann, der Grundwasserscheide zwischen Pleiße und Weißer Elster folgend, in nordwestliche Richtung um. Grund dafür ist auch hier die möglichst deutliche geographische Absetzung des passiven Modellrandes vom Hauptaussagebereich des hydraulischen Modells, um wesentliche Auswirkungen der Modellrandbedingung auf Ergebnisse im Modellzentrum zu vermeiden.

Randbedingungen 1. Art (Drichlet)

Entlang des südlichen und nördlichen Modellrandes wurden Randbedingungen 1. Art (Drichlet) in Form von Festpotenzialen („specified head“) angesetzt (Abbildung 30). Die Höhe der Festpotentiale wurde aus der interpolierten Druckspiegelfläche des oberen Grundwasserleiters / Grundwasserleiterstockwerkes abgegriffen (vgl. Abschnitt „Initiale Bedingungen“, unten).

Flussrandbedingungen

Für den Bereich des Modellgebietes wurden größere und mittlere Flüsse, für den unmittelbaren Bereich der Vorerzgebirgssenke auch kleinere Flüsse als Flussrandbedingung erfasst die für das obere Grundwasserleiterstockwerk im Sinne eines Vorfluter wirken (vgl. Abschnitt 2.10.7).

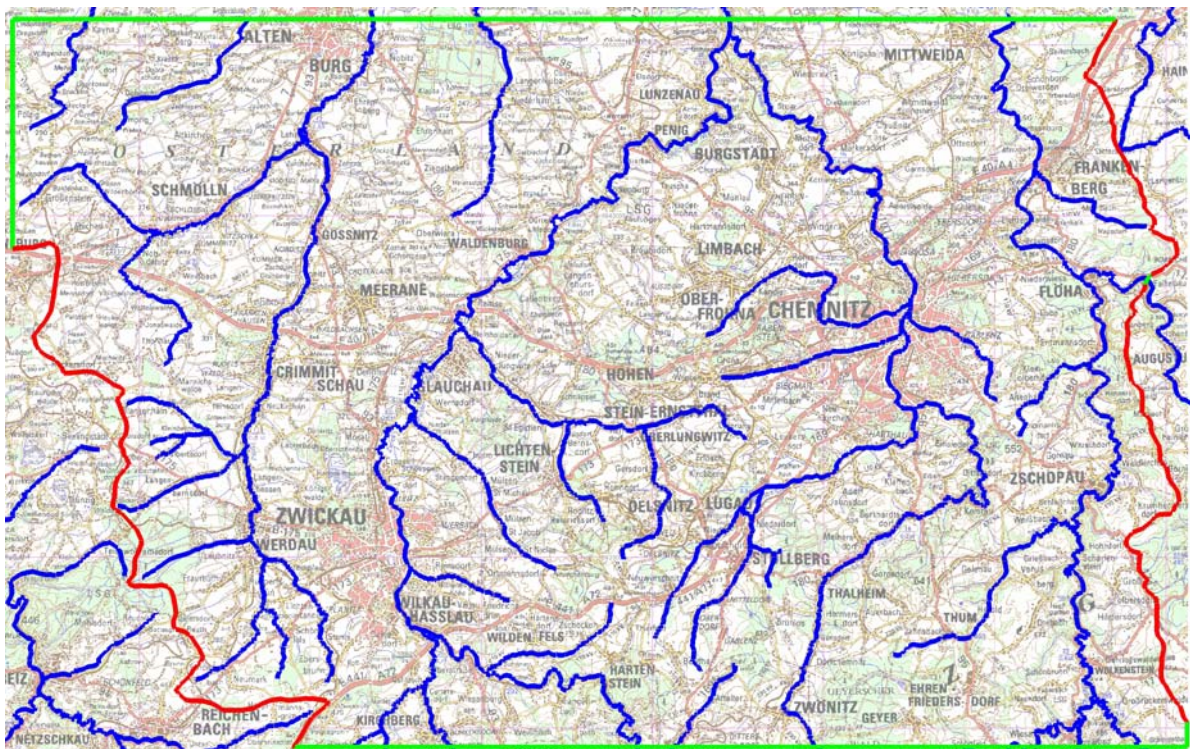


Abbildung 30 Randbedingungen des hydraulischen Modells: 1. und 2. Art, Flussrandbedingungen (grün: Festpotential, blau: Flussrandbedingungen, rot: no-flow Randbedingung)

Abbildung 30 zeigt die Lineationen der verwandten Vorfluter. Dabei konnte die Kolmation (Versieglung des Flussbettes) nicht in die Randbedingung eingebracht werden. Diese Funktion ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht in GMS-FEMWATER implementiert. Die Flussrandbedingung entspricht im Modell deshalb quasi einer Randbedingung 1. Art für die Flussläufe in der oberen Modellschicht.

Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung wurde als Gebietswerte für alle Einzugsgebiete 5. Ordnung in das hydraulische Modell implementiert. Drei Versionen des GWN-Berechnungsmodells GEOFEM fanden Anwendung: GEOFEM 2000, 2003 und 2004 (vgl. Abschnitt 2.10.7). Die Modellrechnungen wurden, wenn nicht anders angegeben, mit der GWN nach GEOFEM 2004 durchgeführt. Berechnungen unter Verwendung von GWN-Werten aus GEOFEM 2003 und 2000 wurden einerseits im Rahmen der Kalibrierung durchgeführt, andererseits um Aussagen zur Sensitivität des Modells auf eine veränderte Grundwasserneubildungshöhe und -verteilung zu gewinnen (Abschnitt 4.9.5).

Die Grundwasserneubildung wurde sowohl als Randbedingung 2. Art (specified flux) oder als sogenannte „Variable Randbedingung“ im GMS-FEMWATER Modell implementiert. Dabei handelt es sich um eine Randbedingung, die in Abhängigkeit von der hydraulischen Situation eines Modellelementes in jedem Berechnungsdurchlauf wechselnd sowohl als „specified flux“-Randbedingung als auch als Festpotential (Dirichlet) wirken kann. Steigt der Grundwasserspiegel über Gelände wird für die betreffende Zelle auf Festpotential umgestellt, sinkt der Grundwasserspiegel, wird auf Flux-Randbedingung zurückgestellt (vgl. LIN et al. 1997-2003). Diese Einstellung wird vom Modellentwickler empfohlen, führt aber zu längeren Rechenzeiten und ggf. zu Instabilitäten.

Die Lage der in der hydraulischen Modellierung verwandten Einzugsgebiete (sowie die Berechnung der zugehörigen GWN wird ausführlich in Abschnitt 4.4.3 diskutiert.

4.9.4.3 Modelleinstellungen und Modellrechnung

Initiale Bedingungen für die Modellrechnung: Grundwasserspiegel

Für jede Modellrechnung wurde als „cold start“ Szenario ein Ausgangsdruckspiegel des Grundwassers vorgegeben um die Rechenstabilität zu erhöhen und die Laufzeit der Berechnung zu verringern.

Bei dieser Vorgabe handelte es sich entweder um das Ergebnis einer zuvor durchgeführten Berechnung oder um eine auf Grundlage interpolierter Primärdaten ermittelte Grundwasseroberfläche.

Letztere wurde unter Verwendung von Daten zur Grundwasserdynamik (BLOCK 2006, TLUG 2006, ZGI 1984) und unter Einbezug der mittleren Wasserstände in den größeren Vorflutern (Abschnitt 2.10.7) modelliert. In Gebieten ohne Angaben zum Grundwasserstand wurde dieser unter Berücksichtigung typischer reliefabhängiger Flurabstände abgeschätzt. Der so konstruierte Grundwasserspiegel wurde auf die Stützpunkte des Modellgitters interpoliert und diente als Ausgangsdruckspiegel für die neue Berechnung.

Modelleinstellungen: Einheiten, Run-Optionen und Iterationsparameter

Die in FEMWATER-GMS verwandten physikalischen und chemischen Einheiten sind in allen Modellteilen bzw. Anwendungen konsistent. Wenn nicht anders angegeben gelten für die hydraulische Modellierung die in Tabelle 48 genannten Einheiten, Run-Optionen und Iterationsparameter.

Tabelle 48 Einheiten, Run-Optionen und Iterationsparameter des FEMWATER Modells^{*)}

Physikalische Größe	Einheit	Modell-Optionen	Realisierung	Relaxation parameter for non-linear flow=1, for lineariz. flow=0,5
Länge	<i>m</i>	Quadrature selection	<i>nodal/nodal und gaussian/gaussian</i>	Minimum= 0,01
Zeit	<i>s</i>	Weighting factor	<i>backward difference</i>	Maximum= 1,5
Masse	<i>g</i>	Mass lumping	<i>enabled</i>	Schrittweite= 0,005
Kraft	<i>N</i>	Mid-difference	<i>disabled</i>	Reduktionsfaktor= 0,6667
Konzentration	<i>mg/L</i>	Spline smooth unsat. curves	<i>enabled</i>	Lösungsalgorithmus: <i>Pointwise iterative matrix solver</i>
FEMWATER-Iterationsparameter für die Strömungssimulation				
Maximale Anzahl der Iterationen für nicht-lineare Gleichungen			1200	
Maximale Zyklen pro Zeitschritt für variable Randbedingungen			10	
Maximale Anzahl der Iterationen für lineare Gleichungen			500	
Konvergenzkriterium Modellrechnung			0,00001 - 0,09m (Grobkalibrierung)	

^{*)} zumeist verwandte Recheneinstellungen, einige Parameter wurden wenn notwendig variiert (siehe unten)

Modellrechnungen

Es wurden insgesamt rund 200 Modellrechnungen mit verschiedenen Varianten der Modellgeometrie und Randbedingungen bzw. Randbedingungskombinationen durchgeführt. Die Berechnungen wurden unter Verwendung von Standard-Personalcomputern durchgeführt (bis Centrino Dual Core 2, 2Mhz, mindestens 1GByte RAM). Die Dauer einer Rechnung betrug, in Abhängigkeit von der Komplexität der Modellgeometrie, der Randbedingungsszenarien und Konvergenzkriterium zwischen 20 Minuten und 50 Stunden.

Zur Beschleunigung des Kalibrierungsvorganges wurde zunächst eine Grobkalibrierung unter Verwendung eines hohen Konvergenzkriteriums (0,01-0,05m) durchgeführt. Die Feinanpassung erfolgte dann mit Konvergenzkriterien zwischen 0,00001 und 0,001. Bei der Verwendung eines kleinen Konvergenzkriteriums lagen die Rechenzeiten erwartungsgemäß deutlich über denen der Grobkalibrierung. Bei einigen Modelldurchläufen konnte bei geringem Betrag des Konvergenzkriteriums (<0,0001) auch nach 50 Stunden keine Konvergenz erreicht werden. Ursachen waren zumeist Oszillationen mit sehr geringer Tendenz in Richtung Konvergenz. In diesen Fällen erfolgte eine Anpassung des Konvergenzkriteriums und anderer Modell-Run Parameter (Abschnitt 4.9.5). Einzelne Testrechnungen zeigten, dass die Ergebnisqualität, unter Berücksichtigung des allgemeinen Modellfehlers, nur geringfügig beeinflusst wurde.

Die Modellrechnungen wiesen häufig, insbesondere im Anfangsstadium, Oszillationen, temporäre Divergenzen oder mehr oder minder gleichmäßige periodische Schwankungen auf

(Abbildung 31), die teilweise zu nicht konvergierenden Modelllösungen bzw. zu extrem langen Rechenzeiten ($>>24\text{h}$) führten.

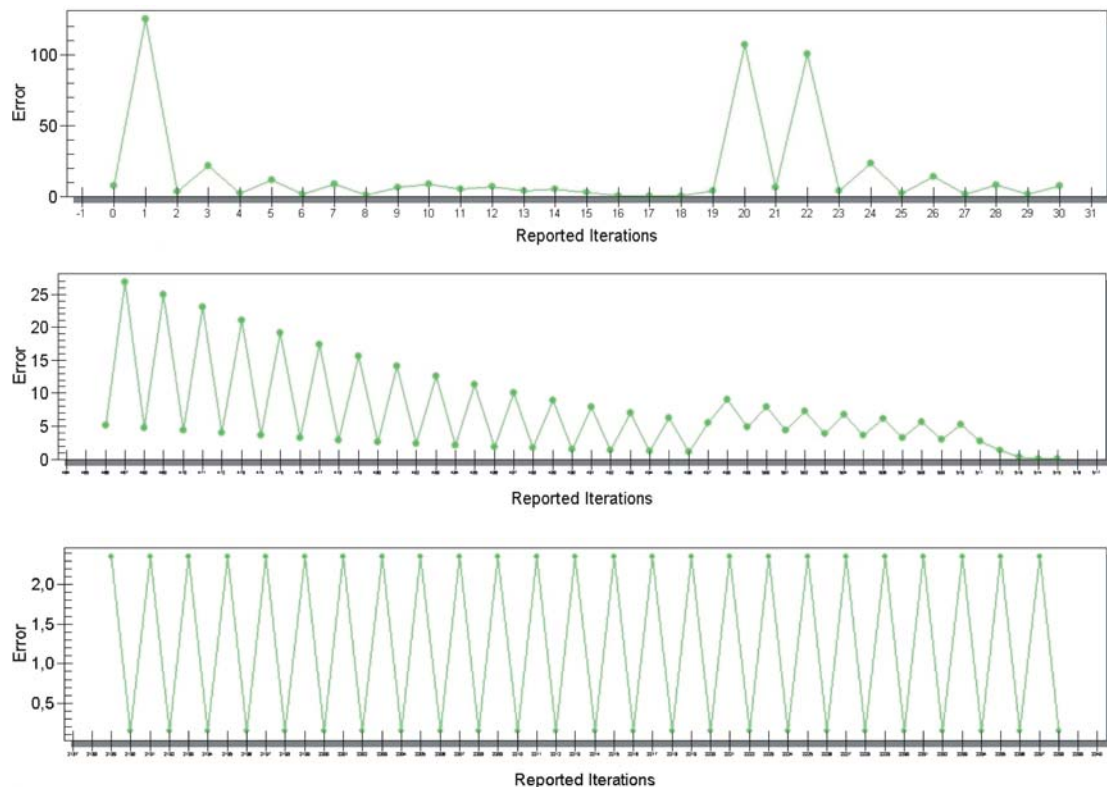


Abbildung 31 Typische Effekte bei der Modellrechnung (Error vs. Iteration), Ausschnitte

Diese negativen Effekte konnten durch die Variation verschiedener Berechnungsoptionen vermindert werden. Als relevant erwiesen sich im konkreten Fall die Folgenden:

- Lösungsalgorithmen (Pointwise iterative matrix solver, Preconditioned conjugate gradient method – polynomial und incomplete Choleski)
- Quadraturwahl (nodal/nodal, gaussian/gaussian, nodal/gaussian, gaussian/nodal)
- Relaxation-Parameter zur Lösung der linearisierten Matrix-Gleichung

Von den Lösungsalgorithmen erwies sich der Pointwise iterative matrix solver als der Zuverlässigste. Die Verwendung der preconditioned conjugate gradient method solver führte in bei den meisten Modellläufen zum Programmabsturz, waren dafür aber schneller wenn stabil.

Bei der Wahl der Quadratur wurde i.d.R. zwischen nodal/nodal und gaussian/gaussian variiert. Gaussian/gaussian führt laut Programmentwickler zu exakteren Lösungen. Bei Verwendung dieser Quadratur war die Rechenzeit meist deutlich länger als bei der nodal/nodal Quadratur, in einigen Berechnungen kam es zu starken Oszillationen bis hin zu Programmabstürzen. Für die meisten Berechnungen wurde deshalb die nodal/nodal Quadratur bevorzugt. Die gaussian/ nodal und nodal/ gaussian Quadraturen wurden getestet, wiesen aber gegenüber den zuvor genannten keine Vorteile auf.

Aufgrund der Neigung des Betrages des Modellfehlers zur Oszillation wurden verschiedene Varianten des Relaxation Parameter zur Lösung der linearen Strömungs- und Transportglei-

chung (Relaxation parameter for solving the linearized flow and transport equation) getestet. Als gute Anpassung erwies sich Parameter zwischen 0,8 und 0,3 die für die zur Instabilität neigenden Rechnungen verwandt wurden.

4.9.5 Modellkalibrierung, Validierung und Sensitivitätsanalyse

4.9.5.1 Modellkalibrierung

Die im Rahmen der hydrogeologischen Analyse abgeleiteten initialen Modellparameter (Abschnitt 4.9.4) und Randbedingungen wurden im Rahmen der Modellkalibrierung interaktiv angepasst. Dabei kamen zwei Methoden zur Anwendung.

1. Manuelle Anpassung durch Editieren und Eingabe veränderter Parameter direkt im Modellgitter
2. Realisierung über konzeptionelle GMS-Modelle (Abschnitt 2.10.7). Mit Hilfe dieser konzeptionellen Modelle können Parameter- und Randbedingungsszenarien kartiert bzw. interpretiert, in GMS abgelegt und dann automatisiert auf das Modellgitter projiziert werden. Dies ermöglichte eine effektive Anpassung der Modellparameter bzw., nach anschließender Neuberechnung der Grundwasserströmung, des hydraulischen Modells.

Kalibrierungsmessstellen

Die Kalibrierung erfolgte durch den Vergleich beobachteter und berechneter Grundwasserspiegel. Dafür standen für das Rotliegende nur wenige Messstellen in der Gera-Mülsen, Leukersdorf- und Härtensdorf-Folge zur Verfügung. Problematisch ist die Zuordnung vieler tieferer Messstellen zu einem bestimmten Grundwasserleiter oder Grundwasserleiterstockwerk sowie die räumliche Übertragbarkeit von Messergebnissen, da der Aufbau der tieferen Grundwasserleiter äußerst inhomogen ist (Abschnitt 4.2).

Für die tiefen Bereiche der Vorerzgebirgssenne (>100 m) liegen keine zuverlässigen Messergebnisse vor.

Die Kalibrierung erfolgte anhand von Grundwasserspiegelmessungen am 15.04.2006. Zur Überprüfung und Einordnung der berechneten Grundwasserstände wurden weiterhin Stichtagmessungen an folgenden Tagen verwandt: 15.01.2006, 15.10.2005, 15.07.2005, 15.04.2005 und 15.08.2002 (Hochwassersituation).

Die für die Kalibrierung des hydraulischen Modells verwandten Grundwassermessstellen im Bereich Thüringen listen Tabelle 49 (inkl. Messstellen mit unsicheren Filterlagen) und Tabelle 50 für Sachsen.

Tabelle 49 Grundwassermessstellen TLUG (Thüringen)

Messstellen Nr.	RW	HW	Filterlage_mHN	Einheit
133118_TLUG	4520060,00	5641860,00	275,54 (geschätzt)	Quartär
133193_TLUG	4519535,00	5636041,00	243,19 (geschätzt)	Quartär
133122_TLUG	4525910,00	5648270,00	209,86 (geschätzt)	Quartär
133109_TLUG	4522540,00	5651200,00	210,8 (geschätzt)	Quartär
133113_TLUG	4521710,00	5647270,00	224,02 (geschätzt)	Quartär

Messstellen Nr.	RW	HW	Filterlage_mHN	Einheit
132541_TLUG	4540882,70	5645741,40	201,9	Quartär
133328_TLUG	4530928,00	5640912,00	137,63	Rotliegend

Tabelle 50 Grundwassermessstellen LfUG (Sachsen), Prä-Quartär

Messstellen Nr.	RW	HW	Filterlage_mHN	Einheit
50416002_LfUG	4545233,72	5645589,38	220,76	Tertiär
50446001_LfUG	4571455	5642383	197,1	Hainichen-Schichten
51426001_LfUG	4555069,45	5631047,13	334,8	Leukersdorf-Folge
5142S0001_LfUG	4554273,36	5630507,66	357,065	Rotliegend
51436002_LfUG	4569117	5639171	257,16	Härtensdorf-Folge
51436005_LfUG	4565510	5634520	279,76	Leukersdorf-Folge
51436006_LfUG	4569279,41	5633955,12	339,91	Härtensdorf-Folge
5143S0012_LfUG	4564489	5633645	289,55	Rotliegend
5143S0021_LfUG	4567040	5630780	342,22	Rotliegend
5143S0027_LfUG	4559051,73	5631485,84	314,53	Rotliegend
5143S0040_LfUG	4562864,3	5632327,12	298,81	Rotliegend
5143S0042_LfUG	4566482	5633296	301,03	Rotliegend
52436001_LfUG	4560302,28	5618526,89	430,42	Grundgebirge
52436002_LfUG	4560303,39	5618528,51	446,46	Rotliegend
5243S0002_LfUG	4565234,54	5629618,08	316,11	Rotliegend
53456001_LfUG	4584367,59	5609450,85	616,68	Grundgebirge
53456002_LfUG	4584365,98	5609449,85	630,74	Grundgebirge

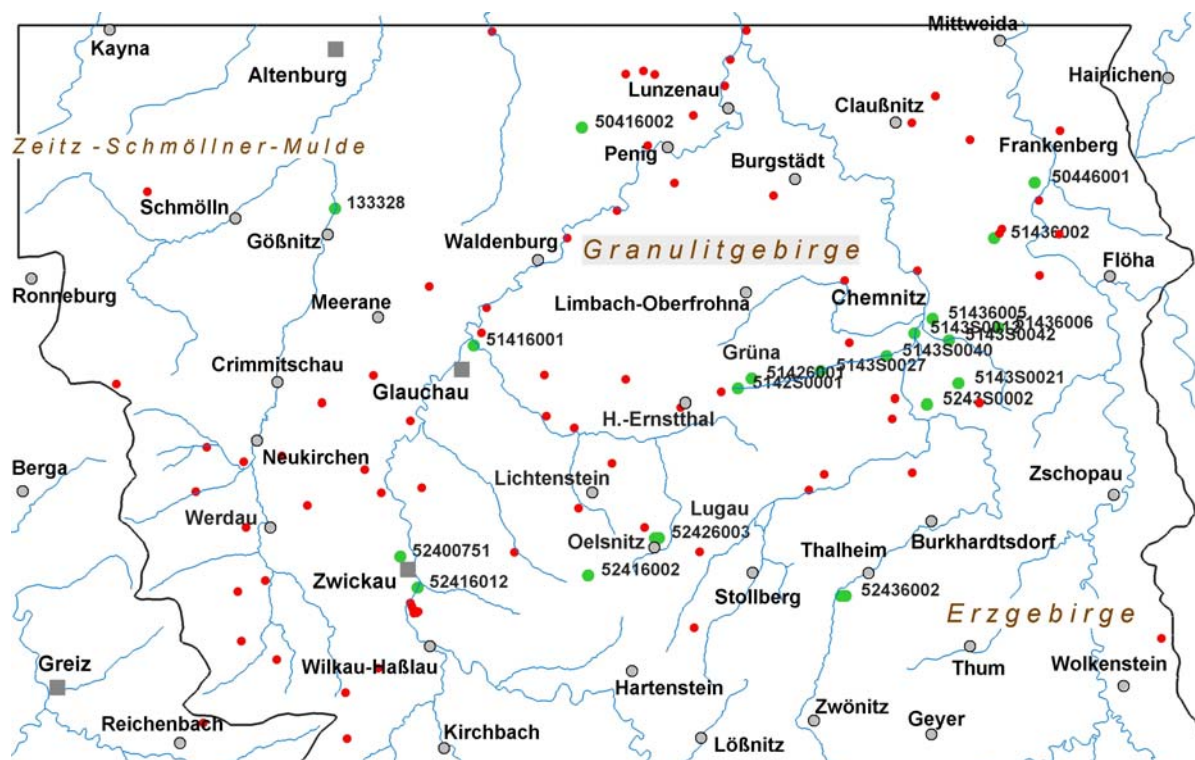


Abbildung 32 Kalibrierungsmessstellen, Prä-Quartär (grün) und weitere Messstellen (rot)

Abbildung 32 gibt einen Überblick über die Kalibrierungsmessstellen im tertiären bzw. Festgesteinsgrundwasserleiter (grün, mit Bezeichnung) und weiterer landesamtlicher Messstellen (rot).

Auch im Bereich Sachsen war für eine Reihe von Messstellen die Lage der Filterstrecke nicht sicher bekannt. Hier wurde, wie auch für verschiedene Messstellen in Thüringen (Tabelle 49) die Filterlage abgeschätzt. Aufgrund der sich daraus ergebenden Unsicherheiten in der Zuordnung des gemessenen Grundwasserspiegels wurden diese Messstellen im Kalibrierungsprozess nur orientierend verwandt (Tabelle 51).

Tabelle 51 Grundwassermessstellen mit unsicheren Filterlagen LfUG (Sachsen), Prä-Quartär

Messstellen Nr.	Filterlage [mHN]	Einheit	Messstellen Nr.	Filterlage [mHN]	Einheit
49411591_LfUG	170,56	Härtensdorf-Folge	52393656_LfUG	251,25	Rotliegend
49421144_LfUG	250,63	Grundgebirge	52400752_LfUG	241,15	Mülsen-Folge
50411143_LfUG	166,7	Grundgebirge	52403660_LfUG	264,92	Leukersdorf-Folge
50420821_LfUG	195,08	Grundgebirge	52403662_LfUG	280,23	Mülsen-Folge
50421458_LfUG	248,98	Tertiär	52403663_LfUG	271,39	Mülsen-Folge
50421564_LfUG	213,83	Grundgebirge	52403665_LfUG	237,33	Mülsen-Folge
50430645_LfUG	289,69	Tertiär	52410759_LfUG	295,82	Mülsen-Folge
50431936_LfUG	275,16	Flöha-Schichten	52410776_LfUG	236,26	Leukersdorf-Folge
50431950_LfUG	281,9	Grundgebirge	52410805_LfUG	302,7	Mülsen-Folge
50440915_LfUG	266,25	Grundgebirge	52411193_LfUG	263,57	Leukersdorf-Folge
50441689_LfUG	365,31	Grundgebirge	52411234_LfUG	241,42	Mülsen-Folge
51391127_LfUG	302,36	Grundgebirge	52420802_LfUG	366,62	Härtensdorf-Folge
51400744_LfUG	248,53	Mülsen-Folge	52420804_LfUG	337,51	Leukersdorf-Folge
51410820_LfUG	199,99	Grundgebirge	52431157_LfUG	321,19	Leukersdorf-Folge
51410936_LfUG	262,31	Mülsen-Folge	52433268_LfUG	297,16	Leukersdorf-Folge
51420814_LfUG	336,72	Härtensdorf-Folge	52433273_LfUG	407,81	Grundgebirge
51421070_LfUG	377,28	Grundgebirge	53393668_LfUG	380,79	Grundgebirge
51431694_LfUG	255	Härtensdorf-Folge	53393669_LfUG	394,66	Grundgebirge
51433270_LfUG	276,6	Leukersdorf-Folge	53401126_LfUG	334,18	Grundgebirge
51433279_LfUG	282,24	Leukersdorf-Folge	53403675_LfUG	328,52	Grundgebirge
51441154_LfUG	281,99	Grundgebirge	53403677_LfUG	412,48	Grundgebirge
51441155_LfUG	322,56	Grundgebirge	53403678_LfUG	336,22	Grundgebirge
52393652_LfUG	348,19	Grundgebirge	53420826_LfUG	469,1	Grundgebirge
52393653_LfUG	256,78	Rotliegend			

Erste Modellrechnungen unter Verwendung der Ausgangskalibrierung (Tabelle 47) wiesen generell höhere berechnete als beobachtete Grundwasserstände auf. Die Kalibrierung tendierte deshalb insgesamt in Richtung Absenkung der berechneten Grundwasserstände (vgl. Abbildung 34 und Abbildung 36).

Anpassung hydraulischer Parameter

Den Schwerpunkt der Kalibrierung bildete die Anpassung der hydraulischen Parameter der hydrogeologischen Einheiten und Störungen.

Für die Berechnungen wurden die Materialien der Ausgangskalibrierung (Tabelle 47) in verschiedenen Kombinationen zu jeweils 16 Klassen zusammengefasst. Dabei wurden Modellrechnungen sowohl ohne als auch mit besonderer Berücksichtigung von tieferen (unterhalb der Auflockerungszone) Störungsbereichen unterschiedlicher Lage und Orientierung durchgeführt.

Im Verlaufe der Kalibrierung erfolgten in zahlreichen Teilschritten sowohl Änderungen der Materialbelegung der Zellen des hydraulischen Modells als auch eine Anpassung der hydraulischen Modellparameter der einzelnen Materialien.

Grundtendenz bei der Variation des k_f -Wertes war eine Erhöhung der horizontalen hydraulischen Durchlässigkeiten gegenüber der Ausgangsparametrisierung. Lokal erfolgte jedoch auch eine Anpassung nach unten (Tabelle 52).

Tabelle 52 Materialzusammenführung und Kalibrierung

Materia ID	Bezeichnung	k_f [m/s] hor. ¹⁾	k_f [m/s] vert. ²⁾	effekt. Poros.	Dispersivität ⁴⁾ long./ transv. [m]	unges. Zone Preset-Typ ³⁾
Hydrostratigraphische Einheiten						
2	Gera-Mülsen-Folge	$7 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	0,15	2/ 0,2	sandy loam
3	Leukersdorf-Folge, hangend	$5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	0,12	45/ 4,5	silt loam
4	Leukersdorf-Folge lieg/ Abstrom NW/ Störung. Grundgeb., (sehr) tief	$3 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,08	10/ 1	sandy loam
5	Planitz-Folge	$5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	0,2	25/ 2,5	sandy clay loam
6	Härtensdorf-Folge, hangend	$5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	0,11	20/ 2	silt loam
7	Härtensdorf-Folge, lieg./ Erzgeb. Störungen tief	$5 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	0,07	10/ 1	sandy loam
8	Zwickauer Schichten	10^{-8}	$5 \cdot 10^{-9}$	0,15	40/ 4	silty clay
9	Grundgebirge	$8 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$	0,05	50/ 5	loam
10	Zechstein, Buntsandstein und vgl. Folgen/ Herzyn. Störungen, tief/ Erzgeb. Störungen, flach	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,12	20/ 2	sandy loam
11	Herzynische Störungen, flach	$2 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	0,18	5/ 0,5	sandy loam
21	Hainichen- und Flöha-Schichten	$5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	0,15	10/ 1	loam
Durchlässigkeitsklassen des hangenden Grundwasserleiters /-stockwerkes						
13	13 (DLK 3), 12 (DLK 2), 18 (DLK9)	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	0,15	0,25/ 0,025	loamy sand
14	14 (DLK 4), 20 (DLK 12)	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,15	0,15/ 0,015	sandy loam
15	15 (DLK 5), 19 (DLK 10, 11, 0)/ Störungen Grundgebirge, flach	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-6}$	0,1	0,05/ 0,005	sandy clay loam
16	DLK 6	10^{-8}	$5 \cdot 10^{-9}$	0,05	0,01/ 0,001	loam
17	DLK 7	$5 \cdot 10^{-10}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	0,01	0,005/ 0,0005	clay loam
Störungs- und Kluftzonen ⁴⁾						
22	Störungszonen Kl. 1 ($>10^{-4}$)	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,25	5/ 0,5	sandy loam
23	Störungszonen Kl. 2 (10^{-4} - $5 \cdot 10^{-5}$)	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	0,25	10/ 1	sandy loam
24	Störungszonen Kl. 3 ($<5 \cdot 10^{-5}$ - 10^{-5})	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,25	15/ 1,5	sandy loam
25	Störungszonen Kl. 4 ($<10^{-5}$ - $5 \cdot 10^{-6}$)	$7 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-5}$	0,2	20/ 2	sandy loam
26	Störungszonen Kl. 5 ($<5 \cdot 10^{-6}$ - 10^{-6})	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	0,2	25/ 2,5	sandy clay loam
27	Störungszonen Kl. 6 ($<10^{-6}$ - $5 \cdot 10^{-7}$)	$7 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-6}$	0,15	30/ 3	sandy clay loam
28	Störungszonen Kl. 7 ($<5 \cdot 10^{-7}$ - 10^{-7})	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0,15	35/ 3,5	sandy clay
29	Störungszonen Kl. 8 ($<10^{-7}$, stauend)	10^{-8}	10^{-7}	0,15	40/ 4	loam

Kommentare vgl. Tabelle 47

Grundwasserneubildung

Im Rahmen der Modellkalibrierung wurde die Menge und Verteilung der Grundwasserneubildung variiert. Ausgangspunkt war die Grundwasserneubildung nach GEOFEM 2004. Sie lieferte im Vergleich zur GWN nach GEOFEM 2000 und 2003 insgesamt geringe Neubildungsbeträge (Abschnitt 4.4.3), die im Sinne der allgemeinen Tendenz der Modellkalibrierung (Absenkung der berechneten Grundwasserstände) geeignet waren.

Primäre Taktik bei der Anpassung der GWN war die proportional gleichmäßige Änderung der GWN um die durch das GEOFEM-Konzept ermittelten Unterschiede in der GWN-Höhe der Teileinzugsgebiete beizubehalten. Erst in einem zweiten Schritt wurde für 5 Teileinzugsgebieten wurde im Rahmen lokaler Anpassungen auf Berechnungsergebnisse aus GEOFEM 2003 und 2000 zurückgegriffen. In einem letzten Schritt wurden lokal weitere Anpassungen in der GWN-Höhe vorgenommen.

In fast allen Teileinzugsgebieten wurde die GWN als Eingangsparameter des Modells, z.T. beträchtlich, nach unten korrigiert. Lokal musste der Ausgangswert nach GEOFEM 2004 bis um den Faktor 50 abgesenkt.

Die Feinabstimmung des Modells durch die Variation der GWN gestaltete sich aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Modellgrößen und hohen Modellsensitivität der GWN im Bereich der Optimalanpassung als schwierig (siehe Abschnitt 4.9.5.3).

Weitere Randbedingungen

Im Rahmen der Modellkalibrierung wurden auch die äußeren Modellrandbedingungen sowie die Art der Randbedingung an der Schnittstelle Atmosphäre/ Grundwasser variiert.

In Bezug auf die äußeren Randbedingungen (seitliche Modellränder) wurden Testrechnungen unter Verwendung von Festpotentialen entlang von Teilbereichen der westlichen und östlichen Modellgrenze durchgeführt, die aber in jeder Variante entweder zum Absturz der Modellrechnung oder zu einer vergleichsweise starken Abweichung von beobachteten und gemessenen Grundwasserständen führten. Hier wurde auf no-flow Randbedingungen entlang von Grundwasserscheiden umgestellt.

Für die Schnittstelle Atmosphäre/ Boden bzw. Grundwasser wurde zunächst mit einer klassischen specified flux-Randbedingung gearbeitet. Um während der Modellrechnung einen Anstieg des Grundwasserspiegels über Gelände zu verhindern wurde im gesamten Modellraum auf eine variable Randbedingung (Kombination von Flux- und Festpotential Randbedingung, Abschnitt 4.9.4.2) umgestellt.

Für die Implementierung der hydraulischen Anbindung des oberen Grundwasserstockwerkes an die mittleren Wasserstände der großen und mittelgroßen Vorfluter wurde eine GMS-FEMWATER Flussrandbedingung mit fixiertem Wasserstand verwandt, zu der es keine geeignete Alternative gab.

Der Verlauf der Kalibrierung des hydraulischen Modells ist in Abbildung 33 bis Abbildung 36 und Tabelle 53, anhand der Festgesteins- und einiger Quartärmessstellen (Thüringen) dokumentiert.

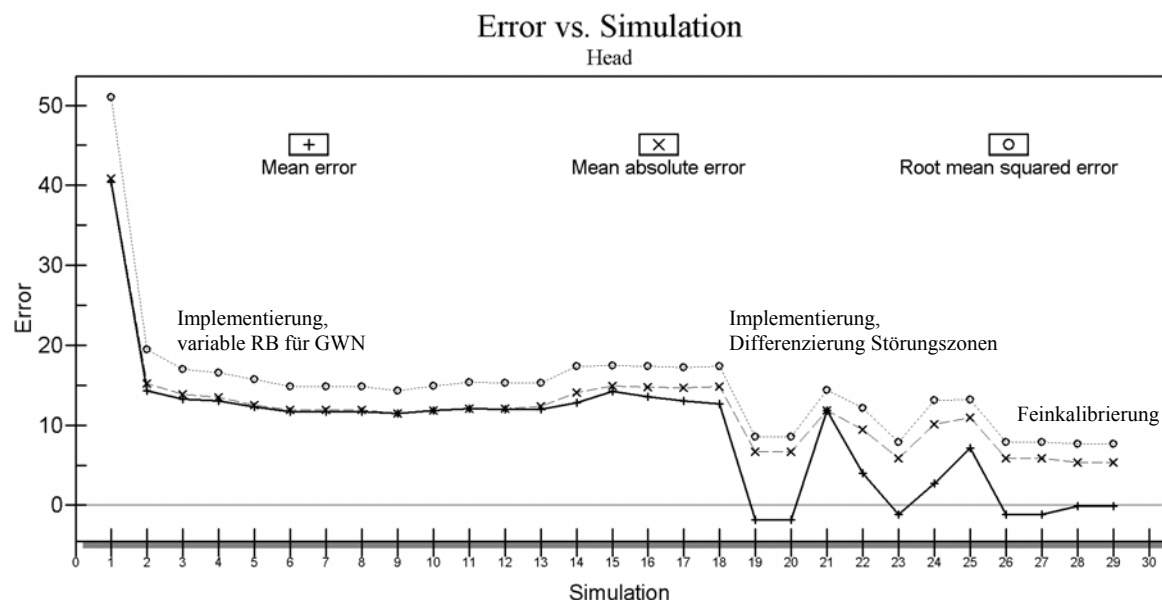


Abbildung 33 Auszug, Modellkalibrierung: Error vs. Simulation

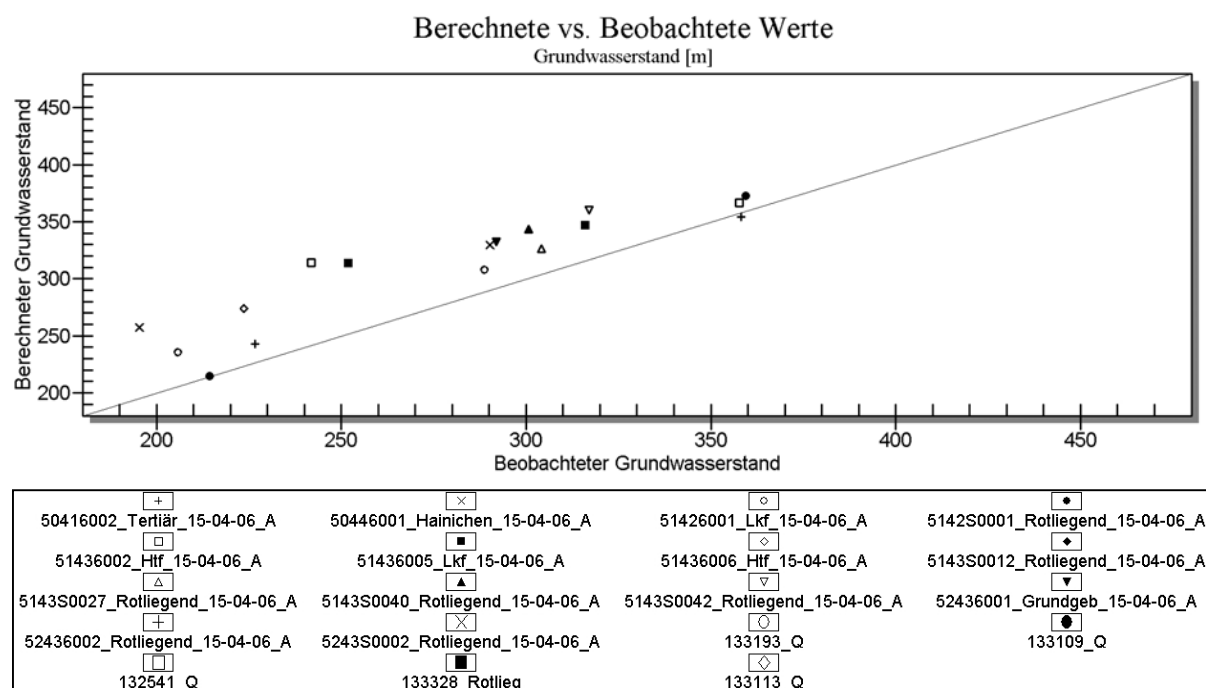


Abbildung 34 Berechnete vs. beobachtete Grundwasserstände zu Beginn der Kalibrierung

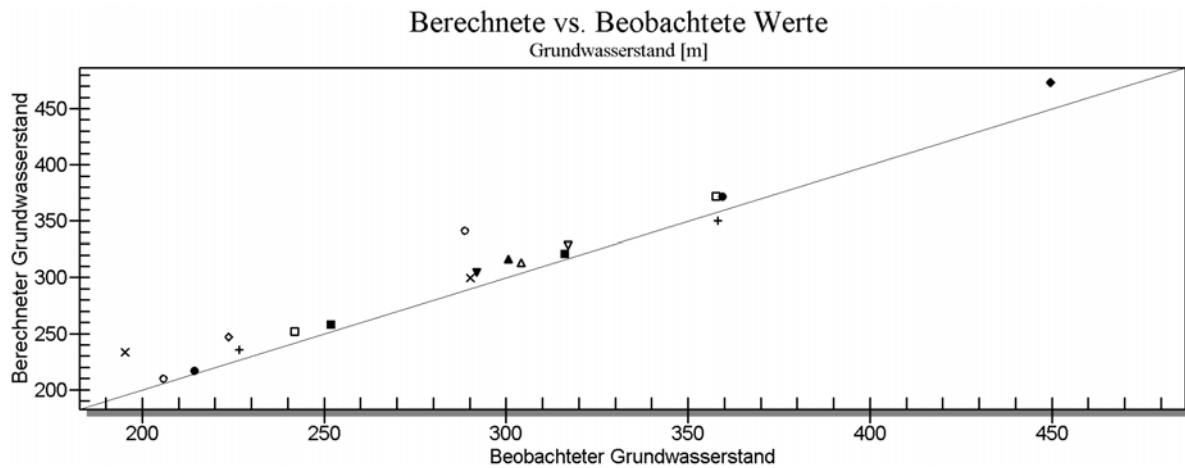


Abbildung 35 Berechnete vs. beobachtete Grundwasserstände während der Kalibrierung

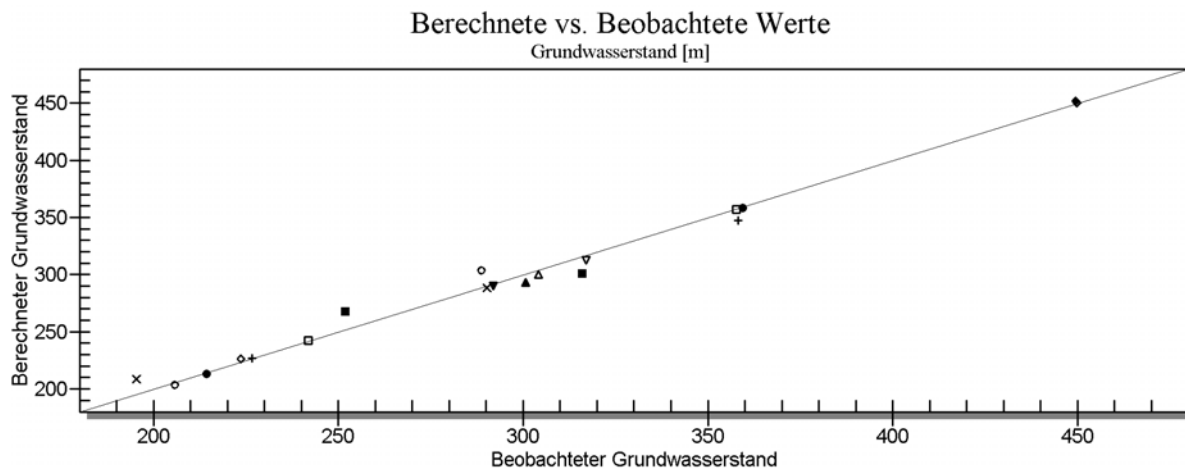


Abbildung 36 Berechnete vs. beobachtete Grundwasserstände am Ende der Kalibrierung

Der mittlere absolute Fehler konnte im Verlaufe der Kalibrierung von über 40m auf 5,3m verringert werden (Tabelle 53). Das Kalibrierungsergebnis (Abbildung 38 und

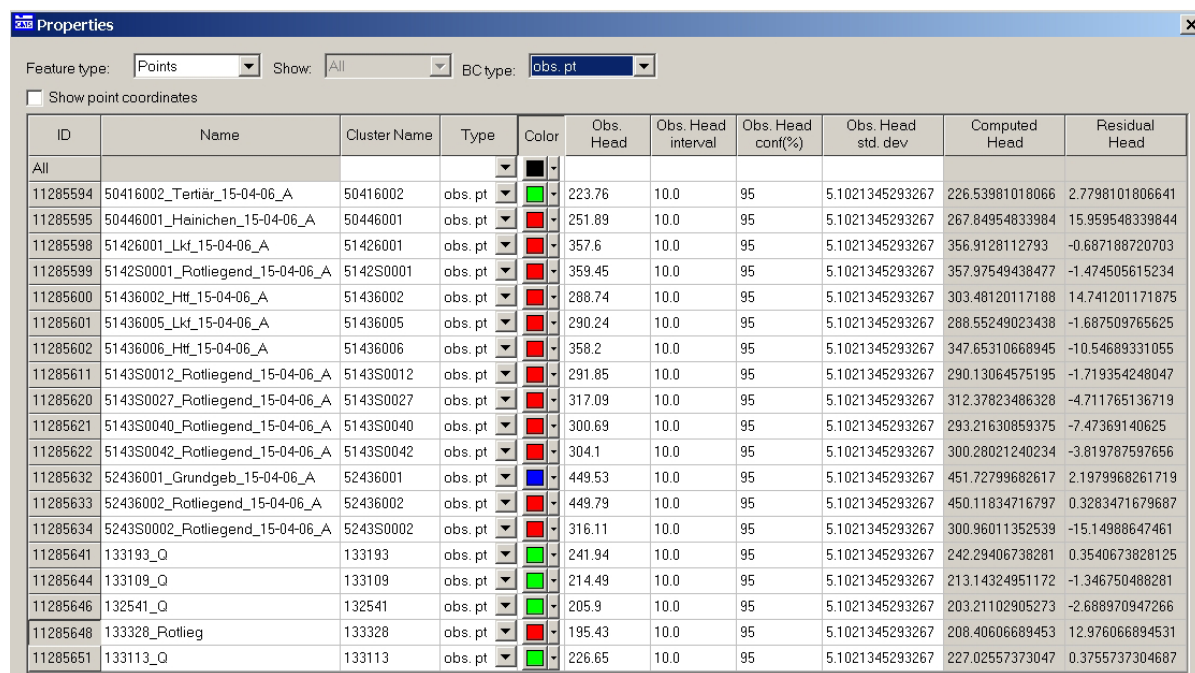
Abbildung 37) zeigt, dass für bestimmte Messstellen (z.B. 5143S0021, nicht abgebildet) auch nach Rechnung verschiedenster Parameter- und Randbedingungskombinationen, keine zufriedenstellende Anpassung der berechneten an die gemessenen Grundwasserstände erreicht werden konnte.

Allerdings sind bei großräumigen Modellierungen, u.a. aufgrund der verwandten groben Diskretisierung, erhöhten Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen zulässig. Darüber hinaus muss ggf. auch von einer eingeschränkten Repräsentativität der verwandten Festgesteinsmessstellen für den betrachteten Grundwasserleiter ausgegangen werden (vgl. Abschnitt 4.9.6).

Tabelle 53 Fehlerentwicklung während der Kalibrierung

Kalibrierungs- messtelle	Residual head (Differenz:gemessen – berechnet		
	Anfangszustand	Zwischenzustand	Endzustand
50416002	50,18	23,25	2,78
50446001	61,62	5,81	15,96
51426001	9,35	14,22	-0,69
5142S0001	13,17	11,59	-1,47
51436002	19,04	52,24	14,74
51436005	39,35	9,50	-1,69
51436006	-3,90	-8,22	-10,55
5143S0012	40,38	12,96	-1,72
5143S0027	43,30	11,08	-4,71
5143S0040	43,18	15,98	-7,47
5143S0042	22,37	9,30	-3,82
52436001	110,43	23,82	2,20
52436002	108,25	23,63	0,33
5243S0002	30,88	4,96	-15,15
133193	72,34	9,86	0,35
133109	0,09	1,90	-1,35
132541	29,56	3,67	-2,69
133328	62,04	38,02	12,98
133113	16,14	8,73	0,38
Mittl. abs. Fehler	40,82	15,2	5,32

Für letztere Annahme spricht die insgesamt bessere Anpassung des Modellergebnisses an die gemessenen quartären Grundwasserspiegel (Abbildung 38). Der mittlere absolute Fehler lag hier mit 4,1m unter jenem der Festgesteinsmessstellen.



ID	Name	Cluster Name	Type	Color	Obs. Head	Obs. Head interval	Obs. Head conf(%)	Obs. Head std. dev	Computed Head	Residual Head
All										
11285594	50416002_Tertiär_15-04-06_A	50416002	obs. pt		223.76	10.0	95	5.1021345293267	226.53981018066	2.7798101806641
11285595	50446001_Hainichen_15-04-06_A	50446001	obs. pt		251.89	10.0	95	5.1021345293267	267.84954833984	15.959548339844
11285598	51426001_Lkf_15-04-06_A	51426001	obs. pt		357.6	10.0	95	5.1021345293267	356.9128112793	-0.687188720703
11285599	5142S0001_Rotliegend_15-04-06_A	5142S0001	obs. pt		359.45	10.0	95	5.1021345293267	357.97549438477	-1.474505615234
11285600	51436002_Hw_15-04-06_A	51436002	obs. pt		288.74	10.0	95	5.1021345293267	303.48120117188	14.741201171875
11285601	51436005_Lkf_15-04-06_A	51436005	obs. pt		290.24	10.0	95	5.1021345293267	288.55249023438	-1.687509765625
11285602	51436006_Hw_15-04-06_A	51436006	obs. pt		358.2	10.0	95	5.1021345293267	347.65310668945	-10.54689331055
11285611	5143S0012_Rotliegend_15-04-06_A	5143S0012	obs. pt		291.85	10.0	95	5.1021345293267	290.13064575195	-1.719354248047
11285620	5143S0027_Rotliegend_15-04-06_A	5143S0027	obs. pt		317.09	10.0	95	5.1021345293267	312.37823486328	-4.711765136719
11285621	5143S0040_Rotliegend_15-04-06_A	5143S0040	obs. pt		300.69	10.0	95	5.1021345293267	293.21630859375	-7.47369140625
11285622	5143S0042_Rotliegend_15-04-06_A	5143S0042	obs. pt		304.1	10.0	95	5.1021345293267	300.28021240234	-3.819787597656
11285632	52436001_Grundgeb_15-04-06_A	52436001	obs. pt		449.53	10.0	95	5.1021345293267	451.72799682617	2.1979968261719
11285633	52436002_Rotliegend_15-04-06_A	52436002	obs. pt		449.79	10.0	95	5.1021345293267	450.11834716797	0.3283471679687
11285634	5243S0002_Rotliegend_15-04-06_A	5243S0002	obs. pt		316.11	10.0	95	5.1021345293267	300.96011352539	-15.14988647461
11285641	133193_Q	133193	obs. pt		241.94	10.0	95	5.1021345293267	242.29406738281	0.3540673828125
11285644	133109_Q	133109	obs. pt		214.49	10.0	95	5.1021345293267	213.14324951172	-1.346750488281
11285646	132541_Q	132541	obs. pt		205.9	10.0	95	5.1021345293267	203.21102905273	-2.688970947266
11285648	133328_Rotlieg	133328	obs. pt		195.43	10.0	95	5.1021345293267	208.40606689453	12.976066894531
11285651	133113_Q	133113	obs. pt		226.65	10.0	95	5.1021345293267	227.02557373047	0.3755737304687

Abbildung 37 Ausgewählte Kalibrierungsmessstellen: Auskopplung GMS

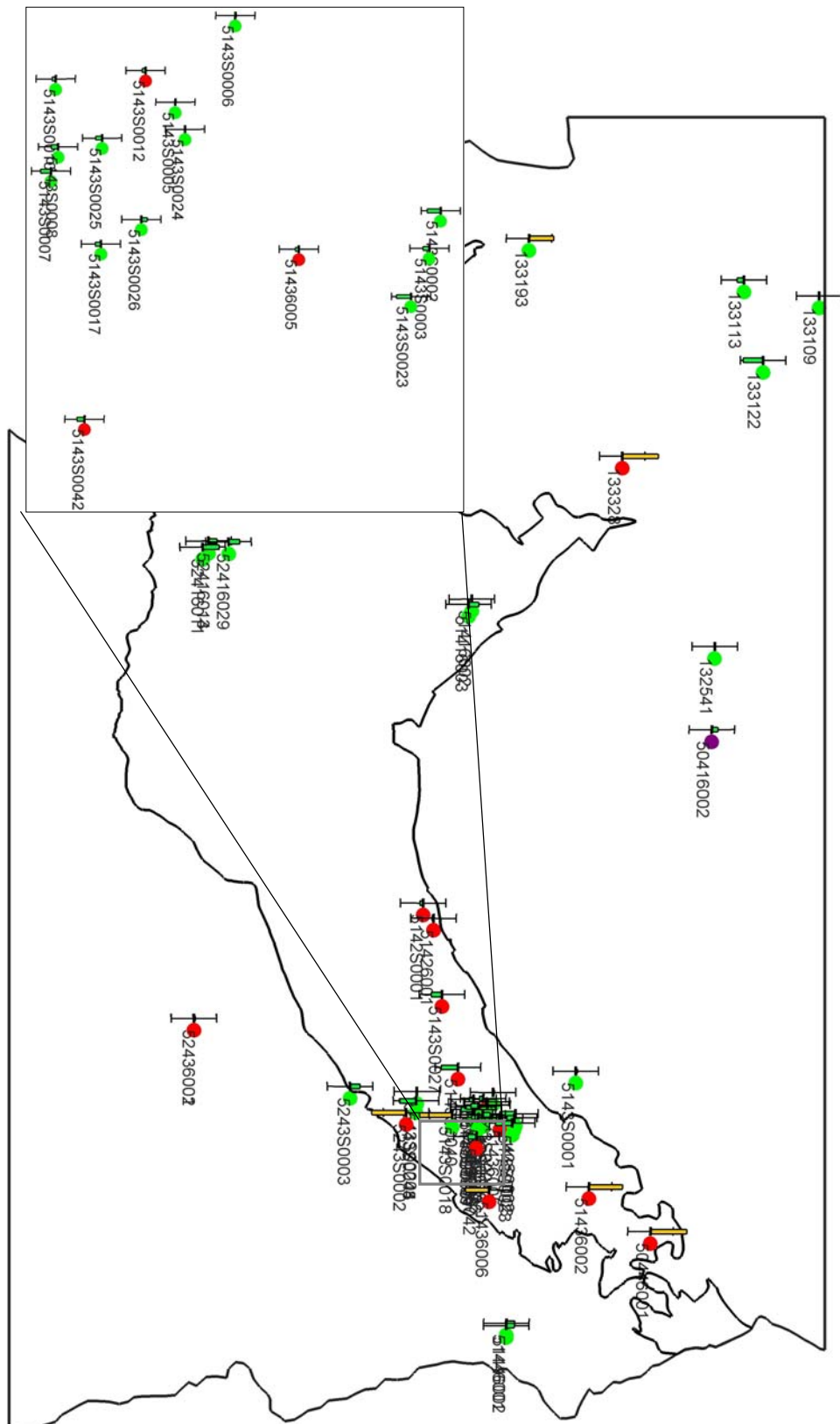


Abbildung 38 Räumliche Abbildung der Kalibrierungsmessstellen am Ende der Kalibrierung
(rot: Permokarbon/ Grundgebirge, grün: Quarär, violett:Tertiär)

In die Kalibrierung wurden Messdaten anderer Stichtagsmessungen einbezogen. Die Berechnung jahreszeitlich diskretisierter Szenarien/ instationärer Strömung war aufgrund des im Vergleich zum Grundwasserstand großen Modellfehlers nicht sinnvoll. Die Differenzen zwischen berechnetem und gemessenen Grundwasserständen zwischen Sommer 2002 und Frühjahr 2007 sind mit denen vom Stichtag 15.04.2006 vergleichbar (Tabelle 54).

Darüber hinaus ist kennzeichnend, dass im Vergleich zum aus der hydrogeologischen Analyse abgeleiteten Initialmodell, das hydraulische Modell nach der Kalibrierung

- insgesamt höhere hydraulische Gesteinsdurchlässigkeiten und
- deutlich geringere Grundwasserneubildungsraten

ausweist. Die Ursachen hierfür können sowohl im Modellfehler, als auch in einer generellen Unterschätzung der hydraulischen Wirkung von Kluft- und Störungszonen liegen (Abschnitt 4.9.6). Letztere ist nur punktuell durch Messstellen belegt/ repräsentiert.

Tabelle 54 Berechneter Grundwasserspiegel, beobachtete Werte und Differenzen an verschiedenen Stichtagen 2002, 2005 und 2006

		15.4.2006		15.1.2006		15.10.2005		15.07.2005		15.4.2005		15.8.2002	
Mess- stelle	berech- net	beob.	Diff.	beob.	Diff.	beob.	Diff.	beob.	Diff.	beob.	Diff.	beob.	Diff.
50416002	226,54	223,76	2,78	223,83	2,71	223,91	2,63	223,95	2,59	223,96	2,58		
50446001	267,85	251,89	15,96	251,71	16,14	251,40	16,45	251,45	16,40	251,63	16,22	252,53	15,32
51426001	356,91	357,60	-0,69	357,15	-0,24	357,00	-0,09	356,89	0,02	357,48	-0,57	357,39	-0,48
5142S0001	357,98	359,45	-1,47	359,40	-1,42	359,35	-1,37	359,16	-1,18	359,44	-1,46		
51436002	303,48	288,74	14,74	288,65	14,83	288,45	15,03	288,42	15,06	288,80	14,68	288,90	14,58
51436005	288,55	290,24	-1,69	289,79	-1,24	290,19	-1,64	290,15	-1,60	290,44	-1,89	290,71	-2,16
51436006	347,65	358,20	-10,55	356,56	-8,91	356,48	-8,83	356,69	-9,04	358,00	-10,35	356,44	-8,79
5143S0012	290,13	291,85	-1,72	291,67	-1,54	291,63	-1,50	291,65	-1,52	291,78	-1,65	292,24	-2,11
5143S0027	312,38	317,09	-4,71	316,92	-4,54	316,86	-4,48	316,86	-4,48	317,00	-4,62	317,45	-5,07
5143S0040	293,22	300,69	-7,47	300,40	-7,18	300,34	-7,12	300,39	-7,17	300,54	-7,32		
5143S0042	300,28	304,10	-3,82	304,14	-3,86	304,29	-4,01	304,30	-4,02	304,11	-3,83		
52436001	451,73	449,53	2,20	449,37	2,36	449,39	2,34	449,35	2,38	449,40	2,33	450,83	0,90
52436002	450,12	449,79	0,33	449,60	0,52	449,66	0,46	449,62	0,50	449,69	0,43	451,17	-1,05
5243S0002	300,96	316,11	-15,15	315,86	-14,90	315,91	-14,95	315,95	-14,99	316,12	-15,16	316,05	-15,09
52400751	263,10					259,57	3,53	259,64	3,46	259,71	3,39	260,19	2,91
51416001	237,34									235,50	1,84		
52416012	269,32											261,89	7,43
133193	242,29	241,94	0,35	241,02	1,27	241,11	1,18	241,3	0,99	242,19	0,10	241,42	0,87
133109	213,14	214,49	-1,35	214,16	-1,02	214,04	-0,90	214,23	-1,09	214,35	-1,21	215,06	-1,92
132541	203,21	205,90	-2,69	205,8	-2,59	205,55	-2,34	205,35	-2,14	205,79	-2,58	206,14	-2,93
133328	208,41	195,43	12,98	195,13	13,28	195,21	13,20	195,23	13,18	195,43	12,98	195,78	12,63
133113	227,03	226,65	0,38	225,84	1,19	225,97	1,06	226,3	0,73	226,86	0,17	230,02	-2,99
Mittl. absol. Fehler			5,32		5,25		5,15		5,13		5,02		5,72

4.9.5.2 Modellverifizierung und Validierung

Im Rahmen des Verifizierungsprozesses wurden unter Verwendung verschiedener konzeptueller GMS-Modelle verschiedene Randbedingungs- und Parameterkonstellationen gerechnet und deren Lösungen miteinander verglichen.

Dabei boten die äußeren Randbedingungen und die Flussrandbedingungen in Bezug auf die Variation von Art und Betrag der jeweiligen Randbedingung keine akzeptablen Alternativen (siehe Abschnitt 4.9.5.1).

Die Variation der Grundwasserneubildung bei Beibehaltung der hydraulischen Durchlässigkeiten des Initialmodells, erbrachte keine zufriedenstellenden Modellierungsergebnisse. Deshalb wurde im Rahmen der Grobkalibrierung zunächst der Spielraum der realistischen hydraulischen Durchlässigkeiten ausgeschöpft. Danach erfolgte die Feinanpassung durch Variation der GWN-Beträge.

In Bezug auf die hydraulischen Parameter des Untergrundes wurde versucht die recherchierten abgesicherten Eingangsdaten innerhalb ihrer Schwankungsbreiten im Modell zu testen und so mögliche alternative Parametrisierungsvarianten zu prüfen und auszuschließen. Im Rahmen des Kalibrierungsprozesses wurden deshalb verschiedene Anpassungsszenarien/Kombinationen gerechnet und die beste Anpassung weitergeführt.

Die Begrenzung in der Anzahl gleichzeitig verwendbarer Materialien (16) setzte der Differenzierung in der hydraulischen Durchlässigkeit Grenzen. Angesichts des begrenzten hydrogeologischen Kenntnisstandes und des Modellmaßstabes ist diese jedoch ausreichend.

Dennoch ist aufgrund verbleibender Kombinationsvarianten eine eindeutige Modellverifizierung in Bezug auf die Höhe und Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten nicht möglich.

Die Feinabstimmung des Modells erfolgte durch Variation der Grundwasserneubildungsbeträge und deren Verteilung. Hier bot sich eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten, die aber durch das verwandte Konzept der (möglichst genauen) Beibehaltung der durch GEOFEM 2004 vorgegebenen Verteilung der Grundwasserneubildungshöhen, eingeschränkt wurden. Es kann deshalb von einer ausreichend verifizierten Umsetzung der Randbedingungsanforderung ausgegangen werden, wenngleich auch hier eine eindeutige Modellverifizierung kaum möglich ist.

Im Rahmen der Validierung wurde versucht die Plausibilität der Modellierungs-/Berechnungsergebnisse bzw. des Modellverhaltens durch die Herstellung eines Zusammenhanges mit realen hydrogeologischen Phänomenen (Feldparameter und -beobachtungen) nachzuweisen.

Hydrogeologische Untersuchungen in Kluft- und insbesondere Störungsbereichen im Raum Zwickau belegen die starke hydraulische Heterogenität dieser Strukturen. Dabei variieren Druckspiegel und Ergiebigkeit auf engstem Raum häufig beträchtlich (Abschnitt 4.3). Die deutliche Abweichung der Grundwasserstände in einigen wenigen Kalibrierungsmessstellen (auch nach der Kalibrierung) von den realen Messwerten könnte ein Hinweis auf dieses Phänomen sein.

4.9.5.3 Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen der Modellkalibrierung und Modelltestung konnten Aussagen zur Sensitivität einzelner Modellparameter abgeleitet werden. Obwohl sich die Veränderung hydraulischer Durchlässigkeiten generell deutlich stärker auf die berechneten Grundwasserspiegel auswirkte, waren auch veränderte Grundwasserneubildungsraten von Bedeutung für das Modellverhalten.

Für die **Grobkalibrierung** erwiesen sich die hydraulischen Durchlässigkeiten der hydrogeologischen Einheiten als einflussreichster Modellparameter. Variationen der Grundwasserneubildung (Szenarios nach GEOFEM 2000, 2003 und 2004) hatten dagegen nur geringfügige quantitative Auswirkungen auf die berechneten Grundwasserspiegel. Rechnungen zur Überprüfung der Modellsensitivität ergaben dass eine deutliche Veränderung der GWN-Rate schon durch geringfügige Anpassungen des k_f -Wertes ausgeglichen werden. Danach hatte die Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit um 0,1-0,2 Größenordnungen eine ähnliche Auswirkung wie die alternative Absenkung der Grundwasserneubildung auf 1/5 des Ausgangswertes. Stellt man diese Parameteränderungen in Bezug zum für die Modellkalibrierung erwarteten/zulässigen Schwankungsbereich dieser Parameter ergibt sich die deutlich höhere Modellsensitivität des k_f -Wertes.

Waren die Spielräume für die Anpassung der hydraulischen Durchlässigkeiten ausgeschöpft oder konnte im Rahmen der **Feinkalibrierung** die gewünschte Anpassung des Grundwasser-

spiegels nicht durch Veränderung des k_f -Wertes erreicht werden, wurden Anpassungen der GWN durchgeführt. Als praktikabel erwies sich das Ansetzen zu geringer GWN-Beträge gefolgt von einer allmählichen Anhebung der GWN-Beträge bis zum Erreichen der optimalen Anpassung zwischen gemessenen und berechneten Werten („von unten“). Im Bereich der Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Grundwasserständen erfolgt der Umschlag in Richtung zu hoch berechneter Grundwasserspiegel dann sehr schnell. Hier wirkt die GWN, auch im Vergleich zur hydraulischen Durchlässigkeit, als äußerst sensibler Parameter. Die Auswirkungen einer GWN-Veränderung auf den berechneten Grundwasserstand ist in diesem Anpassungsbereich nur schwer kontrollierbar, die Auswirkungen auch geringer und lokaler Änderungen der GWN z.T. sehr komplex und weitreichend.

Die Randbedingungen zur Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften der ungesättigten Zone (Feuchtegehalt, relative Durchlässigkeit und Wasserkapazität als Funktion des Druckspiegels) wurden im Rahmen des gewählten „van Genuchten Ansatzes“ (Kurven) (van Genuchten 1980) variiert. Dabei wurden Ansätze für verschiedene repräsentative Boden- bzw. Gesteinstypen getestet (nach CARSEL et al. 1988) die aber, im Vergleich zur GWN und dem k_f -Wert der grundwassererfüllten Bereiche, eine geringe Sensitivität aufwiesen.

4.9.6 Fehlerbetrachtung und Programmgrenzen

Die Modellierung von Grundwasserströmung für den weiteren Vorerzgebirgssenkraum, insbesondere in den tieferen Grundwasserleitern, stellte unter den gegebenen technischen, und natürlichen Randbedingungen sowie der begrenzten Datenlage eine Herausforderung dar.

Der **Diskretisierung des Modellgitters** waren aufgrund der Größe des Modellraumes Grenzen gesetzt. So konnten trotz Optimierung der Verteilung feiner und gröberer Diskretisierung kleinräumige hydrogeologische Strukturen nur begrenzt im hydraulischen Modell/ in der Parametrisierung umgesetzt werden. Liegen Kalibrierungsmessstellen im Grenzbereich hydrogeologischer Einheiten können berechnete und gemessene Grundwasserstände deutlich voneinander abweichen, wenn die großmaßstäbliche Modelldiskretisierung diese Differenzierung nicht erfasst. Es musste also in dieser Hinsicht ein, für den angestrebten großräumigen Betrachtungsmaßstab, angemessener Kompromiss eingegangen werden.

In diesem Zusammenhang muss auf das Problem der **Bewertung von Grundwassermessungen im Festgestein** der Vorerzgebirgssenke hingewiesen werden. Diverse Untersuchungen im Kluftgesteinsgrundwasserleiter (Abschnitte 4.3 und 4.6.3) haben gezeigt, wie engäumig (vertikal und horizontal) Druckspiegel im Kluftgestein, insbesondere in Störungsbereichen, variieren können. Deshalb stellen auch die Grundwasserstände in den verwendeten Kalibrierungsmessstellen nur punktuelle Messungen dar, deren Relevanz für den weiteren GWL mit einem (erheblichen?) Fehler behaftet sein wird.

Ein besonderes Problem stellt die **geringe Anzahl von Messstellen im Festgesteinsbereich** dar. Darüber hinaus war die Filterlage zahlreicher Messstellen nur abschätzbar (Tabelle 51). Bei einigen Messstellen im Raum Zwickau und Oelsnitz ist zudem ein deutlicher aber schwer quantifizierbarer Einfluss durch den Bergbau zu berücksichtigen. Insgesamt gingen zu den ausgewählten Stichtagen für den Festgesteinsbereich 20 Messstellen der landesamtli-

chen Messnetze in die Modellkalibrierung ein. Diese konzentrieren sich auf Gebiete in der östlichen und zentralen Vorerzgebirgssenke, so dass bezüglich der Kalibrierung nicht alle Modellbereiche mit abgesicherten Messstellen abgedeckt werden konnten.

Der **Kenntnisstand bezüglich der Verteilung und Höhe hydraulischer Parameter** variiert im Modellgebiet sehr stark. Kann für den hangenden Grundwasserleiter noch auf relativ differenzierte hydraulische Eigenschaften auf Grundlage der hydrogeologischen Kartierung der Landesämter zurückgegriffen werden, lässt sich für die tieferen (Festgesteins)folgen keine abgesicherte Verteilung hydraulischer Parameter ableiten. Felddaten, Tests und ggf. Korngrößenanalysen beschränken sich auf punktuelle Messungen, die nicht ohne weiteres auf die Gesamtheit der hydrogeologischen Einheit übertragbar sind. Die auf Grundlage der hydrogeologischen Analyse (Abschnitt 4.2) abgeleiteten Parameter für die unterschiedenen Einheiten stellen bestmögliche Anpassungen für die jeweilige hydrogeologische Einheit dar (Tabelle 47), die im Verlaufe der Kalibrierung angepasst wurde. Dabei wurde versucht eine einheitliche Parametrisierung der einzelnen hydrogeologischen Einheiten, soweit keine Indizien auf Differenzierung vorlagen, zu erhalten.

Die hydraulischen Gradienten zwischen benachbarten Zellen sind den Durchlässigkeiten benachbarter Modellzellen.

Die **Anzahl** der für die Umsetzung der hydraulischen Eigenschaften im GMS-FEMWATER Modell verwandten Materialien ist auf 16 beschränkt. Eine Anpassung der Programmalgorithmen zur Verwendung von mehr **Materialien** wird diskutiert, stand aber für vorliegende Arbeit nicht zur Verfügung. Es mussten deshalb für die Rechnungen, in Abhängigkeit von der gerechneten Parametrisierungsvariante ggf. Materialien zusammengefasst werden. Allerdings sind angesichts des vorliegenden Kenntnisstandes zu den hydraulischen Eigenschaften der Einheiten 16 Materialien ausreichend. Die notwendige Zusammenfassung von Materialien erhöht jedoch den Arbeitsaufwand bei der Berechnung verschiedener Parameterszenarien beträchtlich.

Programmgrenzen

GMS FEMWATER wies eine Reihe von Einschränkungen in Bezug auf Programmfunktionen und Manipulierbarkeit auf, deren teilweise Implementierung erst in zukünftigen Programmversionen erwartet werden kann. Dazu gehören:

- Einschränkungen und Instabilitäten im Display/ Konturierung und Verwaltung dreidimensionaler (Schnitt-) Darstellungen, insbesondere bei 3D-Meshobjekten und Parametermodellen
- Einschränkungen bei der Projektion von Rasterobjekten (z.B. Karten) auf 3D Objekte)
- unzureichende Selektions- und Rotationstools
- Numerische Instabilitäten bei der Weiterverwendung (z.B. hydraulische Modellierung) komplexer Raummodelle aus anderen Anwendungen (z.B. GOCAD)
- Einschränkungen im Bau und der automatisierten Manipulation komplexer geometrischer Raummodelle
- Begrenzung der Anzahl gleichzeitig verwendbarer Materialien in GMS

FEMWATER

- Defizite in der Verwaltung von hydraulischen Kennwerten und anderen Materialeigenschaften
- Einschränkungen bei der Übertragung konzeptioneller Randbedingungsmodelle auf hydraulische Modelle (nicht alle Randbedingungen sind – zumindest bei großen komplexen Modellen - projizierbar)
- Unzureichende Möglichkeiten der automatisierten und manuellen Manipulation bestehender Parametrisierungen (z.B. keine selektive Überschreibung von Randbedingungen/ Parametern möglich)
- Fehlende Implementierung von Kolmation für die Flussrandbedingung
- Einschränkungen in den Kalibrierungsfunktionalitäten (z.B. inverse Modellierung)
- Programminstabilität bei der Verwendung von particle tracking Funktionen

4.9.7 Ergebnisse und Anwendungen der hydraulischen Modellierung

Im folgenden werden verschiedene Ergebnisse und Anwendungen der hydraulischen Modellierung diskutiert. Sind bei Koordinatenangaben lediglich die letzten 5 Ziffern angegeben, beziehen sich diese auf HW: 56xxxxx und RW: 45xxxxx.

4.9.7.1 Grundwasserfluss im Modellraum

Die folgenden Abbildungen (Modellauskopplungen) beschreiben den Grundwasserfluss im Modellraum in verschiedenen Teufenniveaus (Horizontalschnitte).

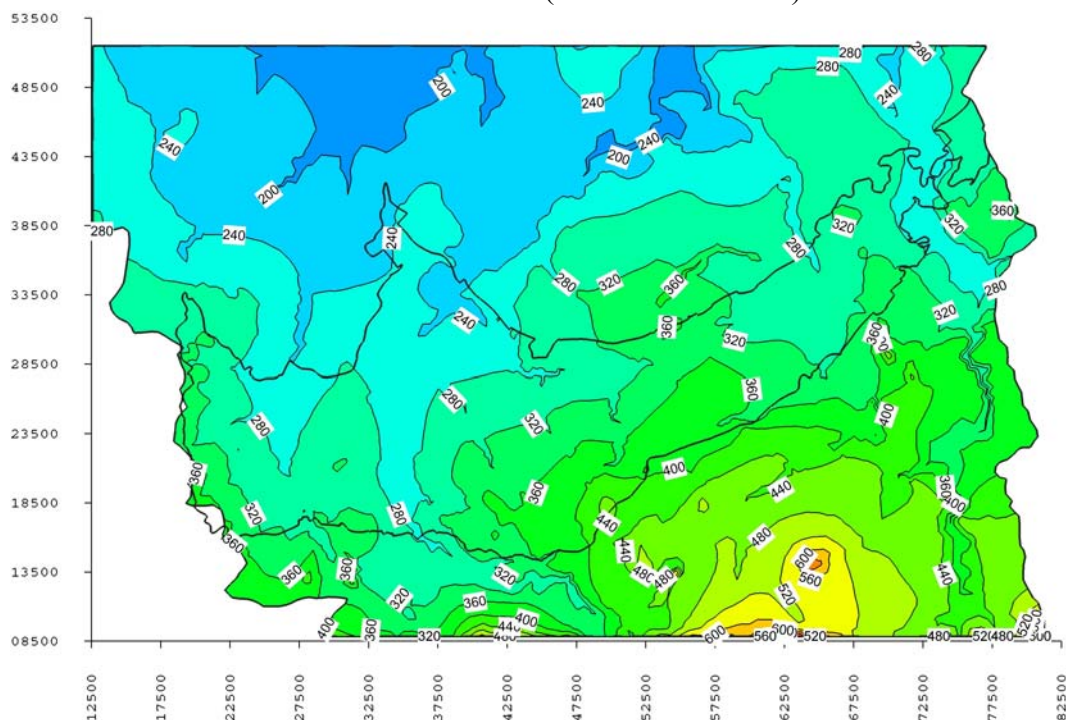


Abbildung 39 Grundwassergleichenplan, oberflächennahe Auflockerungszone

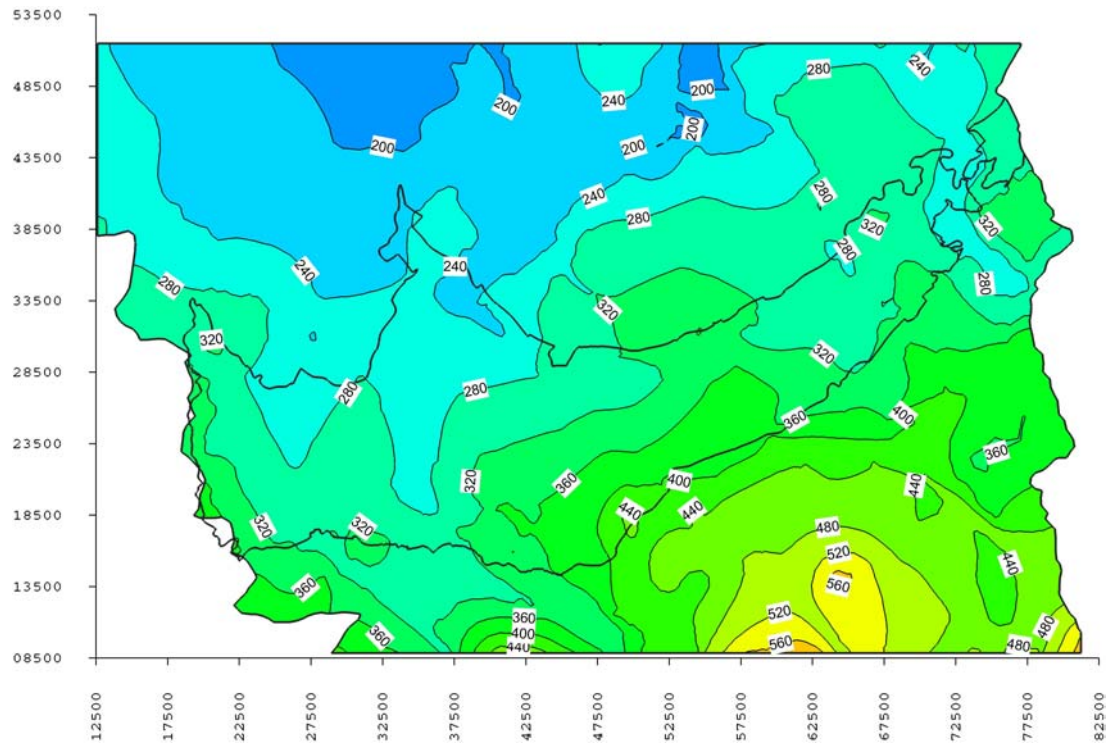


Abbildung 40 Grundwassergleichenplan, horizontaler Schnitt, 0m NN

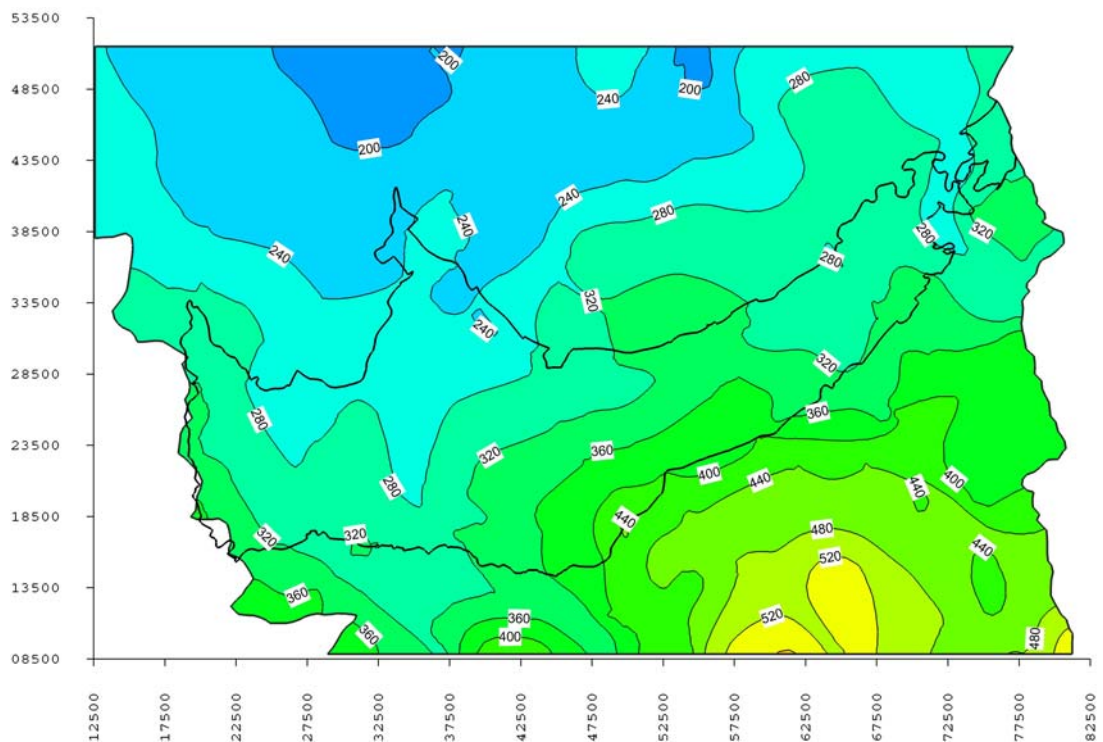
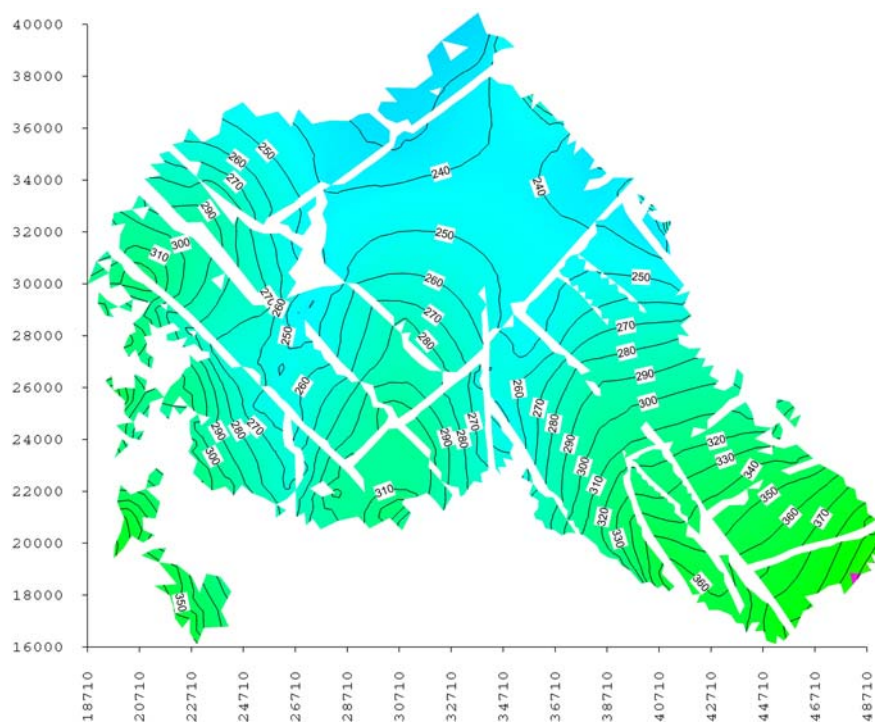


Abbildung 41 Grundwassergleichenplan, horizontaler Schnitt, -510m NN

Die Hauptabstromrichtung ist nach Nord bis Nordwest gerichtet. Deutlich zu erkennen ist die mit der Tiefe abnehmende Differenzierung des Verlaufes der Hydroisohypsen, aufgrund des sich ausgleichenden Einflusses der großen Vorfluter.



Der generelle Verlauf der Hydroisohypsen in den tieferen Bereichen der hydrogeologischen Einheiten fügt sich in diese Tendenz ein, wie die Beispiele der Gera-Mülsen-Folge und der unteren Leukersdorf-Folge zeigen (Abbildung 42 und Abbildung 43)

Abbildung 42
Grundwasserfluss in der Gera-Mülsen-Folge

Die sich vom Umgebungsgestein hydraulisch abgrenzenden Störungen sind als weiße Zonen im Bereich der Mls-Folge bzw. als Versetzungen in den Konturen der Lkf-Folge erkennbar.

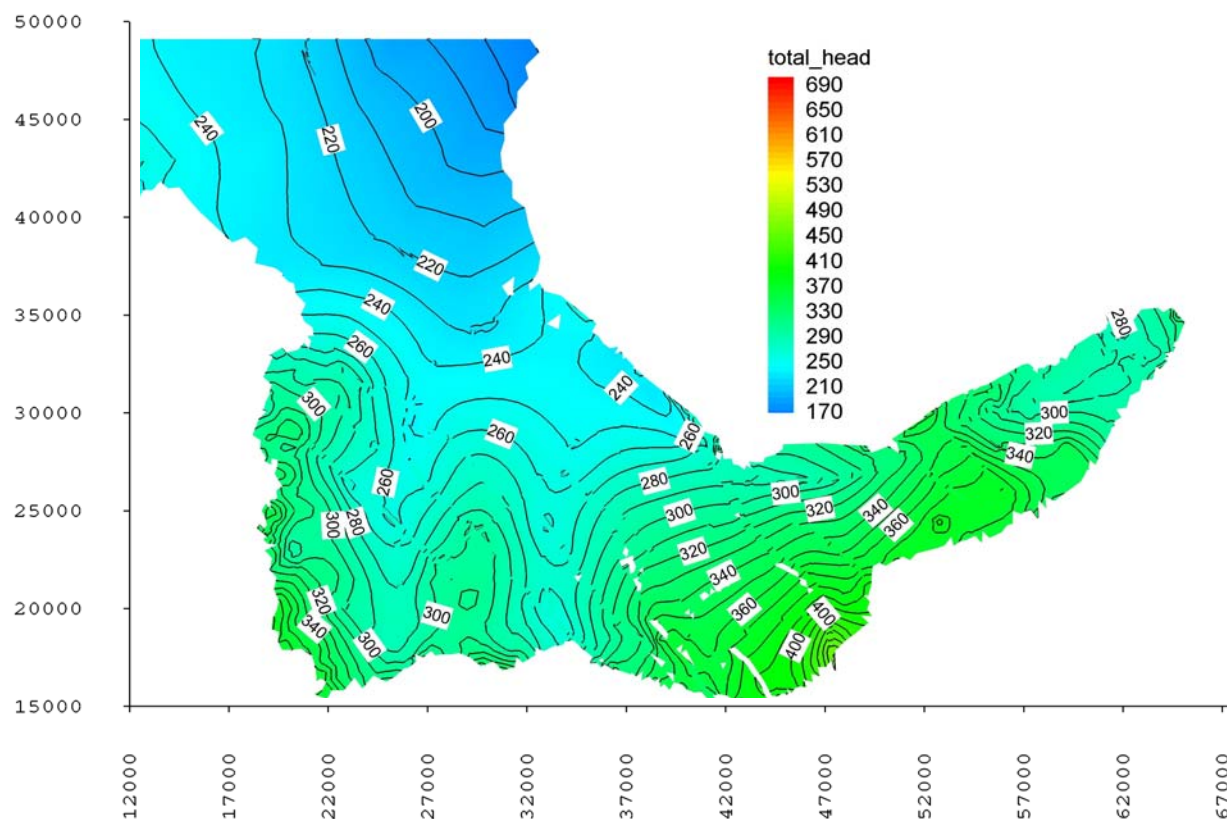


Abbildung 43 Grundwasserfluss in der unteren Leukersdorf-Folge und dem Übergangsbereich in die Zeititz-Schmöllner Mulde

4.9.7.2 Fließgeschwindigkeiten und präferentielle Fließwege

Die Grundwasserleiter der Vorerzgebirgssenke und des nordwestlichen Abstroms weisen gegenüber dem geringer durchlässigen umgebenden Grundgebirge im allgemeinen deutlich erhöhte Fließgeschwindigkeiten auf. Dies wird bei der Darstellung der Fließgeschwindigkeiten deutlich (Abbildung 44). Der Wertebereich der „nodal velocity“ reicht dabei von $3.3 \cdot 10^{-15}$ m/s bis $7.4 \cdot 10^{-06}$ m/s. Die Fließgeschwindigkeit korreliert in der Darstellung mit der Pfeilgröße und Farbe (von dunkelblau über hellblau, grün, gelb, orange nach rot zunehmend).

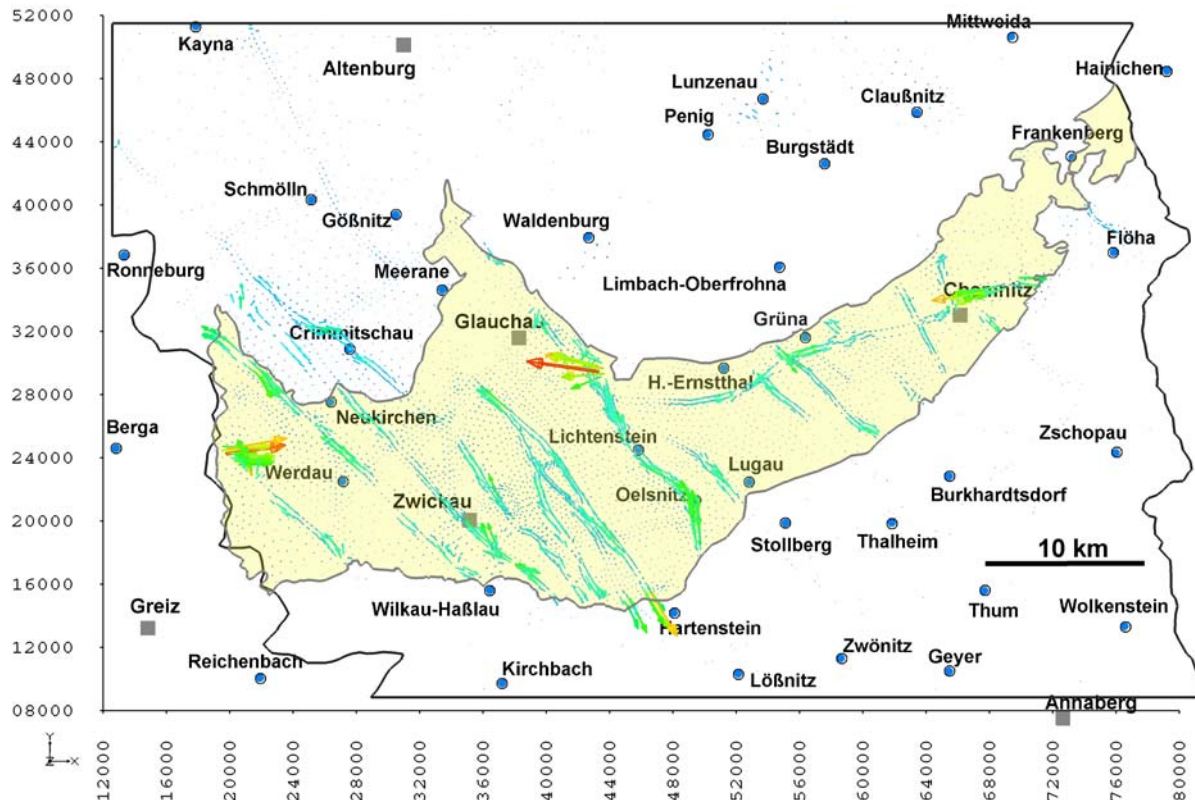


Abbildung 44 Vektorbasierte Darstellung der Fließgeschwindigkeiten im Modellraum

Deutlich erkennbar sind die höheren Geschwindigkeiten im Bereich der VES und entlang von herzynischer Störungszonen und der Lungwitztalzone. Im Bereich hoher Gradienten und guter Durchlässigkeit (Störungen) ist ein besonders intensiver Grundwasserfluss zu beobachten. Dazu gehört der Raum Chemnitz und der Kreuzungsbereich von Rödlitzer Hauptverwerfung und Lungwitztalzone aber auch Störungsbereiche nordwestlich von Werdau (Abbildung 45). Aber auch entlang der Koberbachtal-Störung nordwestlich von Neukirchen wurden hohe Fließgeschwindigkeiten berechnet, möglicherweise ein Hinweis auf die Ursache des Bilanzdefizits im Bilanzgebiet Koberbach (Abschnitt 4.4.3).

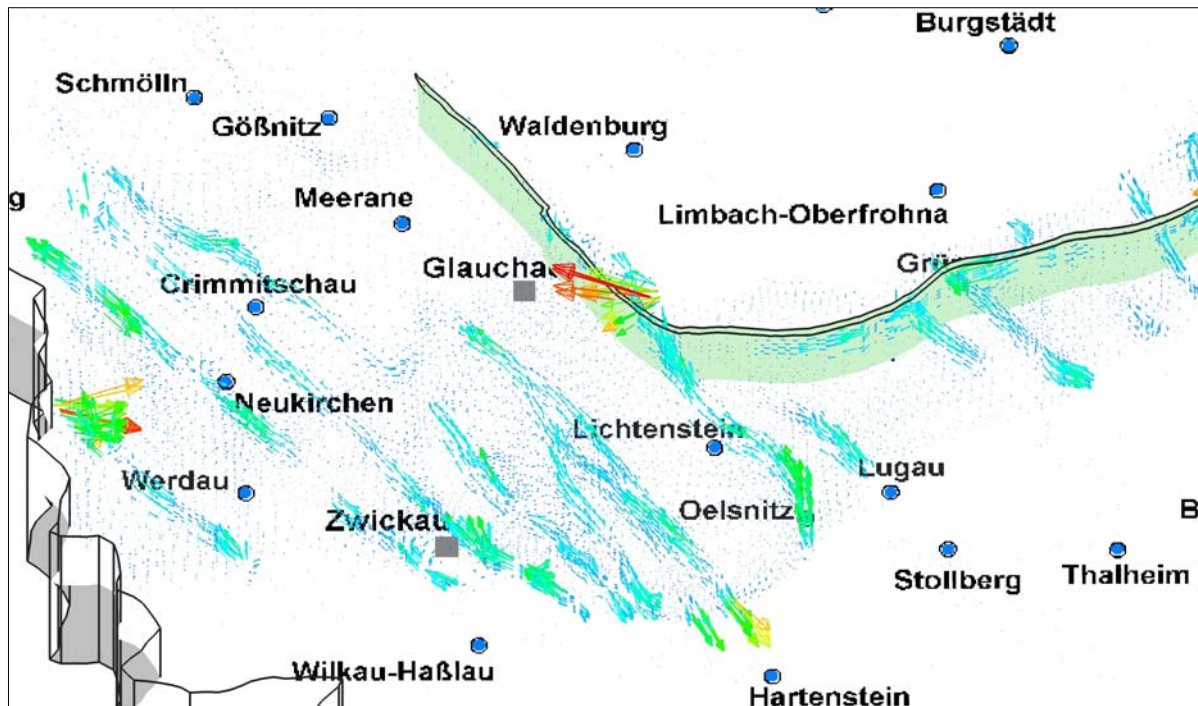


Abbildung 45 Perspektivische Darstellung von Fließgeschwindigkeitsvektoren (mit Lungwitztalzone)

4.9.7.3 Identifikation von Fließbahnen und Fließdauer/ Particle Tracking

Zur Abbildung einzelner Grundwasserfließbahnen wurde „Particle Tracking“ durchgeführt. Dadurch ist es möglich die räumliche Bewegung des Grundwasserstromes nachzuvollziehen und Fließgeschwindigkeiten abzuschätzen. In Bezug auf das räumliche Fließverhalten eines betrachteten Wassermoleküls (idealer Tracer), zeichnen sich zwei typische Varianten ab (vergleiche Abbildungen).

Lokale und intermediäre Grundwasserfließsysteme (Variante 1)

Die Modellierungsergebnisse zeigen die Ausbildung lokaler und intermediärer Grundwasserfließsysteme. Den Ausgangspunkt bildet Grundwasserneubildung bzw. hier die Aufgabe des Tracers im oberflächennahen Bereich. Das Absinken des Grundwassers geht in einen Abstrom, i.d.R. nach Nord/Nordwest über. Fließweg und Fließgeschwindigkeit sind dabei abhängig von der Existenz präferentieller Fließwege (zum Beispiel vom Vorhandensein von Störungs- oder Kluftzonen). Die Entlastung erfolgt in Vorfluter verschiedener Ordnung. Dieses Szenario stellt die typische Variante dar und bildet die u.a. in Abschnitt 4.2.2 diskutierten lokalen bis intermediären Grundwasserfließsysteme ab.

Wirkung von Bereichen stagnierenden Grundwasserflusses (Variante 2)

Der Fließweg des idealen Tracers verlangsamt sich stark in quasi stagnierenden Bereichen gering durchlässigern Gebirges. Wie die Modellrechnungen in den Abbildung 48 und Abbildung 51 zeigen ist dieses Phänomen im Modellgebiet nur in den gering durchlässigen

Gesteinen des die Vorerzgebirgssenke umgebenden Kristallins zu beobachten. In der Vorerzgebirgssenke und im nördlichen Abstrom verhindert die Nähe höher durchlässiger permokarboner Schichten und tektonischer Strukturen vermutlich eine solche Quasi-Stagnation, zumindest rechnerisch.

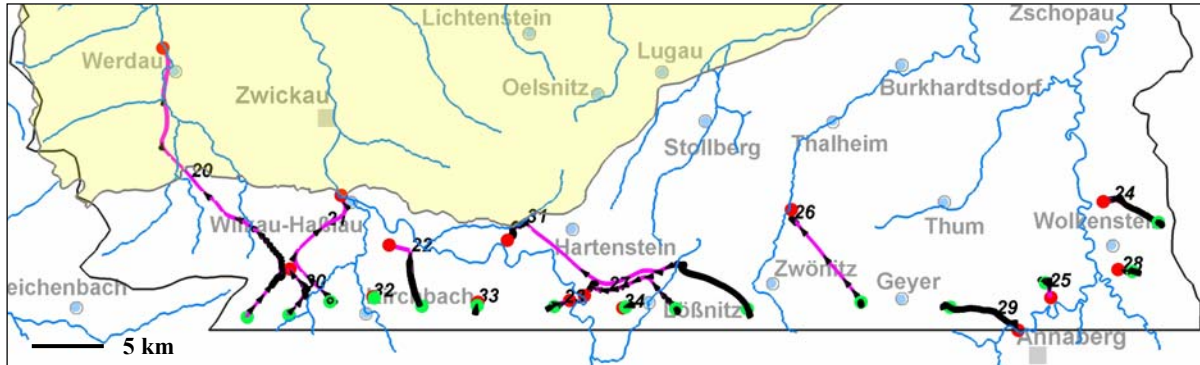


Abbildung 46 Grundwasserfließwege (Pathlines) bei Traceraufgabe im oberflächennahen Kristallin

Abbildung 46 zeigt den Südrand des Modellgebietes (grauer Umriss). Gelb schattiert ist die Lage der Vorerzgebirgssenke. Die grünen Markierungen bezeichnen die Aufgabepunkte des idealen Tracers, die roten Markierungen die Endpunkte (Entlastungs- bzw. Stagnationsgebiete) des violett gekennzeichneten Fließweges. Der Abstand zwischen zwei schwarzen Pfeilen entlang des Fließweges markiert eine Fließdauer von ca. 1000 Jahren. Diese Farben und Markierungen gelten, wenn nicht anders vermerkt, auch für alle weiteren Abbildungen. Deutlich zu erkennen sind die großen Unterschiede in den Fließgeschwindigkeiten. Ausserhalb von Störungs- und Kluftzonen sind die Fließzeiten im Kristallin mit 1 bis 2cm pro Jahr äußerst gering (z.B. Fließlinien 29, 24). Im Bereich von Störungen beschleunigt sich die Fließgeschwindigkeit signifikant und beträgt im Bereich des Fließpfades 21 zwischen 0,7 und 0,8 m pro Jahr. Abbildung 47 zeigt gleiches Szenario, jedoch mit Aufgabepunkten in einer Tiefe von rund 500m unter NN.

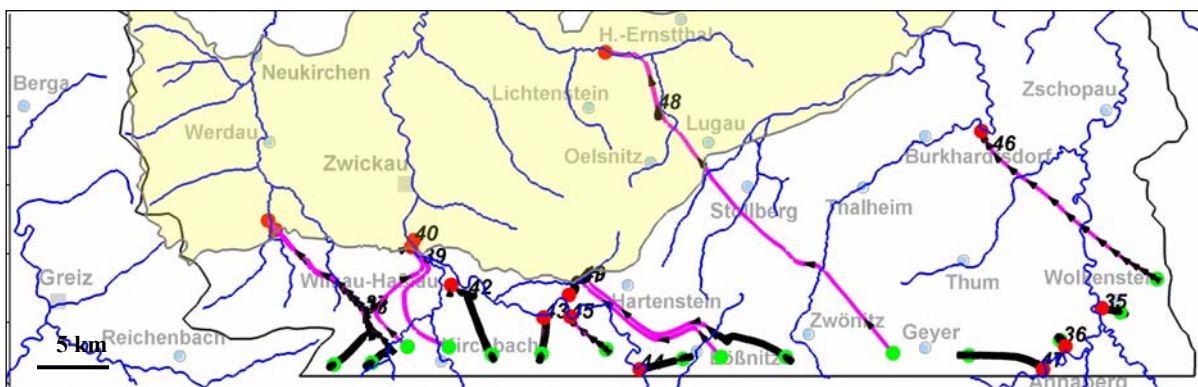


Abbildung 47 Grundwasserfließwege bei Traceraufgabe im tieferen Kristallin (-500mNN)

Der Fließweg des Grundwassers/Tracers ist hier i.d.R. länger da die Eingabe tiefer, in intermediäre oder regionale Fließsysteme erfolgt. Fließweg 48 zeigt so Grundwasserfluss über

eine vermutete Störungszone aus dem Kristallin westlich von Geyer nach NW über den Vorerzgebirgssenenrand, Oelsnitz/Lugau im weiteren Bereich der Pluto Verwerfung bis in die Lungwitztalzone. Die mittlere Fließgeschwindigkeit über die Gesamtstrecke beträgt rund 1,1m pro Jahr (schneller im Bereich der VES, langsamer im Grundgebirge, vgl. Abb.). Die Lungwitztalzone bestätigt hier ihre Funktion als zentrale Grundwasser-Entlastungsstruktur (Abschnitt 4.2.4). Der oberflächenah initiierte Fließweg 20, (Abbildung 46) reicht über den an gleicher Stelle, rund 900m tiefer simulierten Tracer (Abbildung 47) hinaus. Beide führen in Richtung Pleißetal und enden dort im Bereich der vermuteten N-Sausgerichteten Pleißetalstörung.

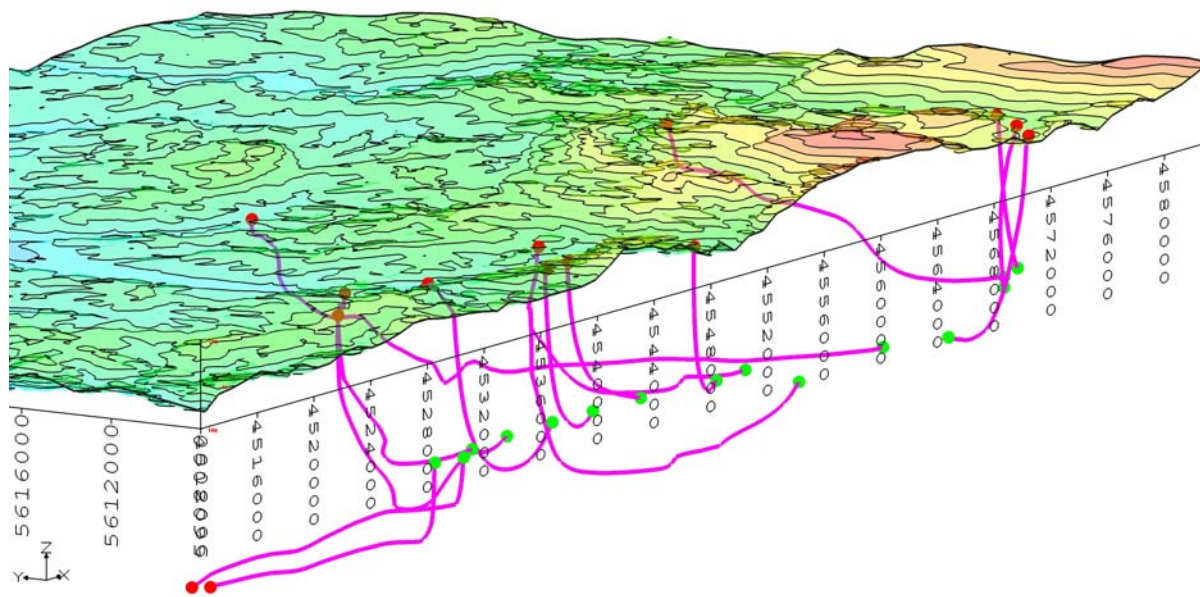


Abbildung 48 Perspektivische Darstellung der Fließbahnen aus Abbildung 47, südliches Vorland der VES

Abbildung 49 und Abbildung 50 zeigen Fließbahnen nach Aufgabe eines konservativen Tracers oberflächennah und im Niveau –500m NN respektive im Bereich der Vorerzgebirgssenne und dem nördlichen Vorland. Bezeichnend sind die deutlich höheren Fließgeschwindigkeiten in den Grundwasserleitern der Vorerzgebirgssenne, insbesondere entlang von Störungen und Klüften. Der zeitliche Abstand zwischen zwei schwarzen Pfeilmarkierungen beträgt hier lediglich 100 Jahre. Die permokarbonen Grundwasserleiter, insbesondere die Gera-Mülsen-Folge, aber auch Teile der Leukersdorf und Härtensdorf-Folge weisen gegenüber dem Grundgebirge deutliche erhöhte Durchlässigkeiten auf. Davon kann auch für die tiefen Bereiche dieser Folgen ausgegangen werden, auch wenn dazu kaum Felddaten vorliegen. So beträgt die berechnete mittlere Fließgeschwindigkeit entlang der tieferen Bereiche der Rödritzer Hauptverwerfung (151, 165, 168 in Abbildung 50) um 10m pro Jahr (90 bis 135 Jahre pro km) (nach Nordwest).

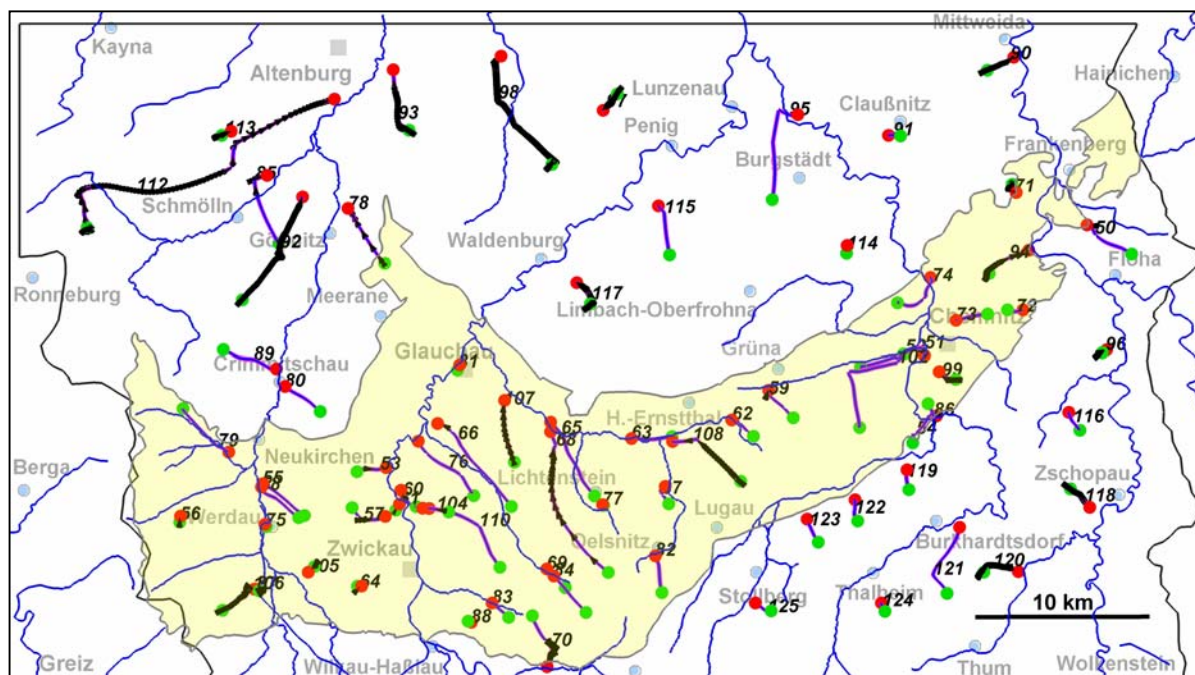


Abbildung 49 Grundwasserfließwege bei Aufgabe in der VES und nördlich, oberflächennah

Bei oberflächennaher Traceraufgabe (Abbildung 49) erfolgt entweder die schnelle Entlastung in den Rödlitzbach (Fließweg Nr. 77, lokales Fließsystem) oder ein Abstrom nach NW (65) und Entlastung in den Lungwitzbach mit hohen durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten von rund 260m pro Jahr. Entlang des 2. Pöhlauer Sprunges (4, 69) wurden oberflächennah Geschwindigkeiten bis 400m pro Jahr ermittelt, in tieferen Störungsabschnitten (171) lediglich 2,5 bis 3m pro Jahr. Im Bereich des 1. Pöhlauer Sprunges sind die berechneten Fließgeschwindigkeiten in größeren Teufen sehr gering, oberflächennah (110) erreichen sie dagegen 44m pro Jahr.

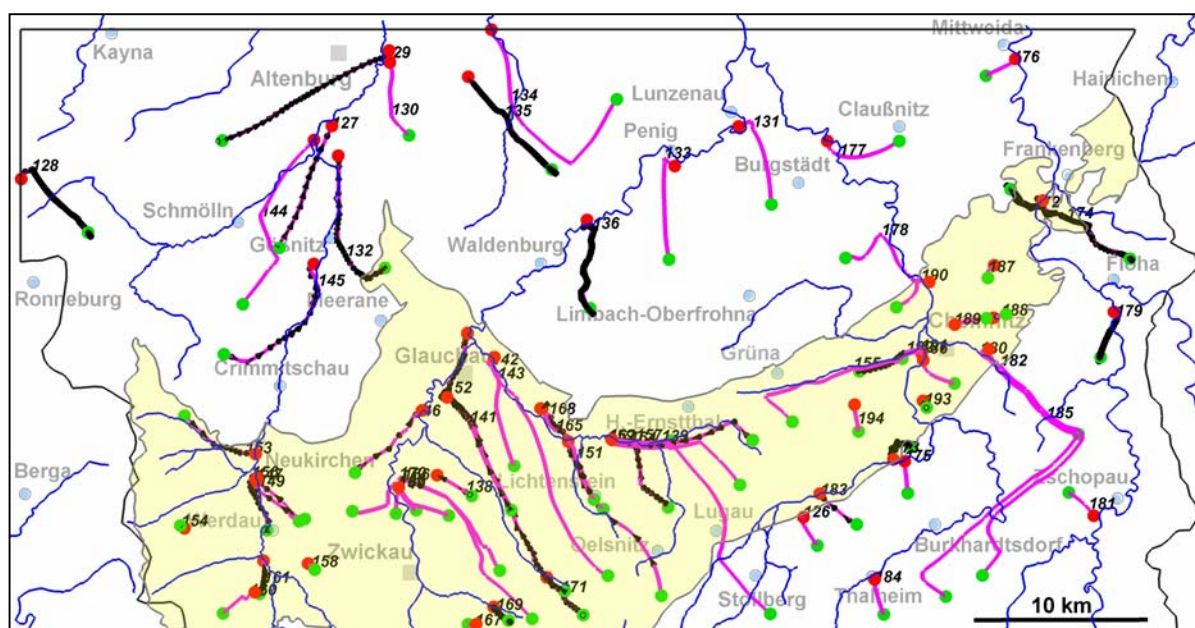


Abbildung 50 Grundwasserfließwege (Pathlines) bei Aufgabe in der VES und weiter nördlich im Niveau -500m NN

Berechnungen für den Bereich der Oberhohndorfer Hauptverwerfung führten sowohl bei oberflächennaher als auch bei tiefer Traceraufgabe zu einer direkten Entlastung in die Zwickauer Mulde. Die Zwickauer Mulde wirkt hier offensichtlich als starke (tiefgelegene) Vorflut. Die berechnete mittlere Fließ-/Aufstiegsgeschwindigkeit (Niveau –500m bis Vorflut) betrug hier rund 2m pro Jahr.

Abbildung 51 stellt ausgewählte Fließbahnen im Bereich der Vorerzgebirgssenke und dem nördlichen Vorland perspektivisch. Gut zu erkennen sind die zentralen Grundwasserentlastungsbereiche der Lungwitztalzone (vgl. auch Abschnitt 4.2.4). und der Zwickauer Mulde. Sie fungieren als dominante Vorfluter und entlasten auch tiefe Grundwässer (bis –500m NN), werden also (rechnerisch) nicht unterströmt.

Für die Lungwitztalzone wurden oberflächennah Fließgeschwindigkeiten um 105m pro Jahr (63,

Abbildung 49), in tieferen Bereichen bei Hohnstein-Ernstthal um 3,5m pro Jahr ermittelt (z.B. 139, Abbildung 50). In anderen Teilabschnitten der Zone wurden auch deutlich geringere Fließgeschwindigkeiten berechnet (bis <1cm pro Jahr).

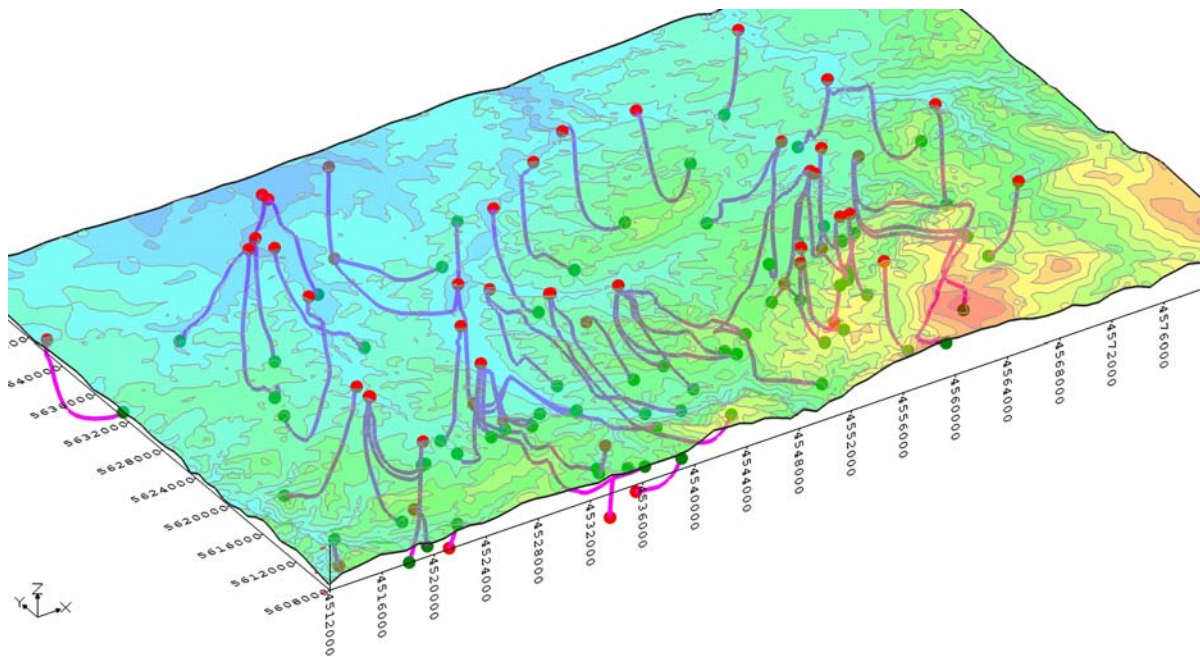


Abbildung 51 Perspektivische Darstellung der Fließbahnen aus Abbildung 50, VES und nördliches Vorland

4.9.7.4 Weitere Fallstudien und Szenarien

Im westlichen und zentralen Teil der Vorerzgebirgssenke, sowie im nordwestlichen Abstrombereich ist das Auftreten höher mineralisierter Grundwässer beschrieben worden, so z.B. in Zwickau und Oelsnitz, in St. Egidien, Crottenlaide/ Meerane und Oberrothenbach/ Helmsdorf (Abschnitte 4.5 und 4.6).

Im Modell wurden diese Lokalitäten und ggf. benachbarte Bereiche als Startpunkte eines backward particle tracking gesetzt um Aussagen zur Herkunft der höher mineralisierten

Wasser zu erzielen. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 52. Dabei wurde für die Simulation von der Annahme ausgegangen, dass im gesamten Tiefenprofil bis –1400 m Tiefe höher mineralisierte Grundwässer auftreten können (rote Markierung). Der Fließweg wurde dann für alle Tiefenniveaus bis zum Speisungsgebiet (blaue Markierung) zurückverfolgt (violetter Pfad).

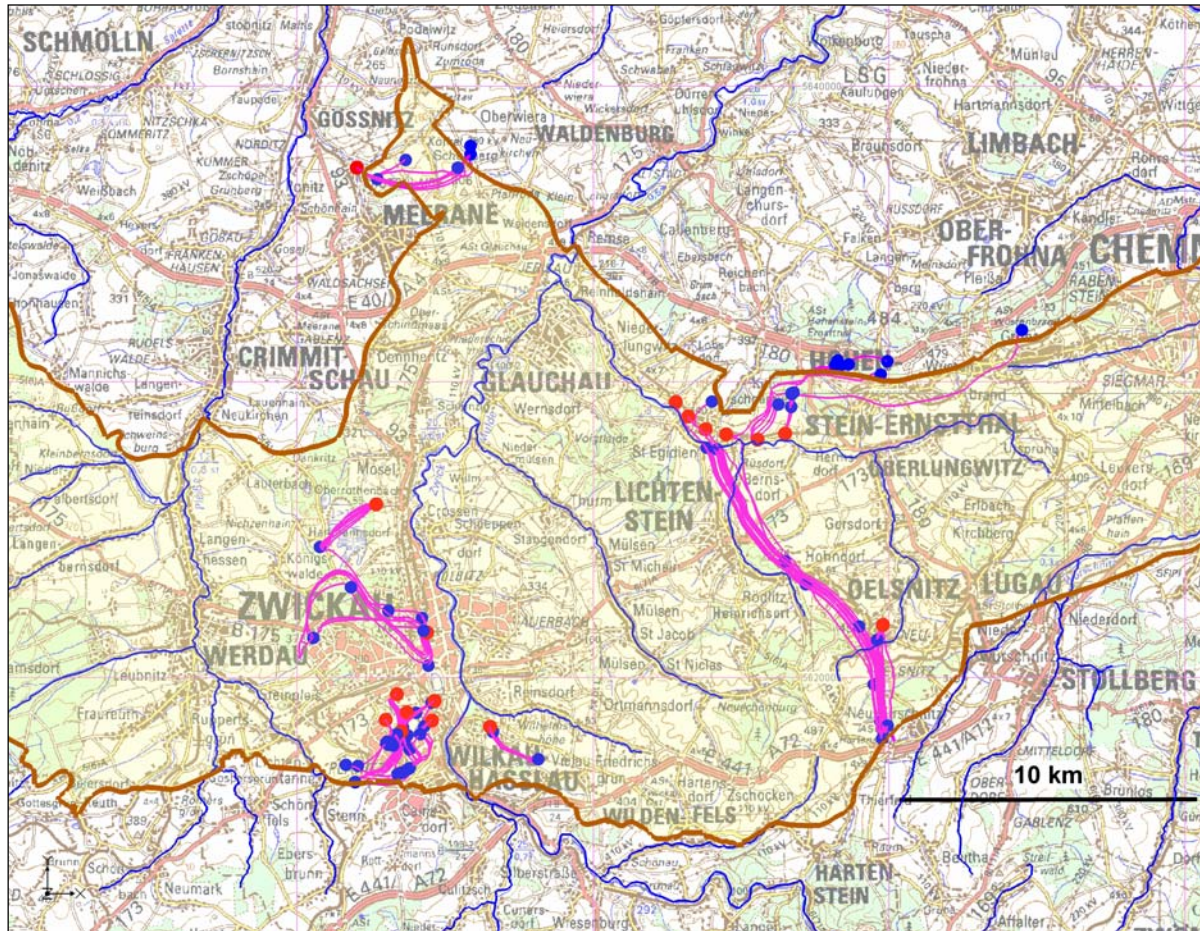


Abbildung 52 Auftreten höher mineralisierte Grundwässer - backwards tracking

Insgesamt zeigt sich, dass bei Ansetzen rezenter hydraulischer Randbedingungen Zuströme in die Bereiche höher mineralisierter Grundwässer aus lokalen und intermediären Fließsystemen stammen.

So können Zuströme in den Bereich der höher mineralisierten Wässer in Crotenlaide bis in den Raum Schönberg zurückverfolgt werden. Die Fließgeschwindigkeiten betragen bis 3 m pro Jahr.

Auch für die höher mineralisierten Wässer im Innenstadtbereich von Zwickau und Schedewitz und Oberrothenbach/ Helmsdorf sind nahe westlich gelegene Speisungsgebiete anzunehmen. Die Fließgeschwindigkeiten schwanken hier in Abhängigkeit von der Tiefe und dem Vorhandensein höher leitfähiger tektonische Strukturen beträchtlich und betragen zwischen einigen Millimetern und mehreren Metern pro Jahr. Die Gesamtfließzeiten von der Speisung bis zur Entlastung können so rechnerisch zwischen einigen hundert Jahren und vielen Millionen Jahren betragen.

Für Wässer in den tieferen Rotliegendfolgen des Raumes Schedewitz und des Gebietes öst-

lich der Zwickauer Mulde ergaben sich als rechnerische Speisungsgebiete die Ausstrichgebiete der permokarbonen Folgen am Südrand der VES. Auch hier variieren Fließgeschwindigkeiten/ Gesamtfließzeiten beträchtlich und liegen meist zwischen wenigen Zentimetern und hundert Metern im Jahr.

Für die höher mineralisierten Grundwässer des westlichen Bereiches von St. Egidien wurden Speisungsgebiete entlang der Rödlitzer Hauptverwerfung berechnet (Abbildung 52). Dabei reicht das Einzugsgebiet bis an den südlichen Vorerzgebirgssenkensrand zurück. Hier könnte also eine Verbindung mit den höher mineralisierten Oelsnitzer Grund- bzw. Grubenwässern vermutet werden. Die Fließgeschwindigkeiten entlang der preferentiellen Fließwege betragen zwischen 6 und 390m pro Jahr. Die Verweilzeiten im Untergrund liegen dann zwischen 17 und 945 Jahren. Andere Fließpfade weisen deutlich geringere Fließgeschwindigkeiten auf.

Grundwässer im östlichen St. Egidien werden dagegen aus Nordosten gespeist. Hier erfolgt der Zustrom vom Vorerzgebirgssenkensrand bis nördlich von Hohenstein-Ernstthal und Gröna. Die berechneten Fließgeschwindigkeiten betragen für beide Fließwege im durchschnittlich 0,5m pro Jahr.

Höher mineralisierte Grundwässer im Raum Oelsnitz können bis zum Südrand der VES zurückverfolgt werden. Hier wurde Fließgeschwindigkeiten bis 50m pro Jahr berechnet.

Szenario: Erhöhte hydraulische Durchlässigkeit von Störungszonen

Es sollte getestet werden inwieweit erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten, insbesondere herzynischer Störungsbereiche, Einfluss auf das Grundwasserregime ausüben. Dazu wurden Modellvarianten mit erhöhten Durchlässigkeiten gerechnet. Im folgenden werden die Ergebnisse für folgendes Szenario dargestellt:

- Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit flacher herzynischer Störungsbereiche auf $8 \cdot 10^{-4}$ m/s horizontal und 10^{-3} m/s vertikal (inklusive Lungwitztalzone).
- Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit tiefer herzynischer und flacher erzgebirgischer Störungsbereiche auf $5 \cdot 10^{-4}$ m/s horizontal und $1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s vertikal.

Der Einfluss auf die Hauptrichtungen des Grundwasserflusses ist gering. Am deutlichsten zeichnen sich die Unterschiede erwartungsgemäß in den Durchflussraten entlang herzynischer Störungszonen ab. Abbildung 53 zeigt dies anhand der Fließgeschwindigkeiten als Vektordarstellungen, die sich im Vergleich zum „Normalmodell“ (Abbildung 44) deutlich erhöhen. Das Spektrum reicht von Minimalgeschwindigkeiten um $2,44 \cdot 10^{-15}$ (geringer als im Ausgangsmodell) in dunkelblauer Farbe bis $2,58 \cdot 10^{-5}$ m/s in roter Pfeilfarbe. Der Verlauf präferentieller Fließwege verändert sich nicht wesentlich (Anmerkungen vgl. oben).

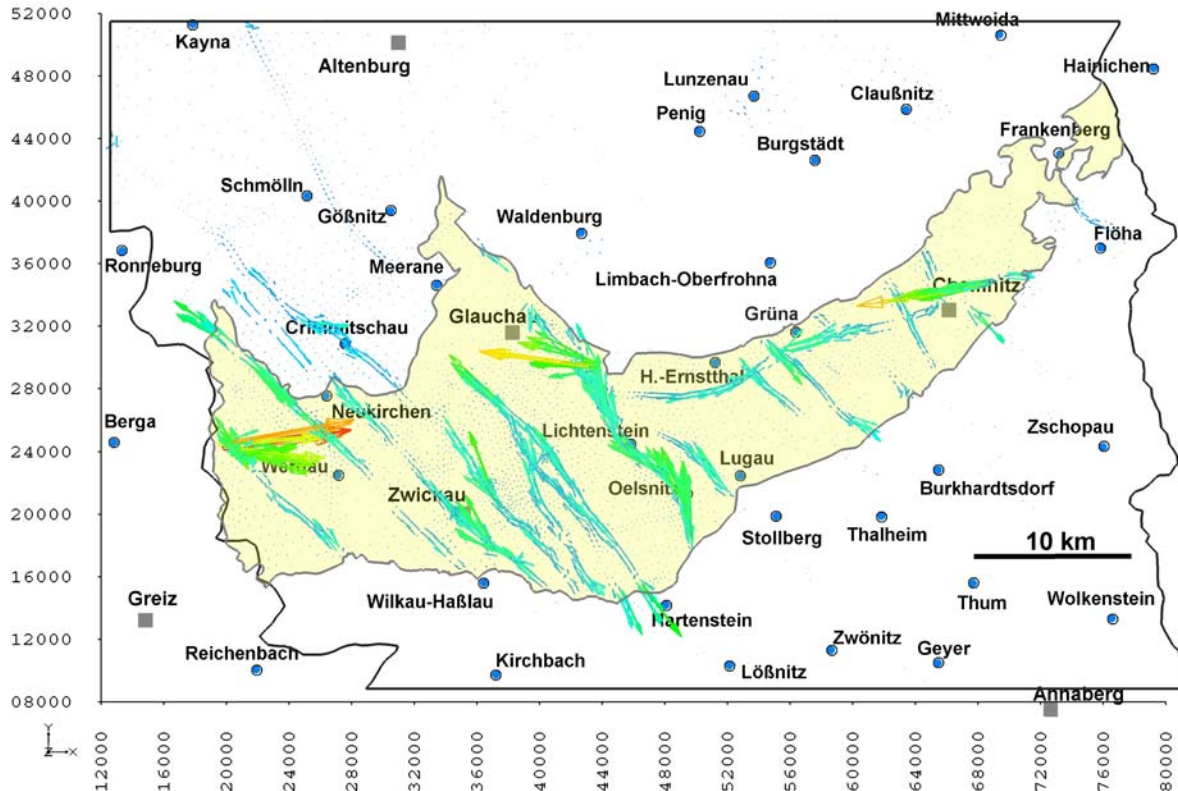


Abbildung 53 Vektorbasierte Darstellung der Fließgeschwindigkeiten im Modellraum (Szenario)

Der Unterschied zwischen Normalmodell und Szenario ist in der Schnittdarstellung durch den Vorerzgebirgssenkensraum gut zu erkennen (Abbildung 54). Im Bereich von Störungen erhöhen sich die Fließgeschwindigkeiten beträchtlich.

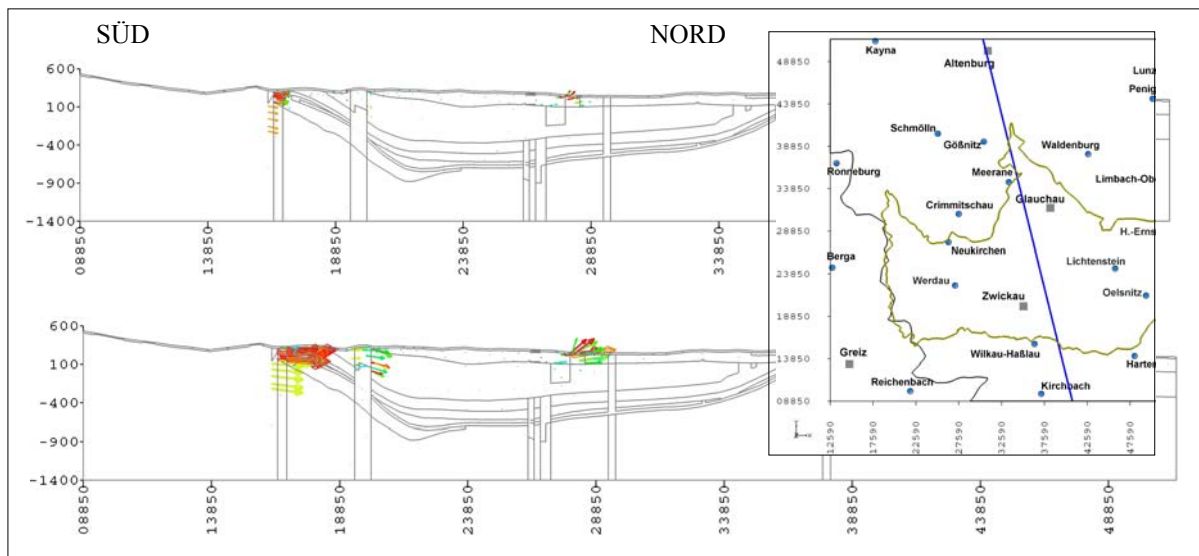


Abbildung 54 Profilschnitt mit Fließgeschwindigkeiten in Vektordarstellung (Normalmodell oben, Szenario unten)

Die Lage der Einzugsgebiete und Fließwege für rezent beobachtete höher mineralisierte

Grundwässer im Vorerzgebirgsbereich ändern sich für das berechnete Szenario nicht wesentlich.

Einfluss der Dichte auf den Grundwasserfluss

Dichteunterschiede aufgrund unterschiedlich hoher Mineralisierungen von Grundwässern können Ursache Dichte-induzierten Grundwasserflusses sein (Abschnitte 4.1.3 und 4.6.3). Unter Verwendung einfacher Ansätze wurde in nicht-kalibrierten Testrechnungen versucht den Einfluss Dichte-induzierter Triebkräfte auf das Grundwasserregime abzuschätzen. So wurde z.B. mit einer unteren Randbedingung mit höher mineralisiertem Grundwasser mit der Dichte 1,005 gerechnet. Dabei wurden keine wesentlichen Einflüsse auf das Grundwasserregime nachgewiesen. Topographie-induzierter Grundwasserfluss dominierte hier vermutlich die Dichte-induzierte Strömung weitgehend. Allerdings ist die Wahl geeigneter Ansätze aufgrund des sehr begrenzten Kenntnisstandes zur räumlichen Verteilung entsprechender Solen schwierig. Aufgrund der damit verbundenen Unsicherheit in den Ergebnissen dieser Rechnungen, wird auf diese hier nicht näher eingegangen.

4.9.8 Abschlusssdiskussion

Die hydraulische Modellierung des weiteren Vorerzgebirgsenkenraumes unterstreicht die Bedeutung tektonischer Strukturen für das hydraulische Regime. Störungs- und Kluftzonen stellen insbesondere in den geringer durchlässigen Schichten, Hauptbewegungsbahnen des Grundwasserflusses dar. Dominierende Antriebskraft des Grundwasserflusses ist, wie im Modell implementiert, der topographische Gradient. Dabei dominieren lokale und intermediäre Grundwasserfließsysteme.

Das Modell zeigt die Bedeutung der großen Vorfluter als Entlastungszonen des Grundwasserflusses, insbesondere der Zwickauer Mulde. Darüber hinaus stellen auch kleinere Vorfluter im Bereich hydraulisch aktiver tektonischer Strukturen, z.B. der Lungwitztalzone und der Rödlitzer Hauptverwerfung relevante Entlastungsbereiche dar.

Berechnungen zu möglichen Herkunftsgebieten höher mineralisierter Grundwasser im Bereich der Vorerzgebirgsenke zeigen, dass aus hydraulischer Sicht, diese Bereiche aus Einzugsgebieten innerhalb der Vorerzgebirgsenke bzw. aus dem unmittelbar angrenzenden Grundgebirge gespeist werden können. Die Existenz weiterreichender Fließbahnen konnten nicht nachgewiesen werden.

Die im weiteren Vorerzgebirgsenkenraum nachgewiesenen höher mineralisierten Wässer sind, wie in der vorliegenden Arbeit dargestellt, i.d.R. an Entlastungsbereiche lokalen bis regionalen Grundwasserflusses gebunden. Dies spricht für die These des „Aufstiegs“ höher mineralisierter Wässer. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass gerade in solchen Zonen die Fließgeschwindigkeiten/ Durchströmungsraten häufig hoch sind, d.h. eine kontinuierliche Nachströmung „frischer“ gering mineralisierter Grundwässer zu erwarten ist, die zu einer „Auswaschung“ und Verdünnung dieser Wässer führen. Die Herkunft höher mineralisierter Wässer ist deshalb eher aus den zuvor diskutierten stagnierenden Bereichen zu erwarten (Abschnitt 4.6).

Das Auftreten höher mineralisierter Wässer in Entlastungszonen und die dargestellte Domi-

nanz lokaler und intermediärer Fließsysteme sprechen deshalb – zumindest aus Sicht rezent hydraulischer Bedingungen – für einen kurzen Transportweg dieser Solen und eine autochthone (para-autochthone) Genese bzw. Positionierung dieser Wässer (vgl. Abschnitt 4.6.2). Die im Modell berechneten Fließzeiten schwanken auf engstem Raum sehr stark und können teilweise um bis zu 7 Größenordnungen von einander abweichen. Dies unterstützt die Annahme der Ausbildung von Stagnationszonen in denen sich höher mineralisierte Wässer anreichern können bzw., bei Positionierung in früheren Zeiten, erhalten bleiben. Veränderungen in den Randbedingungen z.B. durch anthropogene Aufschlüsse (Bergbau, Bohrungen) oder Änderungen im hydraulischen Regime allgemein können dann zu einer Mobilisierung dieser Wässer führen.

Ein Einfluss Dichte-induzierten Grundwasserflusses auf das hydraulische Regime konnte nicht nachgewiesen werden. Allerdings sind die dieser Annahme zugrunde liegenden Testrechnungen aufgrund stark simplifizierter Ansätze/ unsicherer Randbedingungen nicht belastbar.

5 Fazit und Ausblick

Mit den Arbeiten zur hydrogeologischen Analyse und Modellierung des weiteren Vorerzgebirgssenkensraumes wurden eine Vielzahl von Erkenntnissen gesammelt, gewertet und neu interpretiert. Zahlreiche Zusammenhänge konnten durch eine übergreifende Betrachtungsweise erkannt oder neu bewertet werden. Durch die Einbeziehung von Erkenntnissen aus anderen oft wesentlich besser untersuchten Senkenstrukturen konnten Erklärungsansätze für Fragen gefunden werden, die allein auf Grundlage der begrenzten Datenbasis zum weiteren Vorerzgebirgssenkensraum nicht zu beantworten waren. Auf dieser Grundlage wurde eine komplexe hydrogeologische Modellvorstellung zum Modellraum entwickelt, die dann unter Verwendung numerischer Modellierungsverfahren in ein großräumiges, räumlich diskretisiertes und parametrisiertes Modell umgesetzt wurde. Die Ergebnisse der anschließenden numerische Grundwassermodellierung untersetzten die Erkenntnisse der hydrogeologischen Analyse.

Dennoch bleiben verschiedene Fragen offen. Trotz der Untersuchungen der letzten Jahre, erschwert der noch immer geringe Kenntnisstand zum hydraulischen Verhalten der tiefen hydrogeologischen Einheiten eine Überprüfung vieler Thesen.

Die großräumige Betrachtungsweise bei der vorliegenden hydrogeologischen Modellierung führt notwendigerweise zu starker Verallgemeinerung. Zur Nachbildung differenzierter Fließvorgänge, z.B. entlang einzelner Störungen sind neben Detailuntersuchungen im Feld kleinräumige Modellierungen von Fließvorgängen entlang solcher Einzelstörungen notwendig.

Dreidimensionale Strukturmodelle sind geeignete Werkzeuge zur räumlichen Diskretisierung erhobener Daten und bilden, wie in der vorliegenden Arbeit gezeigt, eine gute Grundlage für die Entwicklung weiterführender numerischer Strömungs- und/ oder Transportmodelle. Die Verlässlichkeit solcher Modellierungen wächst dabei mit der Qualität und Dichte der zur Verfügung stehenden Datenbasis. Im konkreten Fall stellen die sich kontinuierlich erweiternden, landesamtlichen Aufschlusssdatenbanken eine geeignete Basis dar. Es sollten (automatisierte) Verfahren entwickelt werden, mit denen eine schnelle und inhaltlich zuverlässige Auskopplung hydrogeologischer Daten möglich ist. Dafür effektive und länderübergreifende Lösungen zu finden bleibt eine interessante Herausforderung. Im Ergebnis könnten auf Grundlage vorhandener (z.B. geometrischer) Modelle Aktualisierungen hydrogeologischer Parametermodelle generiert werden, die Ausgangspunkt hydraulischer Modellierungen sein können.

6 Zusammenfassung

Die hydrogeologischen Verhältnisse in den tieferen Bereichen des Vorerzgebirgssenkens werden durch das hydraulische Zusammenwirken der hydrogeologischen Einheiten der permokarbonen Senkenfüllung, des nordwestlichen Abstroms (Pforte von Meerane) und der umrandenden Grundgebirgseinheiten geprägt. Dieser Raum ist von unregelmäßig verteilten und hydraulisch sehr unterschiedlich stark aktiven Störungs- und Kluftzonen geprägt. Zwei ehemalige Steinkohlengruben befinden sich hier. Dort und an weiteren Lokalitäten wurden hoch mineralisierte Grundwässer erschlossen.

Zur Charakterisierung dieses komplexen hydrogeologischen Systems wurde eine Analyse und Interpretation der hydrogeologischen Verhältnisse des Untersuchungsraumes durchgeführt. Geometrie und wichtige Systemgrößen wurden dann in ein großräumiges hydrogeologisches und hydraulisches Modell überführt um quantitative Aussagen abzuleiten.

Dies setzte eine großräumige Erfassung, einen Abgleich und eine Interpretation und Zusammenfassung hydrogeologischer, hydrologischer, geologischer und weiterer Daten voraus. Die Datenerhebung, Weiterverarbeitung und Interpretation erfolgte aus verschiedenen Blickwinkeln unter Verwendung unterschiedlicher Ansätze und Schwerpunkte. Damit wurde eine breite Basis für die hydrogeologische Analyse und großräumige hydrogeologische Modellierung des Untersuchungsraumes geschaffen.

Die Arbeit baut auf einer Analyse der speziellen hydrogeologischen Verhältnissen in den Teilgebieten der Vorerzgebirgssenke und ihres Umlandes auf. Es folgte eine Verallgemeinerung bzw. Zusammenfassung der Charakteristika der hydrogeologischen Einheiten und hydraulischen Verhältnisse. Die hydrochemische Charakteristik von Grundwassertypen im Untersuchungsgebiet und ihr räumliches Auftreten werden diskutiert.

Einen Schwerpunkt der Arbeit stellt die Diskussion spezieller hydrogeologischer Problemstellungen und die Herstellung von komplexen Zusammenhängen zwischen den einzelnen Phänomenen dar. Dazu gehören Grundwasserhaushaltsbetrachtungen, insbesondere zur Grundwasserneubildung und die Diskussion der Vorkommen höher mineralisierter Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke. Dem Auftreten, der Ausbildung und der hydraulischen Wirkung tektonischer Strukturen (Störungen, Kluftzonen) wurde aufgrund ihrer großen Bedeutung für die Grundwasserdynamik besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Aus einer Studie und Auswertung hydrogeologischer Prozesse in sedimentären Senken weltweit und der Anwendung dieser Erkenntnisse auf die Verhältnisse im Vorerzgebirgssenkensraum konnten in Verbindung mit der hydrogeologischen Analyse des Modellraumes hypothetische Ansätze zur Genese und Hydraulik tiefer Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke abgeleitet und zu einer umfassenden hydrogeologischen Modellvorstellung entwickelt werden. Im Ergebnis wurden (para-) autochthone Genesemodelle zur Erklärung der Vorkommen höher mineralisierter Grundwässer favorisiert.

Im Ergebnis entstand ein Gesamtmodell das räumliche Aussagen zum rezenten hydraulischen Regime und zu den Antriebskräften des Grundwasserflusses auf Grundlage der sich

zeitlich ändernden hydrogeologischen, hydrologischen und tektonischen Randbedingungen anstrebt und die heutige Verteilung hydrochemischer Grundwassertypen in diesen Kontext einordnet.

Dieses differenzierte konzeptionelle hydrogeologische Modell des weiteren Vorerzgebirgssenkensraumes diente als Grundlage für die Entwicklung eines digitalen großräumigen dreidimensionalen Struktur- und Parametermodells unter Verwendung von GOCAD und GMS. Darauf aufbauend wurde ein großräumiges numerisches Grundwasserströmungsmodell entwickelt das die Erkenntnisse aus der hydrogeologischen Analyse räumlich diskretisiert quantitativ umsetzt. Besondere Beachtung fand dabei die Implementierung wichtiger Störungsbecken. Mit Hilfe des hydraulischen Modells erfolgte u.a. eine Identifikation präferentieller Fließwege und die Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten.

Die hydraulische Modellierung belegte die Bedeutung von Störungs- und Kluftzonen als Hauptbewegungsbahnen des Grundwassers. Lokale und intermediäre Grundwasserfließsysteme dominieren dabei den vorwiegend topographisch induzierten Grundwasserfluss.

Die vorliegende Arbeit soll dazu beitragen, mögliche Lösungsansätze zur Beschreibung und Interpretation hydrogeologischer und hydrochemischer Phänomene im weiteren Vorerzgebirgssenkensraum anzubieten und neue Fragen aufzuwerfen.

7 Verzeichnisse

7.1 Literatur

- ABRAHAM T. (2004) Isotopenhydrogeologische Untersuchungen in Zwickau. Ergebnisbericht (unveröff.), HGC Hydro-Geo-Consult GmbH, Freiberg.
- ADAMS J. J., ROSTRON B. J., MENDOZA C. A. (2004) Coupled fluid flow, heat and mass transport, and erosion in the Alberta Basin; implications for the origin of the Athabasca Oil Sands. *Canadian Journal of Earth Sciences = Revue Canadienne des Sciences de la Terre*, Vol.41, No.9, pp.1077-1095.
- AHMED M. U. (1983) A quantitative model to predict a safe yield for well fields in Kufra and Sarir basins, Libya. *Groundwater* 21, No. 1, pp. 58-66.
- ALEXANDER J., BRIGHTMAN M. A. (1985) A hypothesis to account for groundwater quality variations in the Corallian of the Thames Valley. *Hydrogeology in the Service of Man*, Mem. 18th Congr. of the International Association of Hydrogeologists, pp. 54-63.
- ALFÖLDI L., ERDÉLYI M., GÁLFI J., KORIM K., LIEBE, P. (1976) Hydrogeological investigations of a geothermal anomaly in Hungary. II. Geothermal flow system in the Tisza-kécske region. *Hydrological Sciences Bulletin* XXI, 26.
- ALKALALI A., ROSTRON B.J. (2005) Basin-scale analysis of Variable-density groundwater flow; Nisku Aquifer, Western Canadian Sedimentary Basin. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol.78-79, No.2003, pp.313-316.
- ALLEN D. J., HOLLOWAY S. (1984) The Wessex Basin. Investigation of the Geothermal Potential of the U.K. British Geological Survey.
- ALLEN M. J. (1985) Persönliche Mitteilungen. In: DOWNING R. A., EDMUNDS W. M., GALE I. N. (1987) Regional groundwater flow in sedimentary basins in the U.K. In: GOFF J. C., WILLIAMS B. P. J. (Eds.) *Fluid flow in sedimentary basins and aquifers*. Geol. Soc. Spec. Publ. No. 34, pp. 105-125.
- ALMASI I. (2003) Evaluation of the possible mechanisms able to generate and maintain the overpressured regime in the Pannonian Basin, eastern Hungary. *Journal of Geochemical Exploration*, vol.78-79, no.2003, pp.139-142.
- ALMFISI I. (2001) Petroleum Hydrogeology of the Great Hungarian Plain, Eastern Pannonian Basin, Hungary. Dissertation. University of Alberta, Canada.
- AMTHOR J. E., MOUNTJOY E.W., MACHEL H. G. (1993) Subsurface dolomites in Upper Devonian Leduc Formation buildups, central part of Rimbey-Meadowbrook reef trend, Alberta, Canada. *Bull. Can. Petrol. Geol.* 41, pp. 164-185.
- ANDERTON R., BRIDGES P. H., LEEDER M. R., SELLWOOD B. W. (1993) *A Dynamic Stratigraphy of the British Isles. A study in crustal evolution*. Chapman & Hall, London, New York, Tokyo, Melbourne, Madras.
- ANDREW A. S., WHITFORD D. J., BERRY M. D., BARCLAY S. A., GIBLIN A. M. (2005) Origin of salinity in produced waters from the Palm Valley gas field, Northern Territory, Australia. *Applied Geochemistry*, Vol.20, No.4, pp.727-747.
- ANDREWS J. N. (1987) Persönliche Mitteilungen. In: DOWNING R. A., EDMUNDS W. M., GALE I. N. (1987) Regional groundwater flow in sedimentary basins in the U.K. In: GOFF J. C., WILLIAMS B. P. J. (Eds.) *Fluid flow in sedimentary basins and aquifers*. Geol. Soc. Spec. Publ. No. 34, pp. 105-125.

- ANDREWS J. N., BALDERER W., BATH A. H., CLAUSEN H. B., EVANS G. V., FLORKOWSKI T., GOLDBRUNNER J., IVANOVICH M., LOOSLI M., ZOJER H. (1984) Environmental isotope studies in two aquifer systems : a comparison of groundwater dating methods. IAEA, Vienna STI/PUB/650, Isotope Hydrology 1983, pp. 535-576.
- ANDREWS J. N., BURGESS W. G., EDMUNDS W. M., KAY R. L. F., LEE D. J. (1982) The thermal springs of Bath. *Nature* 298, 339-343.
- ANDREWS J. N., GILES I. S., KAY R. L. F., LEE D. J., OSMOND J. K., COWART J. B., FRITZ P., BARKER J. F., GALE J. (1982) Radioelements, radiogenic helium and age relationships for groundwaters from the granites at Stripa, Sweden. *Geochim. Cosmochim. Acta* 46, pp. 1533-1543.
- ANDREWS J. N., GOLDBRUNNER J. E., DARLING W. G., HOOKER P. J., WILSON G. B., YOUNGMAN M. J., EICHMIGER L., RANERT W., STICKLER W. (1985) A radiochemical, hydrochemical and dissolved gas study of groundwaters in the Molasse basin of Upper Austria. *Earth Planet. Sci. Lett.* 73, pp. 317-332.
- ANDREWS J. N., LEE D. J. (1979) Inert gases in groundwater from the Bunter Sandstone of England as indicators of age and paleoclimatic trends. *J. Hydrol.* 41, pp. 233-252.
- ANDREWS-SPEED C. P., OXBURGH E. R., COOPER B. A. (1984) Temperatures and depth-dependent heat flow in western North Sea. *Bull. Am. Assoc. petrol. Geol.* 68, pp. 1764-1781.
- APEL M. (2004) A 3d Geoscience Information System Framework. Dissertation, Cotuelle de Thèse, ENSG Nancy.
- APEL M. (2005) From 3d geomodelling systems towards 3d geoscience information systems: Data model, query functionality, and data management. *Computers & Geosciences*, Volume 32, Issue 2, March 2006, Pages 222-229.
- APPEL M. (1999) GOCAD 3D Modell des östlichen Saxothuringikum. Diplomarbeit (unveröff.). TU Bergakademie Freiberg.
- APPOLD M. S., GARVEN G., BOLES J. R., EICHHUBL P. (2005) Numerical reactive transport modeling of the effects of leakage of methane-rich fluids along the Refugio-Carneros Fault in the Santa Barbara Basin. Abstracts with Programs - Geological Society of America, vol.37, no.4, pp.61.
- ARNOLD O. E. (1900) Erläuterungen zur Feld- und Flözkarte des Zwickauer Steinkohlenrevieres. Verein für bergbauliche Interessen in Zwickau (Hrsg.), Zwickau.
- ARTHEN A. (1999) Berechnungsergebnisse mit GEOFEMWIN. Mündliche und schriftliche Auskünfte und Unterlagen. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- AUDET D. M. (1995) Mathematical modelling of gravittional compaction and clay dehydration in thick sediment layers. *Geophysical J. International* 122, pp. 283-298.
- BACHU S. (1988) Analysis of heat transfer processes and geothermal pattern in the Alberta basin, Canada. *J. Geophys. Res.* 93(B7), pp. 7767-7781.
- BACHU S. (1993) Basement heat flow in the Western Canada Sedimentary Basin. *Tectonophysics* 222, pp. 119-133.
- BACHU S. (1995) Flow of variable-density formation water in deep sloping aquifers: review of methods of representation with case studies. *J. of Hydrology* 164, pp.19-38.
- BACHU S. (1995b) Synthesis and model of formation-water flow, Alberta basin, Canada. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.* 79, pp. 1159-1178.
- BACHU S., BURWASH R. A. (1991) Regional-scale analysis of the geothermal regime in the Western Canada Sedimentary basin. *Geothermics* 20, pp. 387-407.

- BACHU S., HITCHON B., PERKINS E. H. (1991) Hydrogeological evaluation for deep waste disposal, Alberta Basin, Canada. Australian Water Resources Council Conference Series, Canberra, Australia 20, pp. 152-165.
- BACHU S., MICHAEL K. (2002) Flow of variable-density formation water in deep sloping aquifers: minimizing the error in representation and analysis when using hydraulic-head distributions. *J. of Hydrology* 259, pp. 49-65.
- BACHU S., SAUVEPLANE C. M. (1984) Preliminary fluid flow analysis of a deep basin, Cold Lake region, Alberta. In: Pinawa, MB, Canada (Ed.) Proceedings International groundwater symposium on groundwater resources, Vol. II, Contaminant hydrogeology, pp. 257-273.
- BAF GEODAESIE (2006) Nachweis von Intra-Plate-Tectonic durch Space Geodesy (unveröff.). www.tu-freiberg.de/~wwwmage/forschung/geomoni/nachweis.htm, Mai 2006, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, TU Bergakademie Freiberg.
- BAF SEISMIK (2006) Tektonische Beben im Vogtland. Internetpräsentation (unveröff.), www.geophysik.tu-freiberg.de/seismologie/vogtland.htm und [~flutung.htm](http://www.geophysik.tu-freiberg.de/~flutung.htm), Mai 2006, Arbeitsgruppe Seismologie des Instituts für Geophysik, TU Bergakademie Freiberg.
- BAIR E. S., O'DONNELL T. P., PICKING L. W. (1985) Potentiometric mapping from incomplete drill-stem test data: Palo Duro Basin area, Texas and New Mexico. *Ground Water* 23, pp. 198-211.
- BANKWITZ P., GROSS, U., BANKWITZ, E. (1993) Krustendeformation im Bereich der Finne-Kyffhäuser-Gera-Jachymov-Zone. *Z. geol. Wiss.*, 21 (1/2), S. 3-20, Berlin.
- BARNES I. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. *Geology (Boulder)* 16, nr. 6, pp. 560-561.
- BARROWS M. H., CLUFF R. M. (1984) New Albany Shale Group (Devonian-Mississippian) source rocks and hydrocarbon generation in the Illinois basin. In: DEMAISON G., MURRIS R. J. (Eds.) *Petroleum Geochemistry and basin Evaluation*. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 35, pp. 111-138.
- BASSET R. L. und BENTLEY M. E. (1982) Geochemistry and hydrodynamics of deep-basin brines, Palo Duro and Dalhart Basins, Texas. *J. of Hydrol.* 59, pp. 331-369.
- BÄSSLER R. (1970) Hydrogeologische, chemische und Isotopenuntersuchungen der Grubenwässer des Ibbenbürener Steinkohlenreviers. *Z. deutsch. Geol. Ges., Sonderheft Hydrogeologie, Hydrochemie*, S. 209-286, Hannover.
- BATH A. H., DOWNING R. A., BARKER J. A. (1985) The age of groundwaters in the Chalk and Pleistocene sands of north-east Suffolk. Rep. WD/ST/85/1, British Geological Survey.
- BATH A. H., EDMUNDS W. M. (1981) Identification of connate water in interstitial solution of Chalk sediment. *Geochim. cosmochim. Acta* 45, pp. 1449-1461.
- BATH A. H., EDMUNDS W. M., ANDREWS J. N. (1979) Palaeoclimatic trends deduced from hydrochemistry of a Triassic sandstone aquifer, United Kingdom. *Isotope Hydrology 1978*, IAEA, Vienna.
- BEAK (1997) Regionale Verteilung des Arsens in den Rotliegendesedimenten Sachsens. Abschlußbericht i.A. des Sächs. Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung, Bericht (unveröff.), Beak Consultants GmbH, Freiberg.
- BEHR (1994) In: STUMM, A. 1999. Origin of the high concentration of Chloride in the mineral waters in the region "Vogtland". Schriftliche und mündliche Mitteilungen zur Dissertationsarbeit, TU Bergakademie Freiberg.
- BEIER M., SZYMCZAK P. (1986) Hydrogeologischer Ergebnisbericht mit Grundwasservorratsberechnung. VE St. Egidien Nr. E 996/83, Bericht (unveröff.).
- BEKINS B., MCCAFFREY A. M., DREISS S. J. (1994) Influence of kinetics on the smectite to illite transition in the Barbados accretionary prism. *J. of Geophysical Research* 99, no. B9, pp. 18147-18158.

- BENNETT J. R., HARRISON I. B. (1980) Explanatory Notes for the International Hydrogeological Map of Europe, Sheet B3, Edinburgh, UNESCO, Paris.
- BENSE V. F., PERSON M. (2005) Faults as conduit-barrier systems to fluid flow in siliciclastic sediments. Abstracts with Programs - Geological Society of America, Vol.37, No.7, pp.167-168.
- BENSE V., VAN BALEN R. (2003) Hydrogeological aspects of fault zones on Various scales in the Roer Valley Rift System. *Journal of Geochemical Exploration* 78-79, pp.317-320.
- BERGER H. J. (2004) Die geologisch-tektonische Situation im Zwickau-Oelsnitzer Steinkohlenrevier unter besonderer Berücksichtigung der Tiefbohrung Oelsnitz GWM 1/03. Schriftenreihe der DGG, Heft 34, pp. 94-95, Hannover.
- BERGER H.-J. (1997) Tektonische Strukturkarte 1: 200 000, Geologische Übersichtskarte der BRD, Blatt Zwickau, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.
- BERRIOS AMADOR D. (2004) Ergebnisbericht, Ertüchtigung Grundwassermodell der Stadt Zwickau. Ergebnisbericht unveröff.), Freiberg.
- BERRY F. A. F. (1973) High fluid potentials in California Coast Ranges and their tectonic significance. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 57, pp. 1219-1249.
- BETHKE C. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. *Geology (Boulder)* 16, nr. 6, pp. 560-561.
- BETHKE C. M. (1986) Hydrologic constraints on the genesis of the Upper Mississippi Valley mineral district from Illinois basin brines. *Econ. Geol.* 81, pp. 233-249.
- BETHKE C. M. (1986) Inverse hydrologic analysis of the distribution and origin of Gulf Coast-type geopressed zones. *J. of Geophysical Research* 91, pp. 6535-6545.
- BETHKE C. M. (1989) Modeling subsurface flow in sedimentary basins. *Geologische Rundschau* 78, pp.129-154.
- BETHKE C. M., (1985) A numerical model of compaction-driven groundwater flow and heat transfer and its application to the paleohydrology of intracratonic sedimentary basins. *J. of Geophysical Research* 90, No. B8, pp. 6817-6828.
- BETHKE C. M., BERGER P. M. (2004) Dissolved noble gases reveal three-dimensional flow patterns of very old groundwater in sedimentary basins Abstracts with Programs - Geological Society of America, vol.36, no.5, pp.469.
- BETHKE C. M., HARRISON W. J., UPSON C., ALTANER S. P. (1988) Supercomputer analysis of sedimentary basins. *Science* 239, pp. 261-267.
- BfG (2003) Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses. Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-Bericht Nr. 1342, Koblenz.
- BfS (1999) Schriftliche Mitteilungen von HENZE G. vom 29.04.99 (Email) und 30.04.99. Bundesamt für Strahlenschutz, Zweigstelle Berlin
- BGR (1995) Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Archiv-Nr. Hannover 111 089.
- BGR (2003) Datenblatt Kennwert: 4.7 Mittlerer jährlicher Gesamtabfluss (GA) nach dem BAGLUVA-Verfahren. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BGS (1993) Edinburgh. A landscape fashioned by geology. Scottish Natural Heritage & British Geological Survey, Edinburgh, U.K.
- BIRKLE P., AGUILAR MARURI R. (2003) Isotopic indications for the origin of formation water at the Activo Samaria-Sitio Grande oil field, Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol.78-79, No.2003, pp.453-458.

- BJORLYKKE K (1993) Fluid flow in sedimentary basins. *Sedimentary Geology* 86, pp. 137-158.
- BJORLYKKE K. (1983) In: PARKER, SELLWOOD (Eds.) Diagenetic reactions in sandstones in sediment diagenesis. Reidel Publishing, Dordrecht, pp. 169-213.
- BJORLYKKE K. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. *Geology (Boulder)* 16, nr. 6, pp. 560-561.
- BJORLYKKE K., MO A., PALM E. (1988) Modelling of thermal convection in sedimentary basins and its relevance to diagenetic reactions. *Marine and Petroleum Geology* 5, pp. 338-351.
- BJORLYKKE K., RAMM M., SAIGAL G. C. (1989) Sandstone diagenesis and porosity modification during basin evolution. *Geologische Rundschau* 78, pp. 243-268.
- BKS (1998) Mischwasserkontingenterung Einzugsgebiet ZKA Zwickau-Crossen. Bericht (unveröff.), Arbeitsbericht im Auftrag der Wasserwerke Zwickau GmbH. bks Ingenieurbüro GbR mbH, Wilkau-Haßlau.
- BLACK J. H., BARKER J. A. (1983) Hydrogeological reconnaissance study of the Worchester Basin. Rep. ENPU 81-3, Institute of Geological Sciences.
- BLANCHARD P. E., SHARP J. M. Jr. (1985) Possible free convection in thick Gulf Coast sandstone sequences. *Southwest Section AAPG 1985 Transactions, Am. Assoc. Petrol. Geol.*, pp. 6-12.
- BLASY, BUSSE (1994) In: KRÄMER C. (1999) Hydrogeologisches Modell Zeisigwaldtuff (Arbeitstitel). Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- BLESS M. J. M. et al. (1981) Preliminary report on lower Tertiary-Upper Cretaceous, and Dinantian-Famennian rocks in the boreholes Heugem-1/1a and Kastanjelaan-2 (Maastricht, The Netherlands). *Mededelingen Rijks geologische Dienst* 35-15, pp. 333-415.
- BLOCK C. (2006) Grundwasserflurabstände für die Blattsschnitte Chemnitz und Zwickau. Digitale Datensätze aus der Kartierung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung im Maßstab 1:25.000, Darstellung 1:50.000 (HyK 50), schriftliche Auskünfte. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.
- BLOXAM und OWEN (1985) Persönliche Mitteilung. In: DOWNING R. A., EDMUNDS W. M., GALE I. N. (1987) Regional groundwater flow in sedimentary basins in the U.K. In: GOFF J. C., WILLIAMS B. P. J. (Eds.) Fluid flow in sedimentary basins and aquifers. *Geol. Soc. Spec. Publ. No. 34*, pp. 105-125.
- BLÜHER H. J. (1956) Ergebnisse geologischer Erkundungsarbeiten in den sächsischen Steinkohlenrevieren Zwickau und Oelsnitz. Freiberg.
- BLÜHER H. J. (1960) Zur Hydrogeologie des Oberkarbons und Rotliegenden im westlichen Erzgebirgischen Becken. *Z. Geologie*, S. 909-929, Berlin.
- BLÜHER H. J. (1968) Ergebnisse geologischer Erkundungsarbeiten in den sächsischen Steinkohlenrevieren Zwickau und Oelsnitz. *Z. Geologie*, S. 57-65, Berlin.
- BLÜHER H. J. (Ed.) (1967) Geologische Karte der DDR 1:200.000, Karl-Marx-Stadt, M-33-VII, Teil: Varistische Molasse.
- BODE H. (1964) Zur Hydromechanik des Beckens von Münster. *Memoires AIH V*, Athens, pp. 210-215.
- BOLES J. R. (1987) Six million year diagenetic history, North Coles Levee, San Joaquin basin. In: MARSHALL J. D. (Ed.) Diagenesis of sedimentary sequences. *Geological Society of London Special Publication* 36, pp. 191-200.
- BOLES J. R. (1998) Carbonate cementation in Tertiary sandstones, San Joaquin basin, California. In: MORAD S. (Ed.) Carbonate cementation in sandstones. *International Association of Sedimentologists Special Publication* 26, Malden, Massachusetts, Blackwell Science Inc., pp. 261-284.
- BOLES J. R., RAMSEYER K. (1987) Diagenetic carbonate in Miocene sandstone reservoir, San Joaquin basin, California. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 71, pp. 1475-1487.
- BOND D. C. (1972) Hydrodynamics in deep aquifers of the Illinois basin: Illinois State Geological Survey Circular 470, 72 pp.

- BONHAM L. C. (1980) Migration of hydrocarbons in compacting basins. Problems of petroleum migration. AAPG Studies in Geology, Nr. 10, pp. 69-88.
- BORIES S. A., COMBARNOUS M. A (1973) Natural convection in a sloping porous layer. J. Fluid Mechanics 57, 1, pp. 63-79.
- BOULTON G. S., CABAN P. E., VAN GIJSEL K., LEIJNSE A., PUNKARI M., VAN WEERT F. H. A. (1996) The impact of glaciation on the groundwater regime of Northwest Europe. Global and Planetary Change, vol.12, pp.397-413.
- BOUW L., OUDE ESSINK G. H. P. (2003) Fluid flow in the Northern Broad Fourteens Basin during Late Cretaceous inversion. Geologie en Mijnbouw. Netherlands Journal of Geosciences, Vol.82, No.1, pp.55-69.
- BRADLEY, J. S. (1986) Fluid movement in deep sedimentary basins: a review. Proceedings Canadian/American Conference on Hydrogeology Dublin, OH (USA), pp. 19-31.
- BRAUSE H. (1995) NW-Sachsen gehört zum basementbetonten Teil der Saxothuringischen Zone. Z. geol. Wiss., 23 (1995), ½, S.37-42, Berlin.
- BRAUSE H. (1999) Abschlußbericht zum Projekt "Komplexuntersuchung zu Auswirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus im Raum Oelsnitz-Zwickau. Bericht (unveröff.), Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.
- BRAUSE H. (2000) Ergebnisse der Komplexuntersuchung zu Auswirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus im Raum Oelsnitz-Zwickau. Vortrag und Tagungsband (unveröff.), Symposium REVI in Kladno 31.8.2000, STEG Stadtentwicklung Südwest Gemeinnützige GmbH, Dresden.
- BRAUSE H. (Ed.) (1997) Folgeerscheinungen des Steinkohlenbergbaus im Raum Oelsnitz-Zwickau. Beiträge verschiedener Autoren, In: Exkursführer und Veröffentlichungen, GW, 199, Berlin.
- BRAUSE H., FISCHER M. (Ed.) (1996) Komplexuntersuchung zu Auswirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus im Raum Oelsnitz-Zwickau. Abschlußbericht zu Phase 1, Bericht (unveröff.), Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie/Sächsisches Oberbergamt, Freiberg.
- BREDEHOEFT J. D., BLYTH C. R., WHITE W. A., MAXEY G. B. (1963) Possible mechanism for concentration of brines in subsurface formations. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol. 47, pp. 257-269.
- BRINSCHWITZ (1992) Beiträge zur Geschützteitsbewertung von Festgesteinsaquiferen unter besonderer Berücksichtigung geogener Kontaminationsquellen. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg.
- BSA (1974) Bergschadenkundliche Analyse der Steinkohlenlagerstätte Lugau-Oelsnitz. Bericht (unveröff.), VEB Baugrund Berlin PB Zwickau u. VEB Steinkohlenwerk Oelsnitz.
- BSA (1981) Bergschadenkundliche Analyse "Raum Zwickau". Bericht (unveröff.), VEB SBK Wasserbau KB Baugrund Berlin PB Zwickau u. VEB Steinkohlenkokereien "August Bebel" BT "Martin Hoop".
- BUDNIK R. T., SMITH D. A. (1982) Regional stratigraphic framework of the Texas Panhandle. In: Geology and geohydrology of the Palo Duro Basin, Texas Panhandle, a report on the progress of nuclear waste isolation feasibility studies (1981). The University of Texas at Austin, Bur. Econ. Geol. Geological Circ. 82-7, pp. 38-90.
- BURGESS W.E., EDMUNDS W. M., ANDREWS J. N., KAY R. L. F., LEE D. J. (1980) The hydrogeology and hydrochemistry of the thermal water in the Bath-Bristol Basin. Investigation of the Geothermal Potential of the U.K., British Geological Survey.
- BURKE W. H., DENISON R. E., HETHERINGTON E. A., KOEPNICK R. B., NELSON H. F., OTTO J. B. (1982) Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time. Geology 10, pp. 516-519.
- BURRUSS R. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. Geology (Boulder) 16, nr. 6, pp. 560-561.

BUSCHAERT S., FOURCADE S., CATHELINEAU M., DELOULE E., MARTINEAU F., OUGOUGDAL M. A., TROUILLER A. (2004) Widespread cementation induced by inflow of continental water in the eastern part of the Paris Basin; O and C isotopic study of carbonate cements. *Applied Geochemistry*, Vol.19, No.8, pp.1201-1215.

BUTLER M., PHELAN, M. J., WRIGHT A. W. R. (1976) Buchan Field: evaluation of a fractured sandstone reservoir. *Trans. 4th European Formation Evaluation Symp., Society of Professional Well Log Analysts*.

C&E (1997) Untersuchungen der infrastrukturellen und umweltrelevanten Auswirkungen des Auflassens des Bergbaus im ehemaligen Steinkohlerevier Lugau-Oelsnitz. Bericht (unveröff.), Consulting und Engineering GmbH, Chemnitz.

C&E (2001) Revitalisierung von Städten in ehemaligen Kohlebergbaugebieten. Themenkomplex 1: Beherrschung und Nutzung der Bergbaufolgewirkungen. Bericht (unveröff.), Consulting und Engineering GmbH, Chemnitz.

CARPENTER A. B. (1978) Origin and chemical evolution of brines in sedimentary basins. *Okla. Geol. Surv. Circ. 79*. pp. 60-77.

CARSEL R. F., PARRISH R. S. (1988) Developing joint probability distributions of soil-water retention characteristics. *Water Resources Research* 24 (5), S. 755-769.

CARSLAW H. S., JAEGER J. C. (1962) *Conduction of heat in solids*. Oxford, Clarendon Press, 510p.

CATHLES L. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. *Geology (Boulder)* 16, nr. 6, pp. 560-561.

CATHLES L. M. (1981) Fluid flow and genesis of hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume, pp. 424-457.

CATHLES L. M., SMITH A. T. (1983) Thermal constraints on the formation of Mississippi valley-type lead-zinc deposits and their implications for episodic basin dewatering and deposit genesis. *Economic Geology* 78, pp. 983-1002.

CHENG A.. (1998) GOCAD TUTORIALS. TUTORIAL 1 und 2 (GQS), HAFMIG Vol.1, T-SURF, Nancy.

COMBARNOUS M. A., BORRIES S. A. (1975) Hydrothermal convection in saturated porous media. *Advances in Hydrosience* 10, Academic Press, New York, pp. 232-307.

CONRAD W., HÄNIG D., HAUPT M. (1983) Ein geologisch-geophysikalisches Schema der Grenzregionen zwischen der DDR und der CSSR. *Z. geol. Wiss.*, 11, 669-686, Berlin.

CONSTANTIN J., PEYAUD J. B., VERGELY P., PAGEL M., CABRERA J. (2004) Evolution of the structural fault permeability in argillaceous rocks in a polyphased tectonic context. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol.29, No.1, pp.25-41.

COPLEN T. B., HANSHAW B. B. (1973) Ultrafiltration by a compacted clay membrane, I, Oxygen and hydrogen isotopic fractionation. *Geochim. cosmochim. Acta* 37, pp. 2295-2310.

CRAIG G. Y. (Ed.) (1991) *Geology of Scotland*. The Geological Society, London, U.K.

C-W-H (1994) Untersuchung zur Klärung der hydrologischen Verhältnisse für den Bereich der Bockwaer Senke. Abschlußbericht. Unveröff. Bericht. C-W-H GmbH, Grüna.

CWH (1994) Untersuchung zur Klärung der hydrologischen Verhältnisse für den Bereich der Bockwaer Senke. Abschlußbericht, Bericht (unveröff.), C-W-H GmbH, Grüna.

DABER R. (1992) Die Geologie und die Entstehung der Steinkohlen von Zwickau und Oelsnitz. *Wiss. Zeitschrift der Humboldt-Universität zu Berlin, Reihe Mathematik und Naturwissenschaften*, 41, 1992.

- DAVIES P. B. (1987) Modeling areal, variable density, ground-water flow using equivalent freshwater head – analysis of potentially significant errors. In: Proc. NWWA-IGWMC Conf.-Solving Groundwater Problems with models (1987). Denver, CO. National Water Well Assoc., Dublin, OH, pp. 888-903.
- DAVIS N. S., DE WIEST R. J. M. (1966) Hydrogeology. Wiley & Sons, 463 S., New York – London – Sydney – Toronto.
- DAVIS S. N. (1964) The chemistry of saline waters by R. A. KRIEGER – Discussion. Ground Water 2, p. 51.
- DELISLE (1998) In: DUPHORN K. (2000) Das Quartär als geologisches Leichentuch des Endlagerbergwerkes Gorleben? Fachtagung Endlager Gorleben, Dokumentation, Zur Sache, Nr. 9, Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg e.V.
- DEUBEL F. (1944) Geologische Grundlagen und derzeitiger Stand der Wasserversorgung in Thüringen. Reichsamt Bodenforschung. Hydrogeologische Forschungen 1.
- DEVARY J. L. (1983) Permian potentiometric analysis. Batelle Mem. Inst., Pacific Northwest Laboratories, U.S. Department of Energy contract No. DE-AC06-76RL01830.
- DÖBBER, SCHEYTT (2002) In: FELIX M., GÖRNE S., BERGER H.-J., SCHUBERT H. (2006) Unverbindl. mündl. und schriftl. Vorab-Mitteilungen zur räumlichen geologischen Modellierung des Gebietes Zwickau-Oelsnitz mit GOCAD und zum Projektschwerpunkt „Bergbaufolgen im ehemaligen Steinkohlenbergbaurevier Lugau-Oelsnitz unter besonderer Berücksichtigung der Ergebnisse der Tiefbohrung 1/2003“ einschliesslich damit verbundener Teiluntersuchungen. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.
- DOMENICO P. A. (1977) Transport phenomena in chemical rate processes in sediments. Annual reviews of Earth and Planetary Science 87, pp. 390-400.
- DOMENICO P. A., SCHWARTZ F. W. (1990) Physical and chemical hydrology. Wiley, New York, 824 pp.
- DORGARTEN H.-W., TSANG C.-F. (1991) Modelling the density-driven movement of liquid wastes in deep sloping aquifers. Ground Water 29(5), pp. 655-662.
- DÖRING H., HOTH K., KAHLERT E. (1988) Gegenwärtiger Stand der litho- und sporenstratigraphischen Gliederung des Zwickauer Siles. Freiburger Forschungshefte, C419, S. 18-29, Leipzig.
- DOWNING R. A., ALLEN D. J., BIRD M. J., GALE I. N., KAY R. L. F., SMITH I. F. (1985) Cleethorpes No 1 Geothermal Well – a preliminary assessment of the resource. Investigation of the Geothermal Potential of the U.K. British Geological Survey.
- DOWNING R. A., EDMUNDS W. M., GALE I. N. (1987) Regional groundwater flow in sedimentary basins in the U.K. In: GOFF J. C., WILLIAMS B. P. J. (Eds.) Fluid flow in sedimentary basins and aquifers. Geol. Soc. Spec. Publ. No. 34, pp. 105-125.
- DUBLYANSKY Y. V., SMIRNOV S. Z., PASHENKO S. E. (2003) Identification of the deep-seated component in paleo fluids circulated through a potential Nuclear waste disposal site; Yucca Mountain, Nevada, USA. Journal of Geochemical Exploration, Vol.78-79, No.2003, pp.39-43.
- DUCHI V., VENTURELLI G., BOCCASAVIA I., BONICOLINI F., FERRARI C., POLI D. (2005) Studio geochimico dei fluidi dell'Appennino Tosco-Emiliano-Romagnolo. Fluid geochemistry in the Tuscany and Emilia-Romagna Apennines, Italy. Bollettino della Societa Geologica Italiana, Vol.124, No.2, pp.475-491.
- DUFF P. McL. D., SMITH A. J. (Eds.) (1992) Geology of England and Wales. The Geological Society, London, U.K.
- DUNNING F. W., MERCER I. F., OWEN M. P., ROBERTS R. H., LAMBERT J. L. M. (1978) Britain before Man. Geological Museum. Institute of Geological Sciences, London, Edinburgh 1978.
- DUPHORN K. (2000) Das Quartär als geologisches Leichentuch des Endlagerbergwerkes Gorleben? Fachtagung Endlager Gorleben, Dokumentation, Zur Sache, Nr. 9, Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg e.V.

DUTELOFF T. (1998-2006) Auskopplungen aus der Datenbank FIS Hydrogeologie des LfUG Sachsen. Digitale Daten und schriftl. Mitteilungen. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.

DWD (2006) Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes. www.deutscher-wetterdienst.de, Juni 2006, Geschäftsbereich Klima und Umwelt, Online Redaktion, Offenbach.

ECKART, UNLAND (2005) Boxmodell zum Flutungsraum des ehemaligen Steinkohlenbergbaus in Lugau-Oelsnitz. Bericht (unveröff.).

EDMUNDS W. M. (1971) Hydrogeochemistry of groundwaters in the Derbyshire Dome with special reference to trace constituents. Rep. 71/7, Institute of Geological Sciences.

EDMUNDS W. M. (1986) Geochemistry of geothermal waters in the U.K. In: DOWNING R. A., GRAY D. A. (Eds.) Geothermal Energy – the Potential in the United Kingdom. HMSO, London.

EDMUNDS W. M., BATH A. H., MILES D. L. (1982) Hydrochemical evolution of the East Midlands Triassic sandstone aquifer, England. *Geochim. cosmochim. Acta* 46, pp. 2069-2081.

EDMUNDS W. M., LOVELOCK P. E. R., GRAY D. A. (1973) Interstitial water chemistry and aquifer properties in the Upper and Middle Chalk of Berkshire, England. *J. Hydrol.* 19, pp. 21-31.

ENMOTEC (1992) Hydrogeologisches Gutachten zur Bemessung von Trinkwasserschutzzonen für das Gebiet Oberlungwitz. Bericht (unveröff.), ENMOTEC Gesellschaft für Planung, Erkundung, Baugrund und Umweltschutz mbH, Freiberg.

ERDÉLYI M. (1979) A Magyar Medence hidrodinamikája. Hydrodynamics of the Hungarian Basin. VITUKI Közlemények, Proceedings Research Institute for Water Resources Management 18, Budapest.

ERDÉLYI M. (1985) Geothermics and the deep Flow-system of the Hungarian Basin. *J. of Geodynamics* 4, pp. 321-330.

ERNST U. (2006) Grundwasserstandsdaten Bereich Vorerzgebirgssenne und Umland. Auszug Datenbank Landesmessnetz, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Abteilung Oberflächenwasser, Dresden.

ESRI (1998) Online Tutorial ArcView 3.1. Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, California, USA.

ETMINAN H., HOFFMANN C. F. (1989) Biomarkers in fluid inclusions: A new tool in constructing source regimes and its implications for the genesis of Mississippi Valley-type deposits. *Geology* 17, pp. 19-22.

EULENBERGER S. (1994) Modellierung des geologischen Untergrundes der Kommunaldeponie Weißer Weg-Grundlagen einer Gefährdungsabschätzung. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.

EVANS G. V., OTLET R. L., DOWNING R. A., MONKHOUSE R. A., RAE G. (1979) Some problems in the interpretation of isotope measurements in United Kingdom aquifers. *Isotope Hydrology* 1978, IAEA, Vienna.

FELDMAN M. D. , KWON S. -T., BOLES J. R., TILTON G.R. (1993) Diagenetic mass transport in the southern San Joaquin basin, California, U.S.A.: Implications from the strontium isotopic composition of modern pore fluids. *Chemical Geology* 110, pp. 329-343.

FELIX M., GÖRNE S., BERGER H.-J., SCHUBERT H. (2006, 2007) Mündl. und schriftl. Vorab-Mitteilungen zur räumlichen geologischen Modellierung des Gebietes Zwickau-Oelsnitz mit GOCAD und zum Projektschwerpunkt „Bergbaufolgen im ehemaligen Steinkohlenbergbaurevier Lugau-Oelsnitz unter besonderer Berücksichtigung der Ergebnisse der Tiefbohrung 1/2003“ einschliesslich damit verbundener Teiluntersuchungen. Aktualisierungen 2007, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.

FENK J (1998) Komplexuntersuchung zu Auswirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus im Raum Oelsnitz-Zwickau, Teilaufgabe „Markscheiderische Auswertungsarbeiten“. Bericht (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.

- FILIPEK L. H. (1992) Hydrodynamics of deep-basin flow: Constraints on timing of midcontinent MVT deposits and a mechanism for heating Pennsylvanian coal. Oklahoma Geol. Surv. Circular 93, pp. 311-312.
- FISCHER F. (1990) Das Rotliegende des ostthüringisch-vestsächsischen Raumes. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- FISHER J. B., BOLES J. R. (1990) Water-rock interaction in Tertiary sandstone, San Joaquin basin, California, U.S.A.: Diagenetic controls on water composition. Chemical Geology 82, pp.83-101.
- FISHER R. S. und KREITLER C. W. (1987) Geochemistry of deep-basin brines, Palo Duro Basin, Texas, U.S.A. Applied Geochemistry, vol. 2, pp. 459-476.
- FISK E. P., PENNINGTON W. D. (1976) Groundwater geology and hydrology of the Kufra region, Libyan Arab Republic. The Libyan Journal of Science 6B, pp. 34-54.
- FLINK J. (1985) De verspreiding van arseen in het grondwater in ZuidelEen regional gehydrologisch modelonderzoek van de Centrale Slenk van Noord-Brabant. Rapport 840438003, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene, Leidschedam.
- FRANCA A. B., ARAUJO L. M., MAYNARD J. B., POTTER P. E. (2003) Secondary porosity formed by deep meteoric leaching; Botucatu eolianite, southern South America. AAPG Bulletin, Vol.87, No.7, pp.1073-1082.
- FRAPE S. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. Geology (Boulder) 16, nr. 6, pp. 560-561.
- FRAPE S. K., BLOMQUIST R., BLYTH A. R., MCNUTT R. H., GASCOYNE M. (2003) Some additional aspects of the evolution of brines in crystalline rocks gained from isotope geochemistry. Abstracts with Programs - Geological Society of America, Vol.35, No.6, pp.201.
- FRAPE S. K., FRITZ P. (1984) Water-rock interaction and chemistry of groundwaters from the Canadian shield. Geochimica et Cosmochimica Acta 48, pp. 1617-1627.
- FREEZE R. A., WITHERSPOON P. A. (1966) Theoretical analysis of regional groundwater flow, 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. Water Resour. Res. 2(4), pp.641-656.
- FREEZE R. A., WITHERSPOON P. A. (1967) Theoretical analysis of regional groundwater flow, 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation. Water Resour. Res. 3(2), pp. 623-634.
- FREEZE R. A., WITHERSPOON P. A. (1968) Theoretical analysis of regional groundwater flow. Quantitative interpretations. Water Resour. Res. 4(3), pp. 581-590.
- FRIND E. O., MATANGA G. B. (1985) The dual formulation of flow transport modeling; 1. Review of theory and accuracy aspects. Water Resour. Res. 21(2), pp. 159-169.
- G.E.O.S. (1992) Hydrogeologisches Gutachten Trinkwasserschutzzonen Tiefbrunnen Heinrich-Braun-Krankenhaus in Zwickau im Auftrag der Wasserwerke Zwickau. Bericht (unveröff.), GEOS Ingenieurgesellschaft mbH, Freiberg.
- G.E.O.S. (1996) Begutachtung strahlenschutzrechtlicher Genehmigungsanträge der WISMUT GmbH zur Zwischenabdeckung der Tailings und Einlagerung anderer kontaminierter Materialien im Bereich der IAA Helmsdorf: Fachbericht Hydrogeologie-Hydrochemie. Bericht (unveröff.), GEOS Ingenieurgesellschaft mbH. Gutachten im Auftrag von BRENK SYSTEMPLANUNG und des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung.
- G.E.O.S. (1996b) Hydrogeologisches Gutachten zum Auftreten von Grundwasser in Grundstücken an der Waldstraße in Zwickau-Marienthal. Bericht (unveröff.), GEOS Ingenieurgesellschaft mbH, Freiberg.
- GABRIEL B., JACOBS H., ZIEGLER G. (1984) Methodik und Anwenderinstruktion zur Grundwasserdarstellung im Festgesteinsbereich unter Einbeziehung des Systemverhaltens der Einzugsgebiete. F/E-Stufe A4, Bericht (unveröff.), Institut für Wasserwirtschaft/Forschungsbereich Erfurt, Berlin.

- GABRIEL B., ZIEGLER G., JACOBS H. (1986) Das Festgesteinsmodell GEOFEMLAW als Grundlage für die neue Methodik der Grundwasserneubildungsberechnung im Festgesteinsbereich. Wasserwirtschaft – Wassertechnik 36, Heft 2.
- GALE I. N., EVANS C. J., EVANS R. B., SMITH I. F., HOUGHTON M. T., BURGESS W. G. (1984) The Permo-Triassic aquifers of the Ceshire and West Lancashire basins. Investigation of the Geothermal Potential of the U.K., British Geological Survey.
- GÁLFI J., STEGENA L. (1977) Magyarország geotermikus viszonyai. Magyarország Hévizkutjai III, p. 47.
- GALLOWAY W. E. (1984) Hydrogeologic regimes of sandstone diagenesis. In: MC DONALD D. A., SURDAM R. C. (Eds.) Clastic diagenesis. American Association of Petroleum Geologists Memoir 37, pp. 3-13.
- GARVEN G. (1995) Continental-scale groundwater flow and geologic processes. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 23, pp. 89-117.
- GARVEN G., DUMOULIN J. A., KELLEY K. D., BRADLEY D. A., YOUNG L. E., LEACH D. L. (2004) Coupled heat and fluid-flow modelling of the giant Zn-Pb-Ba-Ag ore deposits at Red Dog, Alaska; implications for structural diagenesis during free convection in submarine sedimentary basins. Abstracts - Geological Society of Australia, Vol.73, pp.79.
- GARVEN G., FREEZE R. A. (1984) Theoretical analysis of the role of groundwater flow in the genesis of stratabound ore deposits, 1.-Mathematical and numerical model. American Jour. of Science 284, pp. 1085-1124.
- GARVEN G., SIMMS M. (2003) Hydrogeologic modeling of reactive flow, faults, and Pb-Zn ores in extensional basins. Abstracts with Programs - Geological Society of America, Vol.35, No.6, pp.202.
- GE S., GARVEN G. (1992) Hydromechanical modeling of tectonically-driven groundwater flow with application to the Arkoma foreland basin. J. of Geophysical Research 97, pp. 9119-9144.
- GE S., GARVEN G. (1994) A theoretical model for thrust-induced deep groundwater expulsion with application to the Canadian Rocky Mountains. J. of Geophysical Research 99, pp. 13851-13868.
- GEOFEM (1994) Hinweise zum Programm GEOFEM. Bericht (unveröff.), Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Abt. Wasserwirtschaft/ Referat Grundwasser, Jena 11/94.
- GEOFEM (2000) Programmversion GEOFEM 2000. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- GEOFEM (2003) Programmversion GEOFEM 2003 und Dokumentation zur Grunddatenermittlung für GEOFEM 2002/2003. Fritz + Froelich Umweltinformationssysteme. Bericht (unveröff.), i.A. des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dresden.
- GEOFEM (2004) Programmversion GEOFEM 2004. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- GEOLOGISCHES JAHRBUCH (1997) Hydrogeologische Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und die Staatlichen Geologischen Dienste in der BRD (Hrsg.), Geologisches Jahrbuch, Reihe G, Heft 2, Hannover 1997.
- GEOS & HGC (2000) Bericht zur Hydrogeologischen Kartierung Blatt Zwickau. Bietergemeinschaft G.E.O.S. FreibergIngenieurgesellschaft mbH und HGC Hydro-Geo-Consult mbH Freiberg, Bericht (unveröff.), LfUG Freiberg.
- GewK 200 (P) (1996) Gewässerkarte 1:200.000, Ausgabe mit Pegeln des Basismeßnetzes. Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden.

- GFE (1969) Darstellung des Kenntnisstands des Permokarbons im Erzgebirgischen Becken. Bericht (unveröff.), VEB Geologische Forschung und Erkundung, Betriebsteil Freiberg, Im Auftrag der SDAG Wismut, Zentraler Geologischer Erkundungsbetrieb.
- GFE (1985) Hydrogeologisches Gutachten zur Bockwaer Senke in Zwickau unter Berücksichtigung des Steinkohlenbergbaus. Bericht (unveröff.), VEB Geologische Forschung und Erkundung, Freiberg.
- GGD (1997) Ergebnisbericht Reflexionsseismik, Gravimetrie Stadtgebiet Zwickau. Erforschung des rezenten Hebungs- und Senkungsmusters und der Horizontalverschiebung in der Region Oelsnitz-Zwickau. Bericht (unveröff.), Geophysik GGD mbH, Leipzig.
- GGD (1997) Ergebnisbericht Reflexionsseismik, Gravimetrie Stadtgebiet Zwickau. Erforschung des rezenten Hebungs- und Senkungsmusters und der Horizontalverschiebung in der Region Oelsnitz-Zwickau. Bericht (unveröff.), Geophysik GGD mbH, Leipzig.
- GGD (2000) Geophysikalische Untersuchungen zur Klärung des Baues der Oberhohndorfer Hauptverwerfung im Rotliegenden im Rahmen des Projektes INTERREG II C. Bericht (unveröff.), Geophysik GGD mbH Leipzig.
- GHASSEMI F., FERGUSON J., ETMINAN H. (1990) Hydrogeology of deep aquifers in the Canning Basin, Western Australia. In: Australian Water Resources Council Conference Series, Proc. of the Int. Conf. on groundwater in large sedimentary basins, Perth, 20 (1991).
- GHEORGHE A., CRACIUN P. (1993) Thermal Aquifers in Romania. J. of Hydrology 145, pp. 111-123.
- GK25 (1875-1911) Geologische Spezialkarte des Königreich Sachsen. Leitung Hermann Credner. Kartenblätter 92-97, 110-114, 123-126.
- GK25 (1892) Geologische Spezialkarte von Preußen und den thüringischen Staaten. Hrsg. Kgl. Preuss. Geolog. Landesanstalt, Kartenblatt 18 Waltersdorf (Langhennersdorf), Berlin.
- GLASBERGEN P. (1981) Extreme salt concentrations in deep aquifers in The Netherlands. The Science of the total Environment 21, pp. 251-259.
- GLASBERGEN P. (1985) The origin of groundwater in Carboniferous and Devonian aquifers at Maastricht. Geologie en Mijnbouw 64, pp. 123-129.
- GLASBERGEN P. (1987) Hydrological model studies and natural isotope data as indication for groundwater flow in deep sedimentary basins. In: COME B. et al. Natural analogues in radioactive waste disposal. Radioactive waste management series, pp. 420-435.
- GLASBERGEN P., MOOK W. G. (1982) Natuurlijke isotopen als hulpmiddel bij regionaal geohydrologisch onderzoek in de provincie Groningen. H2O 15, pp. 682-686, 704.
- GLUGLA G. (1985) Anwenderrichtlinie zur Nutzung der neuen Karten des Gesamtabflusses im Maßstab 1:200000 (Deckfolien zur Abflußkarte des N-A-U-Kartenwerkes über das Gebiet der DDR). Institut für Wasserwirtschaft, Bereich Wasserbewirtschaftung, Berlin.
- GLUGLA G., ENDERLEIN R., EYRICH A. (1976) Das Programm RASTER- ein effektives Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung im Lockergesteinsbereich. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 26 (1976), 11, S.377-382.
- GMS (1967) Übersichtsrisse der Grubenmarkscheiderei Zwickau. Risswerk des Steinkohlenbergbaus. Kartenwerk (unveröff.), Zwickau.
- GOFF J. C., WILLIAMS B. P. J. (Eds.) (1987) Fluid flow in sedimentary basins and aquifers. Geol. Soc. Spec. Publ. No. 34.
- GOFF J. C., WILLIAMS B. P. J. (Eds.) (1987) Fluid Flow in Sedimentary Basins and Aquifers. Geological Society Special Publication, vol. 34., 230 pp.

GOLOMBEK M. P., Mc GILL G. E., BROWN L. (1983) Tectonic and geologic evolution of the Espanola basin, Rio Grande rift: structure, rate of extension, and relation to the state of stress in the western United States. *Tectonophysics*, 94, p. 483-507, Amsterdam.

GONCALVES J., VIOLETTE S., ROBIN C., PAGEL M., GUILLOCHEAU F., DE MARSILY G., BRUEL D., LEDOUX E. (2003) 3-D modelling of salt and heat transport during the 248 m.y. evolution of the Paris Basin; diagenetic implications. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, Vol.174, No.5, pp.429-439.

GÖTTELMANN U. (1999a) Bericht zur wasserwirtschaftlichen Situation im Raum Zwickau-Oelsnitz. Im Rahmen des FuE Projektes „Hydrogeologische Analyse der Vorerzgebirgssenke. Bericht (unveröff.), Büro für Hydrologie Ulrich Göttelmann, Konstanz.

GÖTTELMANN U. (1999b) Abschlußbericht zur Synchronisierung der geologischen und hydrologischen Datenbestände. Im Rahmen des FuE Projektes „Hydrogeologische Analyse der Vorerzgebirgssenke. Bericht (unveröff.), Büro für Hydrologie Ulrich Göttelmann, Konstanz.

GÖTTELMANN U., KOLITSCH S. (2000) FuE Projekt: Hydrogeologische Analyse der Vorerzgebirgssenke. Abschlussbericht. I. A. des Sächs. Landesamtes für Umwelt und Geologie, Freiberg, TU Bergakademie Freiberg.

GÖTTELMANN U., KOLITSCH S., MERKEL B. (1998) Unveröff. Teilbericht zur Komplexuntersuchung zu den Auswirkungen des Steinkohlenbergbaus Zwickau – Oelsnitz, Phase 2. TU Bergakademie Freiberg.

GRAF D. L. (1982) Chemical osmosis, reverse chemical osmosis, and the origin of subsurface brines. *Geochim. cosmochim. Acta* 46, pp. 1431-1448.

GRAF D. L., MEENTS W. F., FRIEDMAN I., SHIMP N. F. (1966) The origin of saline formation waters-III. Calcium chloride waters. *Illinois State geol. Survey Circ.* 397.

GRAHMANN R. (1943) Die Aufnahme der Grundwässer im Lande Sachsen. *Jahrbuch Reichsamt Bodenfor-schung* 1942, 63.

GRAHMANN R. (1944) Die hydrogeologischen Grundlagen der Wasserversorgung Sachsens und des nördlichen Sudetenlandes. *Abhandlung Reichsamt Bodenforschung*. N. F., H.209, 189.

GRASBY S. E., CHEN Z. (2005) Subglacial recharge into the Western Canada Sedimentary Basin; impact of Pleistocene glaciation on basin hydrodynamics. *Geological Society of America Bulletin*, Vol.117, No.3-4, pp.500-514.

GRASBY S., OSADETZ K., BETCHER R., RENDER F. (2000) Reversal of the regional-scale flow system of the Williston basin in response to Pleistocene glaciation. *Geology*, vol.28, pp.635–638.

GREGG J. M., SHELTON K. L., BAUER R. M. (1992) Geochemical and fluid inclusion evidence for regional alteration of upper carbonates by basinal fluids in southern Missouri. *Oklahoma Geol. Surv. Circular* 93, pp. 313 ff.

GUB (1998a) Straßentunnel im Verlauf der B93 am Muldeufer. Baugrundgutachten. Bericht (unveröff.), G.U.B. Ingenieurgesellschaft mbH, Büro Zwickau, Zwickau.

GUB (1998b) Straßentunnel im Verlauf der B93 am Muldeufer. Grundwassermonitoring März bis September 1998. Bericht (unveröff.), G.U.B. Ingenieurgesellschaft mbH Büro Zwickau, Zwickau.

GUB (2001) Revitalisierung von Städten in ehemaligen Kohlebergbaugebieten. Teilprojekt: Beherrschung und Nutzung der Bergbaufolgewirkungen im ehemaligen Kohlebergbaugebiet Zwickau. Abschlussbericht (unveröff.), SITTNER H., LEONHARDT A., G. U. B. Ingenieurgesellschaft mbH, Büro Zwickau.

GUB (2003) Errichtung von 27 Grundwassermessstellen und Grundwasserstichtagsmessung in Zwickau-Innenstadt und Zwickau-Schedewitz. Bericht (unveröff.), SITTNER H., FRENZEL M., HILL H.-P., G.U.B. Ingenieurgesellschaft mbH, Zwickau.

GUENDOUZ A., MOULLA A. S. (2003) Hydrogeological and isotopic study of the Complexe Terminal Aquifer in the Saharan sedimentary basin, Algeria. Symposium on the Sedimentary Basins of Libya, vol.2, pp.291-298.

GUNTER W. D., BACHU S., BENSON S. M. (2004) The role of hydrogeological and geochemical trapping in sedimentary basins for secure geological storage of carbon dioxide. Geological Society Special Publications, Vol.233, pp.129-145.

GUTTERIDGE, HASKINS, DAVEY (1983) Causes, extent and effects of salinity in Victoria. Rept. To Parliamentary Salinity Committee.

HADRYANTO WAHYU (2003) Groundwater Modeling taking into account probabilistic Uncertainties. Dissertationsarbeit, TU Bergakademie Freiberg

HANNAPEL S. (1996) Die Beschaffenheit des Grundwassers in den hydrogeologischen Strukturen der neuen Bundesländer. FU Berlin. Berliner geowissenschaftliche Abhandlungen. Reihe A. Bd. 182.

HANNEMANN M., SCHIRRMMEISTER W. (1998) Paläohydrogeologische Grundlagen der Entwicklung der Süß-/ Salzwassergrenze und der Salzwasseraustritte in Brandenburg. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 5, 61– 72.

HANOR J. S. (1979) The sedimentary genesis of hydrothermal fluids. In: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (ed. H. L. BARNES), pp. 137-168. John Wiley & Sons.

HANOR J. S. (1983) Fifty years of development of thought on the origin and evolution of subsurface sedimentary brines. In: BOARDMAN S. J (Ed.) Revolution in the Earth Sciences. Kendall/ Hunt, Dubuque, pp. 99-111.

HANOR J. S. (1984) Variation in the chemical composition of oil-field brines with depth in northern Louisiana and southern Arkansas. Implications for mechanisms and rates of mass transport and diagenetic reaction. Transactions – Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. 34, pp. 55-61.

HANOR J. S. (1987) Kilometre-scale thermohaline overturn of pore waters in the Louisiana Gulf Coast. Nature 327, pp. 501-503.

HANOR J. S. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. Geology (Boulder) 16, nr. 6, pp. 560-561.

HANOR J. S., BRUNO R. S. (2003) Large-scale subsurface fluid flow in offshore Louisiana driven by the localized dissolution of salt. Abstracts with Programs - Geological Society of America, Vol.35, No.6, pp.202.

HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. Geology (Boulder) 16, nr. 6, pp. 560-561.

HANOR J. S., SASSEN R. (1990) Evidence for large-scale vertical and lateral migration of formation waters, dissolved salt, and crude oil in the Louisiana Gulf Coast. In: SCHUMACHER D., PERKINS B. F. (Eds.) Gulf Coast Oil and Gases: Their characteristics, origin, distribution, and exploration and production significance. Proc. 9th Ann. Res. Conf., Gulf Coast Section Soc. of Economic Paleontologists and Mineralogists Foundation, pp. 293-296.

HANOR R. J. S. (1994) Physical and chemical controls on the composition of waters in sedimentary basins. Marine and Petroleum Geology 11, pp. 31-45.

HANSOM J., LEE M. (2005) Effects of hydrocarbon generation, basal heat flow and sediment compaction on overpressure development; a numerical study. Petroleum Geoscience, vol.11, no.4, pp.353-360.

HARDIE L. A. und EUGSTER H. P. (1970) The evolution of closed-basin brines. Mineral. Soc. Am. Spec. Paper 3, pp. 273-290.

- HARRES PIKKEL CONSULT (1996) Untersuchungen zur Durchführbarkeit einer Dekontamination des Grundwassers im Hauptabstrom der Kommunaldeponie „Weißer Weg“ der Stadt Chemnitz. Harres Pikkell Consult.
- HAYES M. J., BOLES J. R. (1992) Volumetric relations between dissolved plagioclase and kaolinite in sandstones: Implications of aluminium mass transfer in the San Joaquin basin, California. In: HOUSEKNECHT D. W., PITTMAN E. D. (Eds.) Origin, diagenesis, and petrophysics of clay minerals in Sandstone: Society for Sedimentary Geology (SEPM) Special Publication 47, pp. 111-123.
- HEBERT D., DUNGER V., SZYMCAK P. (1992) Bericht über Ergebnisse isotopenhydrogeologischer Untersuchungen im Umfeld der Absetzanlagen des Uranaufbereitungsbetriebes Crossen (WISMUT) lt. Leistungsvertrag v. 18.02.1992. Bericht (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- HECHT G. (1980) Höherer Zechstein und unterer Buntsandstein in der Zeitz-Schmöllner Mulde. Z. geol. Wiss. 8 (1980) 6, pp. 645-667, Berlin.
- HECK H. -L. (1932) Das Grundwasser im Zusammenhang mit dem geologischen Bau Schleswig-Holsteins. Publikation der Preussischen Geologischen Landesanstalt Berlin, pp. 110, 117-119.
- HECKEL S. (2005) GEOFEM-Programmsystem zur Wasserhaushaltsberechnung im Festgestein – Validierung der Berechnungsmethodik. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- HELLSTROM B. (1940) The subterranean waters in the Libyan Desert. Sartrete Geogr. Annater. 34, pp. 206-239.
- HERZBERG O., MAZOR E. (1979) Hydrological applications of noble gases and temperature measurements in underground water systems: example from Israel. J. Hydrol. 41, pp. 217-231.
- HEYER E. (1975) Witterung und Klima. Eine allgemeine Klimatologie. BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig.
- HGC (2002) Errichtung von 2 GwM in Zwickau-Schedewitz – 1/2001 und 2/2001. Bericht (unveröff.), HGC Hydro-Geo-Consult mbH Freiberg.
- HGC (2005) Abschlussdokumentation der Tiefbohrung Oelsnitz 1/2003. Bericht (unveröff.), HGC Hydro-Geo-Consult mbH Freiberg.
- HGC, HGN (1999) Zusammenfassung des Ergebnisberichts: Tracerversuche Zwickau. Gutachten im Auftrag des Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie Freiberg, Bericht (unveröff.), HGC Hydro-Geo-Consult & HGN Hydrogeologie GmbH Dresden, Freiberg.
- HGN (1996a) Altlastenmodellstandort (MOST) Zwickau – Stufe 2. Ergebnisdokumentation, Bericht (unveröff.), HGN Hydrogeologie GmbH Niederlassung Dresden, Dresden.
- HGN (1996b) Komplexuntersuchung zu Auswirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus im Zwickau-Oelsnitzer Revier (Phase 1). Abschlußbericht zur Teilaufgabe 7.6 – Hydrogeologische und hydrologische Arbeiten. Bericht (unveröff.), HGN Hydrogeologie GmbH Niederlassung Dresden, Dresden.
- HGN (1997) Komplexe Altlastenuntersuchung des Schutzgutes Grundwasser am Altlastenmodellstandort MOST Zwickau, Teilstufe 3/1. Abschlußbericht, Bericht (unveröff.), HGN Hydrogeologie GmbH Niederlassung Dresden, Dresden.
- HGN (1998) Aufbau eines geologischen Modells für den Untergrund des Altlastenmodellstandortes Zwickau. Bericht (unveröff.), HGN Hydrogeologie GmbH Niederlassung Dresden, Dresden.
- HHB (2002) Hydrologisches Handbuch des Freistaates Sachsen, Teile 1 bis 3. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- HITCHON B. (1969) Fluid flow in the Western Canada Sedimentary Basin, 1, Effect of geology. Water Resour. Res. 5(1), pp. 186-195.
- HITCHON B. (2006) Lead and zinc in formation waters, Alberta Basin, Canada; their relation to the Pine Point ore fluid. Applied Geochemistry, Vol.21, No.1, pp.109-133.

- HOBSON G. D. (1961) Problems associated with the migration of oil in „solution“. J. Inst. Petrol. 47, Nr. 449, pp. 170-173.
- HOFMANN J (Ed.) (1998) Strukturgeologie und Hydrogeologie – Synergien am Beispiel der industriellen Absetzanlage Helmsdorf / Freistaat Sachsen der Wismut GmbH. In: Uranium Mining Proceedings, TU BA Freiberg, S. 271-280, Freiberg.
- HOFMANN Y. (2003) Gravimetrische und geodynamische Modellierungen in der Schwarmbeben-Region Vogtland/NW-Böhmen, Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- HOHL et al. (1981) Undifferenziertes Zitat in: WALTER R. (1992) Geologie von Mitteleuropa. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart.
- HÖHNE (2003) Mündliche und schriftliche Mitteilungen und digitale Daten zu Oberflächengewässern in Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- HOLLAND D. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. Geology (Boulder) 16, nr. 6, pp. 560-561.
- HÖLTING B. (1992). Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 4. Aufl., Enke-Verlag. Stuttgart
- HÖLTING B., COLDEWEY W. G. (2005). Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 6. Aufl., Spektrum-Akademischer Verlag. Stuttgart
- HOPPE W. (1952) Die hydrogeologischen Grundlagen der Wasserversorgung in Thüringen. Gustav Fischer, Jena.
- HORVÁTH F., ERKI I., BODRI L., OTTLIK P. (1979) Geothermics of Hungary and the Tectonophysics of the Pannonian Basin “Red Spot” in: Terrestrial Heat Flow in Europe, ed. V. Cermak and L. Rybach. pp. 206-217. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- HOTH K. (1984) Ressourcenpotential Steinkohle DDR; Geologie der Einzelvorkommen. Archiv des LfUG Sachsen, Freiberg.
- HOUGH E., PEARCE J. M., KEMP S. J., WILLIAMS G. M. (2006) An investigation of some sediment-filled fractures within redbed sandstones of the UK. Proceedings of the Yorkshire Geological Society, Vol.56, Part 1, pp.41-53.
- HUANG W. -L., LONGO J. M., PEVEAR D. R. (1993) An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as geothermometer: Clays and Clay Minerals 41, pp. 162-177.
- HUBBARD N. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. Geology (Boulder) 16, nr. 6, pp. 560-561.
- HÜBSCHMANN M. (2006) Informationsebenen zur Hydrogeologischen Kartierung im Maßstab 1:200.000 (HÜK 200) in digitaler Form, Kurzdokumentation, mündliche und schriftliche Auskünfte zur hydrogeologischen Kartierung des LfUG. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.
- HÜK200 (2006) Hydrogeologische Kartierung im Maßstab 1:200.000. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.
- HURTIG (1994). Land Brandenburg. Bohrungen mit kontinuierlichen Bohrlochmessungen. Bohrungen mit Maximaltemperaturen. Unverff. Unterlagen bereitgestellt durch das Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg. Zitiert In: MAGRI F., BAYER U., CLAUSNITZER V., JAHNKE C., DIERSCH H. J., FUHRMANN J., MOELLER P., PEKDEGER A., TESMER M, VOIGT H. (2005) Deep reaching fluid flow close to convective instability in the NE German Basin; results from water chemistry and Numerical modelling. Tectonophysics, Vol.397, No.1-2, pp.5-20.
- HYDROTEC (1998) Modelldokumentation und Handbuch NASIM 2.6. Hydrotec GmbH Aachen.

HYK50 (2006) Informationsebenen zur Kartierung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung im Maßstab 1:25.000, Darstellung 1:50.000 (HyK 50) in digitaler Form, Kurzdokumentation, mündliche und schriftliche Auskünfte zur hydrogeologischen Kartierung des LfUG. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.

ILGE, WERNER (2000) Mündliche Mitteilungen der RZV, Besprechung am 06.04.2000 in Oelsnitz/Sachsen.

INESON J. (1967) Groundwater conditions in the Coal Measures of the South Wales Coalfield. Hydrogeol. Rep. No. 3, Institute of Geological Sciences.

INGEBRITSEN S. E., SANFORD W. E., NEUZIL C. E. (2006) Groundwater in geologic processes. 2nd Edition, Cambridge University Press, New York, NY, United States (USA).

INGERSOLL R. V. (1988) Tectonics of the sedimentary basins. Geological Society of America Bulletin, 100, p. 1704-1719.

INTERA (1984) First status report on regional groundwater flow modeling for the Palo Duro Basin, Texas. Tech. Rept ONWI-504.

JONES G. D., SMART P. L., WHITAKER F. F., ROSTRON B. J., MACHEL H. G. (2003) Numerical modeling of reflux dolomitization in the Grosmont platform complex (Upper Devonian), Western Canada Sedimentary Basin. AAPG Bulletin, Vol.87, No.8, pp.1273-1298.

JONES R. W. (1980) Some mass balance and geological constraints on migration mechanisms. Problems of petroleum migration. AAPG Studies in Geology, Nr. 10, pp. 47-68.

JORDAN H., WEDER H.-J. (1995) Hydrogeologie – Grundlagen und Methoden. 2. Auflage, Enke-Verlag, Stuttgart.

KAISER C. (2003) Temporal data models for GIS in geology. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.

KARRENBURG H. (1974) Über neuere hydrogeologische Forschungsarbeiten im Aufgabenbereich des geologischen Landesamtes Nordrhein-Westfalen. Fortschritt Geol. Rheinl. und Westfalen 20, Krefeld, pp. 355-370.

KASZUBA J. P., Janecky D R., SNOW M. G.(2005) Experimental evaluation of mixed fluid reactions between supercritical carbon dioxide and NaCl brine; relevance to the integrity of a geologic carbon repository. Chemical Geology, Vol. 217, No.3-4, pp.277-293.

KATER M. (1999) GOCAD-3D-gestützte Bilanzierung und Interpretation der hydrologischen Situation im ehemaligen Steinkohlenrevier Zwickau. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.

KAULFUß H. (1994) Mündliche Mitteilungen. In: in STORCH et al. (1996) Datenerfassung und Auswertung von Mineral- und Thermalwässern in Sachsen. Abschlußbericht. Bericht (unveröff.), Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH Bad Lauchstädt und Hydro-Geo-Consult GmbH Freiberg, Freiberg.

KAULFUß H., MÜLLER F. A. (1996) Der Zwickauer Steinkohlenbergbau und seine Wasserprobleme. Arbeitskreis Steinkohle, Zwickauer Heimatjournal 4, 1996, 3, S.16-19, Zwickau.

KESTIN J., KHALIFA H. E., CORREIA R. J. (1981) Tables of the dynamic and kinematic viscosity of aqueous NaCl solutions in the temperature range 20-150 °C and the pressure range 0,1-35 MPa. J. Phys. Chem. Ref. Data 10(1), pp. 71-87.

KHARAKA Y. K., COLE D. R., HOVORKA S. D., GUNTER W. D., KNAUSS K. G., FREIFELD B. M. (2006) Gas-water-rock interactions in Frio Formation following CO₂ injection; implications for the storage of greenhouse gases in sedimentary basins. Geology (Boulder), Vol.34, No.7, pp.577-580.

KIRSCHKE S. (2004) 3D structural modeling of the geology in vicinity of Erkelenz / Venloer Scholle. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.

- KLEMM C., RIESE U. (1992) Laboruntersuchungen zur Quantifizierung des Sorptionsvermögens eines ausgewählten Porphyrtuffes. Studienarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- KLITZSCH E. (1971) The structural development of parts of North Africa since Cambrian time. In: GRAY C. (Ed.) Symposium on the Geology of Libya, Faculty of Science, University of Libya, pp. 253-262.
- KOLITSCH S. (1999) Angebot an das LfUG Sachsen zum Thema: Untersuchungen zur hydraulischen Wirksamkeit entlang herzynischer Störungszonen der Vorerzgebirgssenke im Bereich Wildenfels – Zwickau – Helmsdorf – Crimmitschau unter Nutzung von Isotopensignaturen, am Beispiel der Oberhohndorfer Hauptverwerfung und ihrer Querstörungen. Bericht (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- KOLITSCH S. (2001) Hydrogeologische Analyse und Grundwasserneubildung in der Vorerzgebirgssenke unter besonderer Berücksichtigung hydraulisch wirksamer Störungszonen.- Hydrogeological analysis and groundwater recharge in the Vorerzgebirge basin and the influence of hydraulically active fault zones. Wissenschaftliche Mitteilungen 16, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, S. 205-220.
- KOLITSCH S. (2002) FORTRAN 77
- KOLITSCH S., GÖTTELMANN U., MERKEL B. (2000) Hydrogeologische Analyse der Vorerzgebirgssenke. FuE Projekt i. A. des Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie Freiberg. Bericht (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- KOLITSCH S., JUNGHANS M., KLEMM W. (2003) Die Auswirkungen des Hochwasserereignisses 2002 auf die Grubenwässer des Freiburger Raumes. The effects of the 2002 flood event on mine water in the Freiberg region. Wasser & Boden, Blackwell Verlag.
- KOLITSCH S., JUNGHANS M., KLEMM W., DEGNER T., SCHEEL M. (2005) Hydro-chemical monitoring, depth profile measurements and hydraulics in partly flooded underground workings of the central polymetallic vein deposit of Freiberg/Germany. Zeitung für geologische Wissenschaften 33 (2005) 1, Gesellschaft für Geowissenschaften, Berlin, S. 51-80.
- KÖNIG von H. (1963) Ueber die Löslichkeit der Edelgase in Meerwasser. Z. Naturforsch. 18a, pp. 363-367.
- KOOI H., GARAVITO A. M., BADER S. Numerical modelling of chemical osmosis and ultrafiltration across clay formations (2003) Journal of Geochemical Exploration, Vol.78-79, No.2003, pp.333-336.
- KOSTELECKY J., ZEMAN A. (2002) Comparison of the ITRF2000 and ITRF96 Space Displacements of the Stations for Europe. Department of Advanced Geodesy, Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography (VUGTK), Praha.
- KRAFT W., SCHRÄBER D. (1981) KdT-Empfehlungen zur Ermittlung der Grundwasserneubildung. In: BAMBERG, H. F. et al., ZGI Berlin, WTI Sonderheft 5/81.
- KRÄMER, C. (2000). Hydrogeologisches Modell Zeisigwald. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- KRAUSE (2003) Mündliche und schriftliche Mitteilungen und digitale Daten. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Abteilung Oberflächenwasser, Dresden.
- KRONER U. (1995) Postkollisionale Extension am Nordrand der Böhmisches Masse. Die Exhumierung des Sächsischen Granulitgebirges. Freiburger Forschungshefte, C 457, p. 1-114.
- KRONER U., HAHN T. (2004) Sedimentation, Deformation und Metamorphose im Saxothuringikum während der variszischen Orogenese: Die komplexe Entwicklung von Nord-Gondwana während kontinentaler Subduktion und schiefer Kollision. In: Ulf Linnermann (Editor) Das Saxothuringikum - Abriss der präkambrischen und paläozoischen Geologie von Sachsen und Thüringen. Unveränderter Sonderdruck der GEOLOGICA SAXONICA, Vol. 48/49, S. 133-146.
- KUHN (2003) Mündliche und schriftliche Mitteilungen und digitale Daten. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Abteilung Oberflächenwasser, Dresden.

- KURZ J., JAHR T., JENTZSCH G. (2003) Geodynamic modelling of the recent stress and strain field in the Vogtland swarm earthquake area using the finite-elementmethod. *Journal of Geodynamics* 35, S. 247–258.
- KURZ J., JAHR T., JENTZSCH G. (2004) Pore pressure induced stress accumulation and the connection to pore pressure diffusion in swarm earthquake areas. *Pure and Applied Geophysics*.
- KURZE M. (1966) Die tektonisch-fazielle Entwicklung im Nordostteil des Zentralsächsischen Lineaments. VEB Deutscher Verlag Grundstoffindustrie. Freiburger Forschungshefte, C 201, p. 1-89, Leipzig.
- KYLE J. R., POSEY H. H., FISHER R. S. (1987) Sulfide mineralization in Permian strata of the Palo Duro Basin, Texas. *Soc. Econ. Paleon. Mineral. Mid-Year Mtg. Absts.*
- KYSER K., HIATT E. E. (2003) Fluids in sedimentary basins; an introduction. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol.80, No.2-3, pp.139-149.
- KYSER T. K. (2004) Depositional components as sources of metals in sedimentary basins; the Proterozoic example. *Abstracts with Programs - Geological Society of America*, Vol.36, No.5, pp.200.
- LAMPE C., PERSON M. A. (2003) Maturity anomalies; some Numerical models to constrain the effects of hydrothermal fluid flow on the temperature history of a sedimentary rift basin; Upper Rhine Graben, Germany. *Abstracts with Programs - Geological Society of America*, Vol.35, No.6, pp.195.
- LAND L. S. (1997) Mass transfer during burial diagenesis in the Gulf of Mexico. In: *Basin-wide diagenetic patterns: Integrated petrologic, geochemical, and hydrologic considerations*. SEPM Special Publication No. 57, pp. 29-39.
- LANGE T. (1998) Ein GOCAD 3-D Modell des tektonostratigraphischen Baues im Steinkohlenrevier Zwickau als Grundlage für die Ermittlung von Bergbaufolgeschäden. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- LAU J. E., COMMANDER D. P., JACOBSON G. (1987) Hydrogeology of Australia. Bureau of Mineral Resources, Australia, Bulletin No. 227.
- LAUSCH C. (2006, 2007) Grundwasserbeschaffenhheitsdaten Bereich Vorerzgebirgssenne und Umland. Auszug Datenbank Landesmessnetz, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Abteilung Oberflächenwasser, Dresden.
- LAVASTRE V., JENDRZEJEWSKI N., AGRINIER P., JAVOY M., EVRARD M. (2005) Chlorine transfer out of a very low permeability clay sequence (Paris Basin, France). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.69, no.21, pp.4949-4961.
- LFUG (1995) Umweltgeologische Komplexanalyse der Auswirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus in der Region Zwickau-Oelsnitz/Erzgeb. Projektstudie, Bericht (unveröff.), Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.
- LFUG (1996) Komplexuntersuchung zu Auswirkungen des ehemaligen Steinkohlenbergbaus im Raum Oelsnitz-Zwickau. Abschlußbericht zur Phase 1, Bericht (unveröff.), Sächsisches Oberbergamt, Freiberg.
- LFUG (2000) Erdbebenbeobachtung im Freistaat Sachsen, Zweijahresbericht 1998-1999. Materialien zur Geologie, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LFUG (2002) Erdbebenbeobachtung im Freistaat Sachsen, Zweijahresbericht 2000-2001. Materialien zur Geologie, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LFUG (2002b) Grundwassersituation in Sachsen 1996 – 2000. Materialien zur Wasserwirtschaft, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LFUG (2003) Einfluß des August Hochwassers 2002 auf das Grundwasser. Materialien zur Wasserwirtschaft, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LFUG (2004) Erdbebenbeobachtung im Freistaat Sachsen, Zweijahresbericht 2002-2003. Materialien zur Geologie, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.

- LFUG (2006) Ursache, Ausdehnung und Entwässerungsmechanismus der Grundwasserdepressionen im Bereich der Stadt Zwickau; Schlußfolgerungen (Arbeitstitel nach KOLITSCH). interne Arbeitsmaterialien/Studien zum Bericht (unveröff.), Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.
- LIEBE P. (1985) In: ERDÉLYI M. (1985) Geothermics and the deep Flow-system of the Hungarian Basin. *J. of Geodynamics* 4, pp. 321-330.
- LIEDTKE H. (1981) Die nordischen Vereisungen in Mitteleuropa. *Forsch. dt. Landeskd.*, 204.
- LIN H.-C. J., RICHARDS D. R., TALBOT C. A., YEH G.-T., CHENG J.-R., CHENG H.-P., JONES N. L. (1997-2003) FEMWATER. A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media. Version 3.0. Technical Report, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES), Coastal and Hydraulics Laboratory (CHL), 1997, last updated 2003, USA.
- LLOYED J. W., HARKER D., BAXENDALE R. A. (1981) Recharge mechanisms and groundwater flow in the Chalk and drift deposits of southern East Anglia. *Q. J. eng. Geol.* 14, pp. 87-96.
- LOTT G. K., SOBEY R. A., WARRINGTON G., WHITTAKER A. (1982) The Mercia Mudstone Group (Triassic) in the western Wessex Basin. *Proc. Ussher Soc.* 5, pp. 340-346.
- LUKIN A. Y. (2005) Deep hydrogeologic inversion as a global synergistic phenomenon; theoretical and applied aspects; Paper 2, Tectonic and geodynamic aspects of deep hydrogeologic inversion. *Geologichnyy Zhurnal = Geological Journal*, No.1, pp.50-67, Kiev, Ukraine.
- LUSCZYNSKI N. J. (1961) Head and flow of ground water of variable density. *J. Geophys. Res.* 66(12), pp. 4247-4255.
- LVA (1996). Verzeichnis der Karten und Digitalen Daten. Broschüre, Landesvermessungsamt Sachsen, S. 48, Dresden.
- LVA (1999) Digitales Geländemodell DGM_500 und Digitales Höhenmodell DHM_M745. Digitale Daten, Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden.
- MACHEL H. G., CAVEL P. A. (1999) Low-flux, tectonically induced squeegee fluid flow (hot flash) into the Rocky Mountain Foreland Basin. *Bull. Can. Petrol. Geol.* 47, pp. 510-533.
- MACHEL H. G., CAVELL P. A., BUSCHKUEHLE B. E., MICHAEL K. (2000) Tectonically induced fluid flow in Devonian carbonate aquifers of the Western Canada Sedimentary Basin. *J. of Geochem. Expl.* 69-70, pp. 213-217.
- MACHEL J. E., CAVELL P. A., PATEY K. S. (1996) Isotopic evidence for carbonate cementation and recrystallization, and for tectonic expulsion of fluids into the Western Canada Sedimentary Basin. *Geol. Soc. Am. Bull.* 108, pp. 1108-1119.
- MACUMBER P. G. (1984) The implications of Northern Victorian regional hydrogeology for salinity control. In: *Salinity Control in Northern Victoria*. Dwyer Leslie Pty Ltd., A1-A36.
- MACUMBER P. G. (1986) Re-Adjustment in Regional Groundwater Equilibria, Southern Murray Basin, S. E. Australia. *Berliner geowiss. Abh.* A 72, pp. 26-42.
- MAGRI F., BAYER U., CLAUSNITZER V., JAHNKE C., DIERSCH H. J., FUHRMANN J., MOELLER P., PEKDEGER A., TESMER M., VOIGT H. (2005) Deep reaching fluid flow close to convective instability in the NE German Basin; results from water chemistry and Numerical modelling. *Tectonophysics*, Vol.397, No.1-2, pp.5-20.
- MANHEIM F. T. (1970) Critique of membrane-filtration concepts as applied to the origin of subsurface brines. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 54, Nr. 5, pp. 878.

- MATHER J. D., GRAY D. A., ALLEN R. A., SMITH D. B. (1973) Groundwater recharge in the Lower Greensand of the London Basin – results from tritium and carbon-14 determinations. *Q. J. eng. Geol.* 6, pp. 141-152.
- MATTHES G. (1994) Die Beschaffenheit des Grundwassers. Band 2, 3. Auflage, Gebr. Bornträger, Berlin.
- MATYAS J., MATTER A. (1997) Diagenetic indicators of meteoric flow in the Pannonian Basin, southeast Hungary. In: Basin-wide diagenetic patterns: Integrated petrologic, geochemical, and hydrologic considerations. SEPM Special Publication No. 57, pp. 281-296.
- MAZOR E. (1972) Paleotemperatures and other hydrological parameters deduced from noble gases dissolved in groundwaters: Jordan Rift Valley, Israel. *Geochim. Cosmochim. Acta* 36, pp. 1321-1336.
- MAZOR E. (1979) Noble gases in a section across the vapor dominated geothermal field in Larderello, Italy. *Pure appl. Geophys.* 117, pp. 262-275.
- MAZOR E., BOSCH A. (1987) Noble gases in formation fluids from deep sedimentary basins: a review. *Applied Geochemistry* 2, pp. 621-627.
- MAZOR E., BOSCH A. (1991) Dynamics of groundwater in deep basins: He-4 dating hydraulic discontinuities and rates of drainage. *Australian Water Resources Council Conference Series* 20, pp. 380-389.
- MAZOR E., KHARAKA Y. K. (1981) Atmospheric and radiogenic noble gases in geopressured-geothermal fluids: Northern Gulf of Mexico Basin. *Proc. Fifth Conf. Geopressured-Geothermal Energy*, Louisiana, 1981, pp. 197-200.
- MAZOR E., TRUESDELL A. H. (1984) Dynamics of a geothermal field traced by noble gases: Cerro Prieto, Mexico. *Geothermics* 13, pp. 91-102.
- MC PHERSON B. J., GARVEN G. (1996) Overpressures in the Sacramento basin, California: testing the tectonic wise hypothesis [abs.]. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 77, p. 227.
- MCINTOSH J. C. (2004) Impact of Pleistocene glaciation on Midcontinent sedimentary basin fluids; reorganization of salinity structure and generation of microbial gas. Thesis or dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, MI, United States (USA).
- McINTOSH J. C., WALTER L. M. (2004) Hydrogeochemical constraints on Pleistocene glacial meltwater invasion into Midcontinent, U.S. regional aquifer systems; impact on salinity structure and generation of microbial gas. *Abstracts with Programs - Geological Society of America*, Vol.36, No.5, pp.86.
- McINTOSH J. C., WALTER L. M., MARTINI A. M. (2002) Pleistocene recharge to mid-continent basins: Effects on salinity structure and microbial gas generation. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, vol.66, pp.1681–1700.
- MCNUTT B. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. *Geology (Boulder)* 16, nr. 6, pp. 560-561.
- McNutt R. H., FRAPE S. K., DOLLAR P. (1987) The strontium, oxygen and hydrogen isotopic composition of brines, Michigan and Appalachian basins, U.S.A. *Appl. Geochem.* 2, pp. 495-505.
- MEANS J. L. und HUBBARD N. J. (1987) Short-chain aliphatic acid anions in deep subsurface brines: a review of their origin, occurrence, properties, and importance and new data on their distribution and geochemical implications in the Palo Duro Basin, Texas. *Org. Geochem.* 11, pp. 177-191.
- MEENTS W. F., BELL, A. H., REES O. W., TILBURY W. G. (1952) Illinois oil-field brines, their geological occurrence and chemical composition. *Illinois State Geol. Surv., Illinois Petroleum* 66.
- MELZER P. (2005) GIS-based geodata management für the central Saxothuringian region. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- MICHAEL K., BACHU S. (2001) Fluids and pressure distributions in the foreland-basin succession in the west-central part of the Alberta basin, Canada: evidence for permeability barriers and hydrocarbon generation and migration. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.* 85, pp. 1231-1252.

- MICHAEL K., BACHU S. (2004) Evaluation of acid gas migration in deep saline aquifers in the Alberta Basin; an analogue for CO₂ sequestration in continental sedimentary basins. *Reservoir*, Vol.31, No.10, pp.15.
- MICHEL G. (1963) Untersuchungen über die Tiefenlage der Grenze Süsswasser-Salzwasser im nördl. Rheinland und anschliessenden Teilen Westfalens, zugleich ein Beitrag zur Hydrogeologie und Chemie des tiefen Grundwassers. *Forsch.-Ber. Land NW*, 1239, Köln/Opladen.
- MICHEL G. (1963) Untersuchungen über die Tiefenlage der Grenze Süsswasser-Salzwasser im nördlichen Rheinland und anschliessenden Teilen Westfalens, zugleich ein Beitrag zur Hydrogeologie und Chemie des tiefen Grundwassers. *Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen* 1239, 123 p.
- MICHEL G. (1983) Die Sole des Münsterländer Kreide-Beckens. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.* 166, Stuttgart, pp. 139-159.
- MICHEL G., STRUCKMEIER W. (1985) The cretaceous basin of Münster – a general groundwater system in response to multiple impacts (water supply, spas, deep mining). In: *Hydrology in the Service of Man, Memoires of the 18th Congress of the IAH*, Cambridge, pp. 150-159.
- MING-KUO LEE (1997) Predicting diagenetic effects of groundwater flow in sedimentary basins: A modeling approach with examples. In: *Basin-wide diagenetic patterns: Integrated petrologic, geochemical, and hydrologic considerations*. SEPM Special Publication No. 57, pp. 3-14.
- MÖCKEL F. (1998, 2007) Mündliche Mitteilungen. Wismut GmbH, Chemnitz.
- MOREL E. H. (1979) A numerical model of the Chalk aquifer in the Upper Thames Basin. *Tech. Note* 35, Central Water Planning Unit, Reading, Bers.
- MORSE J. W., HANOR J. S., HE S. (1997) Role of basinal waters in carbonate mass transport. In: *Basin-wide diagenetic patterns: Integrated petrologic, geochemical, and hydrologic considerations*. SEPM Special Publication No. 57, pp. 41-50.
- MOSSOP G. und SHETSEN I. (1994) *Geological Atlas of the Western Canada sedimentary Basin*.
- MÜLLER B. (1994) Zusammenfassende Darstellung und Interpretation der am Standort Crossen durchgeführten hydrogeologischen Testarbeiten. Bericht (unveröff.), Hydro-Geo-Consult GmbH, Freiberg.
- MÜLLER E. R. (1969) Zur Geochemie der Tiefenwässer und der organischen Substanz im Nordteil der DDR. *Zeitschrift für angewandte Geologie* 3, 113-124.
- MUMM A. S., WOLFGRAMM M. (2000) Spatial correlation of fluid inclusion generations: reconstructing fluid flow during basin evolution. *Journal of Geochemical Exploration* 69–70, pp.397–402.
- MUMM A. S., WOLFGRAMM M. (2003) Stable isotope relationships of mineralisation in the North Eastern German Basin. *Journal of Geochemical Exploration* 78-79, pp.261-265.
- NEUZIL C. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. *Geology (Boulder)* 16, nr. 6, pp. 560-561.
- NEUZIL C. E. (1995) Abnormal pressures as hydrodynamic phenomena. *American J. of Science* 295, p. 742-786.
- NEWELL K. D., GOLDSTEIN R. H., BURDICK C. J. (2003) Diagenesis and late-stage porosity development in the Pennsylvanian Strawn Formation, Val Verde Basin, Texas, U.S.A. *Special Publication - Society for Sedimentary Geology*, Vol.78, pp.333-350.
- OANA s. (1957) Bestimmung des Argons im besonderen Hinblick auf gelöste Gase in natürlichen Wässern. *J. Earth Sci., Nagoya University* 5, pp. 103-124.
- OLIVER J. (1986) Fluids expelled tectonically from orogenic belts: their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena. *geology* 14, pp. 99-102.

OSBORNE M. J., SWARBRICK R. E. (1997) Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: A reevaluation. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 81, pp. 1023-1041.

OWEN M., ROBINSON V. K. (1978) Characteristics and yield of the fissured Chalk. In: *Thames Groundwater Scheme*, Institution of Civil Engineers, London.

PÄLCHEN W., GEIßLER E. (2005) Tätigkeitsbericht des Bereiches Boden und Geologie/Geologischer Dienst des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie für den Zeitraum 1997-2003. In: *GEOPROFIL 12* (2005), S. 109-141, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.

PARKHURST D. L., THORSTENSON D. C., PLUMMER L. N. (1980) PHREEQE – a computer program for geochemical calculations. *U.S. geol. Surv. Water-Res. Invest.* 80-96

PARKS E. M. (1924) Migration of oil and water, a further discussion. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 8, Nr. 6, pp. 697-715.

PAUL M., BRÜCKNER B. (1998a) Exkursionsführer zum Uranbergwerk Ronneburg und zum Aufbereitungsstandort Crossen/Helmsdorf. Bericht (unveröff.), Wismut GmbH, Chemnitz.

PAUL M. (1998b) Hydrogeologische Aspekte der Erkundung und Bewertung des Altlastenstandortes Dänkriz/Lauenhain. *TU Bergakademie Freiberg, Uranium Mining Proceedings*, S. 401-410.

PAUL M. (1998c) Mündliche Mitteilungen. Wismut GmbH, Chemnitz.

PERRY E., HOWER J. (1972) Late-stage dehydration in deeply buried pelitic sediments. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 56, Nr. 10, pp. 2013-2020.

PERRY E., HOWER J. (1972). Late-stage dehydration in deeply buried pelitic sediments. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 56(10), pp. 2013-2020.

PERSON M., RAFFENSPERGER J. P., GE S., GARVEN G. (1996) Basin-scale hydrogeologic modeling. *Review of Geophysics* 34, pp. 61-87.

PETTIJOHN M., POTTER P. E., SIEVER R. (1972) *Sand and sandstone*. Springer Verlag, New York, 600 p.

PFEIFFER J. (2003) A geological 3D model of the Ruby Hill Prospect, Eureka, Nevada, USA, using Gocad. Diplomkartierung (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.

PIELOW (1994) In: STUMM A. (1999) Origin of the high concentration of Chloride in the mineral waters in the region "Vogtland". Schriftliche und mündliche Mitteilungen zur Dissertationsarbeit, TU Bergakademie Freiberg.

PIETZSCH (1962) *Geologie von Sachsen*. VEB Verlag der Wissenschaften, Berlin.

PIOTROWSKI J. A. (1997) Subglacial groundwater flow during the last glaciation in Northwestern Germany. *Sedimentary Geology*, vol.111, pp.217–224.

PLOBNER M. (1998) Steinkohlenbergbau Oelsnitz (Erzgeb.), Reviernivellement 1997, Bericht (unveröff.), Oelsnitz.

PLUNTKE (2003) Mündliche und schriftliche Mitteilungen und digitale Daten zu Oberflächengewässern in Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.

RAFFENSPERGER J. P. (1997) Evidence and modeling of large-scale groundwater convection in precambrian sedimentary basins. In: *Basin-wide diagenetic patterns: Integrated petrologic, geochemical, and hydrologic considerations*. SEPM Special Publication No. 57, pp. 15-26.

RAMSEYER K., BOLES J. R. (1986) Mixed-layer illite(smectite) minerals in tertiary sandstones and shales, San Joaquin basin, California. *Clays and Clay Minerals* 34, pp. 115-124.

RANGANATHAN V. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. *Geology (Boulder)* 16, nr. 6, pp. 560-561.

- RANGANATHAN V. (1993) The maintenance of high salt concentrations in interstitial waters above the New Albany Shale of the Illinois basin. *Water Resources Research* 29, pp. 3659-3670.
- REINL C. (2000) Hydrothermale Alteration des Deckgebirges (Rotliegendes und Buntsandstein) im Offenburger Trog, Schwarzwald. Dissertation.
- RENNER A. (1998) GOCAD 3D Modellierung des tektonostratigraphischen Baus von Karbon und Rotliegendem im Untergrund von Zwickau als Grundlage für Bergbauschadensanalyse und Hydrogeologie. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- RENNER A. DIPLOMARBEIT
- RICHTER A. (1994) Detailuntersuchungen zur Grundwasserströmung und Grundwasserneubildung im Bereich der Deponie „Weißer Weg“ in Chemnitz. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- RICKARD D. T., WILLDÉN M. Y., MARINDER N. E., DONNELLY T.H. (1979) Studies on the genesis of the Laiswell sandstone lead-zinc deposit, Sweden. *Econ. Geol.* 74, pp. 1255-1285.
- RISACHER F., ALONSO H., SALAZAR C. (2003) The origin of brines and salts in Chilean salars; a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews*, Vol.63, No.3-4, pp. 249-293.
- ROBINS N. (1985) Persönliche Mitteilung. In: DOWNING R. A., EDMUNDS W. M., GALE I. N. (1987) Regional groundwater flow in sedimentary basins in the U.K. In: GOFF J. C., WILLIAMS B. P. J. (Eds.) *Fluid flow in sedimentary basins and aquifers*. *Geol. Soc. Spec. Publ. No. 34*, pp. 105-125.
- ROSTRON B. J., HOLMDEN C. (2003) Regional Variations in oxygen isotopic compositions in the Yeoman and Duperow Aquifers, Williston Basin (Canada-USA). *Journal of Geochemical Exploration*, Vol.78-79, No.2003, pp.337-341.
- ROWE A. M., CHOU J. C. S. (1970) Pressure-volume-temperature-concentration reaction of aqueous NaCl solutions. *J. Chem. Eng. Data* 15(1), pp. 61-66.
- RUDER J. (1998) Ein geologisch-bergbaugeschichtlicher Überblick über die ehemaligen Steinkohlenbergbaureviere von Zwickau und Lugau-Oelsnitz. *Bergbau* 8/98, S. 376-380.
- RUEHAACK W., RATH V., DEETJEN H., HOEHNE F., HARTMANN A., ZSCHOCKE A., SCHELLSCHMIDT R., CLAUSER C. (2004) Detection and quantification of deep groundwater flow using 3-D geothermal modelling. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, vol.45, no.1, Suppl., pp.354-358.
- SANDFORD K. S. (1935) Sources of water in the North-Western Sudan. *Geogr. J.* 85, pp. 412-431.
- SCHABROTH T. (1990) Zur Minerogenie von Beckenbildungen. Entwicklungsprozess und Lagerstätten. Habilitationsschrift, TU Bergakademie Freiberg.
- SCHENDEL A. (2005) Conception of a GIS for the Appalachian-Variscide-Uralide Orogen. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- SCHLIMM W. (1996) Hydrogeologische Karten in Nordrhein-Westfalen – Ein Beitrag zur Daseinsvorsorge. *Geologisches Jahrbuch*, Reihe A 144, S. 321-340, Hannover 1996.
- SCHMIDT, WALTER (1990) Undifferenziertes Zitat in: WALTER R. (1992) *Geologie von Mitteleuropa*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart.
- SCHNEIDER J. (1999b) Schriftliche Mitteilung an den Verfasser. TU Bergakademie Freiberg.
- SCHNEIDER J. (2006) Schriftliche Mitteilung an den Verfasser. TU Bergakademie Freiberg.
- SCHNEIDER J. (Ed.) (1999) Unveröff. Teilbericht zur Komplexuntersuchung zu den Auswirkungen des Steinkohlenbergbaus Zwickau-Oelsnitz, Phase 2. TU Bergakademie Freiberg.
- SCHNEIDER J. W., RÖBLER R. (1995) Permische Calcisol-Paläoböden mit Rhizolithen und Wirbeltierresten. Sedimentation, Lebewelt und Klimaentwicklung im Rotliegend der Härtensdorf-Formation (Erzgebirge Becken). Veröffentlichung des Museum für Naturkunde Chemnitz, Heft 18, pp. 53-70, Chemnitz.

- SCHNEIDER J. W., RÖßLER R. (1995) Permische Calcisol-Paläoböden mit Rhizolithen und Wirbeltierresten. Sedimentation, Lebewelt und Klimaentwicklung im Rotliegend der Härtensdorf-Formation (Erzgebirge Becken). Veröffentlichung des Museum für Naturkunde Chemnitz, Heft 18, S. 53-70, Chemnitz.
- SCHNEIDER J., JUNGHANNS M., STEINBORN (2001) Bohrkerndokumentation und geologische Auswertung der Bohrung GwM 1/200 in Zwickau-Schedewitz. Bericht (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- SCHNEIDER J., LANGE T., GAITZSCH B. (1996) Studie zur Datenerfassung und Visualisierung des in Bergbaurissen des Zwickau-Oelsnitzer Revieres enthaltenen Bruchtektonischen Inventars. Bericht (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- SCHOLLE P. A., SCHLUGER P. R. (1979) Aspects of diagenesis. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 26, 443 p.
- SCHRÄBER D. (1968) Zur Kenntnis der Sole im Zwickau-Oelsnitzer Steinkohlenrevier. Zeitschrift für Angewandte Geologie, Bd. 14 (1968), H. 8, S. 431-439, Berlin.
- SCHRÄBER D. (1979)
- SCHRÄBER D. (1983) Ergebnisbericht mit Grundwasservorratsnachweis, VE Meerane. Bericht (unveröff.), VEB GFE Freiberg.
- SCHUBERT H. (2006) Stand hydrogeologischer Untersuchungen und Meßnetze in den bergbaulich beeinflussten Gebieten Zwickau und Oelsnitz. Mündl. und schriftl. Mitteilungen, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.
- SCHULTZ J. L., BOLES J. R., TILTON G. R. (1989) Tracking calcium in the San Joaquin basin, California : A strontium isotopic study of carbonate cements at North Coles Levee. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53, pp. 1991-1999.
- SCHWARTZ F. W., LONGSTAFFE F. J. (1988) Ground water and clastic diagenesis. In: BACK W., ROSENSHEIN J. S., SEABER P. R. (Eds.) *Hydrogeology*, Geological Society of America, *Geology of North America O-2*, pp. 413-434.
- SENGER R. K. und FOGG G. E. (1987a) Regional underpressuring in deep brine aquifers, Palo Duro Basin, Texas: 1. Effects of hydrostratigraphy and topography. *Water Resour. Res.*
- SENGER R. K., FOGG G. E., KREITLER C. W. (1987b) Regional underpressing in deep brine aquifers, Palo Duro Basin, Texas: 2. The effect of Cenozoic basin development. *Water Resour. Res.*
- SHARP J. M. (1978) Energy and momentum transport model of the Quachita basin and its possible impact on formation of economic mineral deposits. *Economic Geology* 73, pp. 1057-1068.
- SHOUAKAR-STASH O., ROSTRON B. J., FRAPE S. K. (2003) Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine isotopes of the Williston Basin, Canada. *Abstracts with Programs - Geological Society of America*, Vol.35, No.6, pp.574.
- SIBSON R. H., MOORE J. M., RANKIN A. H. (1975) Seismic pumping-ahydrothermal fluid transport mechanism. *Journal of the Geological Society of London* 131, pp. 653-659.
- SIEGEL D. I. (1991) Evidence for dilution of deep, confined groundwater by vertical recharge of isotopically heavy Pleistocene water. *Geology*, vol.19, pp.433-436.
- SIEGERT T. (1882) Erläuterungen zur geologischen Specialkarte des Königreich Sachsen. Section Stollberg-Lugau, Bl. 113, Leipzig.
- SIEGERT T. (1901) Erläuterungen zur geologischen Specialkarte des Königreich Sachsen. Section Zwickau-Werdau, Bl. 111, 2. Aufl., 142 S., Leipzig.
- SKALBECK J. D., KARLIN R. E., SHEVENELL L., WIDMER M. C. (2005) Gravity and aeromagnetic modeling of alluvial basins in the southern Truckee Meadows adjacent to the Steamboat Hills geothermal area, Washoe County, Nevada. *Geophysics*, Vol.70, No.3, pp.B1-B9.
- SLEEP N. H., NUNN J. A., CHOU L. (1980) Platform basins. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 8, pp. 17-34.

- SMAN H. T. (1985) Een regional gehydrologisch modelonderzoek van de Centrale Slenk van Noord-Brabant. Rapport 840438003, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene, Leidschedam.
- SMITH D. A., AHKTER S., KREITLER C. W. (1985) Ground-water hydraulics of the Deep-Basin Brine aquifer system, Palo Duro Basin, Texas Panhandle. The University of Texas at Austin, Bur. Econ. Geol. Open-File Rept OF-WTWI-1985-16.
- SMITH I. F., BURGESS W. G. (1984) The Permo-Triassic rocks of the Worcester Basin. Investigation of the Geothermal Potential of the U.K., British Geological Survey.
- SMITH S. P., KENNEDY B. M. (1985) Noble gas evidence for two fluids in the Baca (Valles Caldera) geothermal reservoir. *Geochim. Cosmochim. Acta* 49, pp. 893-902.
- SMU (1995) Handbuch der Altlastenbehandlung, Teil 3 Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Grundwasser. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung, Dresden.
- SPERLICH O., WÜNSCH R., SCHNEIDER J. (1999) Bohrkernaufnahmen der Mülsen-Formation/Oberrotliegend II, IAA Helmsdorf/Crossen. Bericht (unveröff.) an die WISMUT GmbH, TU Bergakademie Freiberg.
- SPOTTKE I. (2001) 3d modeling of horst- and graben structures in the Tafeljura region/ Switzerland. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- SQUIRRELL H. C., DOWNING R. A. (1969) Geology of the South Wales Coalfield, 1, The Country around Newport (Mon). *Mem. geol. Surv. GB*, HMSO, London.
- STEINKOHLN-A-V (1912) Erzgebirgischer Steinkohlen-Aktien-Verein in Schedewitz. Zur Frage des Kohlenabbaues unter der Stadt Zwickau, Denkschrift, Zwickau.
- STORCH A. (2001). Numerisches Modell der Bockwaer Senke. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.
- STORCH K. v., JORDAN H. P., GLÄSSER W., ABRAHAM T., GRIMM R., MÜLLER B. (1996) Datenerfassung und Auswertung von Mineral- und Thermalwässern in Sachsen. Abschlußbericht (unveröff.) i. A. des Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH Bad Lauchstädt und Hydro-Geo-Consult GmbH Freiberg, Freiberg.
- STORCH K. v., JORDAN H. P., GLÄSSER W., ABRAHAM T., GRIMM R., MÜLLER B. (2000) Datenerfassung und Auswertung von Mineral- und Thermalwässern in Sachsen. In: GEOPROFIL 9 (2000), S. 1-263, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH Bad Lauchstädt und Hydro-Geo-Consult GmbH Freiberg, Freiberg.
- STUEBER A. M., PUSHKAR P., HETHERINGTON E. A. (1984) A strontium isotopic study of Smackover brines and associated solids, southern Arkansas. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48, pp. 1637-1649.
- STUEBER A. M., PUSHKAR P., HETHERINGTON E. A. (1987) A strontium isotopic study of formation waters from the Illinois basin, U.S.A. *Applied Geochemistry* 2, pp. 477-494.
- STUMM A. (1999) Origin of the high concentration of Chloride in the mineral waters in the region "Vogtland". Schriftliche und mündliche Mitteilungen zur Dissertationsarbeit, TU Bergakademie Freiberg.
- STUTZER O. (1935) Überblick über den geologischen Aufbau des erzgebirgischen Steinkohlenbeckens. In: May W. (1936) 75 Jahre Gemeinschaftsarbeit der Sächsischen Steinkohlenbergwerke. Festschrift Zwickau 1860-1935, Förster und Borries, Zwickau.
- SURDAM R. C., DUNN T. L., HEASLER H. P., MACGOWAN D. B. (1989) Porosity evolution in sandstone/shale systems. In: HUTCHEON I. (Ed.) Short course notes in burial diagenesis. Mineralogical Assoc. of Canada, Toronto, pp. 61-134.
- SZYMCZAK P. (2000) Mitteilung an das Landesamt für Umwelt und Geologie, Herrn Hübschmann, Freiberg.

- T&P (1994) Isotopenstudie Crossen. 2. Bericht, Untersuchungsergebnisse und Interpretation (unveröff.), Trischler und Partner Consult GmbH 04/1994, Gutachten i. A. der Wismut GmbH.
- T&P (1995) Hydrogeologische Untersuchung unter Nutzung spezieller Indikatoren für die Standorte Culmitzsch/Trünzig und Crossen. Bestimmung von Migrationsparametern durch Untersuchung von stabilen Isotopen an verschiedenen Standorten des Sanierungsbetriebs Seeligenstädt. 1.Bericht (Bestimmung von Migrationsparametern im Abstrom der IAA Dänkritz 1). Trischler und Partner Consult GmbH 12/1995, Bericht (unveröff.), Gutachten i. A. der Wismut GmbH.
- T&P (1997) Hydrogeologische Untersuchung unter Nutzung spezieller Indikatoren für die Standorte Culmitzsch/Trünzig und Crossen. Bestimmung von Migrationsparametern durch Untersuchung von stabilen Isotopen an verschiedenen Standorten des Sanierungsbetriebs Seeligenstädt, 3.Bericht, Abschlußbericht (unveröff.), Trischler und Partner Consult GmbH 02/1997, Gutachten i. A. der Wismut GmbH.
- TEICHERT K. (1995) Zur Geschichte des Zwickauer Steinkohlenbergbaus. Geschichtswerkstatt. In: Unbekannt. (lokale Publikation in Zwickau), Kontakt: Museum für Stadtgeschichte, Zwickau.
- THOMAS L. P., EVANS R. B., DOWNING R. A. (1983) The geothermal potential of the Devonian and Carboniferous rocks of South Wales. Investigation of the Geothermal Potential of the U.K., British Geological Survey.
- THORNTON M. M., WILSON A. M. (2004) The distribution of brines in a foreland basin east of the Rocky Mountains. Abstracts with Programs - Geological Society of America, vol.36, no.5, pp.563.
- TICKELL S. J., HUMPHRYS W. G. (1985) Groundwater resources and associated salinity problems of the Victorian part of the Riverine Plain. Vic. Geol. Surv. Publ. Rept., Office Min. & Energy.
- TK 25 (N) (1998) Topographische Karte Sachsen 1:25.000, Normalausgabe. Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden.
- TLUG (2006, 2007) Hydrogeologische und geologische Daten im Kartierungsmaßstab 1:200.000, Stamm- und Schichtdaten aus Aufschlussesdatenbanken sowie Angaben zur Lage der Zechstein- und Buntsandsteinbasis. Digitale Daten, Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Jena.
- TOP50 (1999) Amtliche Topographische Karten auf CD-ROM. Eine Serie der deutschen Landesvermessung. Maßstab 1:50.000 bis 1:200.000. Fa. Daimler Benz Aerospace und Fa. Dornier.
- TOTH J. (1962) A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta. J. Geophys. Res. 67, pp. 4375-4387.
- TOTH J. (1963) A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. J. Geophys. Res. 68(16), pp. 4795-4812.
- TÓTH J. (1978) Gravity-induced cross-formational flow of formation fluids, Red Earth region, Alberta Canada. Water Resources Research 14, pp. 805-843.
- TÓTH J. (1980) Cross-formational gravity-flow of groundwater: A mechanism of the transport and accumulation of petroleum (The generalized hydraulic theory of petroleum migration). Problems of Petroleum Migration, AAPG Studies in Geology No. 10, pp. 121-167.
- TOTH J. (2003) Fluid-potential patterns and hydrocarbon deposits in groundwater flow-fields induced by gravity and tectonic compression, Hungarian Great Plain, Pannonian Basin. Journal of Geochemical Exploration, vol.78-79, no.2003, pp.427-431.
- TOTH J., ALMFISI I. (2001). Interpretation of observed fluid potential patterns in a deep sedimentary basin under tectonic compression: Hungarian Great Plain, Pannonian Basin. Geofluids 1, pp. 11-36.
- TOWNER R. R., GIBSON P. L. (1983) Geology of the onshore Canning Basin, Western Australia. Bureau of Mineral Resources, Australia, Bulletin No. 215.
- TTK (1998) Topographische Karte Thüringen 1:25.000, Normalausgabe. Thüringer Landesvermessungsamt, Erfurt.

TUNGER B. (1991) Geologische Untersuchungsarbeiten als Grundlage für die Gefährdungsabschätzung der Kommunaldeponie „Weißer Weg“ in Chemnitz. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.

TURNER J. P., WILLIAMS G. A. (2004) Sedimentary basin inversion and intraplate shortening. *Earth-Science Reviews*, Vol.65, No.3-4, pp.277-304.

Van GENUCHTEN M. T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society Journal* 44, S. 892-898.

VAN ROOIJEN P., KLOSTERMANN P., DOPPERT J. W. C., RESCHER C. K., VERBEEK J. W., SLIGGERS B. C., GLASBERGEN P. (1984) Stratigraphy and tectonics in the Peel-Venlo area as indicated by Tertiary sediments in the Broekhuizenvorst and Gelderen T1 boreholes. *Mededelingen Rijks Geologische Dienst* 38-1, pp. 1-27.

VEB HYDROGEOLOGIE (1972) Hydrogeologischer Bericht Stangendorf (Zwischenbericht). Bericht (unveröff.), VEB Hydrogeologie Nordhausen, Freiberg.

VEB HYDROGEOLOGIE (1977) Hydrogeologisches Übersichtsgutachten Kreis Zwickau-Land. Bericht (unveröff.), VEB Hydrogeologie Nordhausen, Freiberg.

VEB HYDROGEOLOGIE (1978) Hydrogeologisches Übersichtsgutachten Kreis Karl-Marx-Stadt. Bericht (unveröff.), VEB Hydrogeologie Nordhausen, Freiberg.

VEB HYDROGEOLOGIE (1979) Hydrogeologisches Übersichtsgutachten Kreis Werdau. Bericht (unveröff.), VEB Hydrogeologie Nordhausen, Freiberg.

VEB HYDROGEOLOGIE (1980) Hydrogeologisches Übersichtsgutachten Kreis Glauchau, Teilgebiet Meerane. Bericht (unveröff.), VEB Hydrogeologie Nordhausen, Freiberg.

VEB HYDROGEOLOGIE (1981) Hydrogeologisches Übersichtsgutachten Kreis Glauchau, Teilgebiet Glauchau. Bericht (unveröff.), VEB Hydrogeologie Nordhausen, Freiberg.

VEB HYDROGEOLOGIE (1982a) Hydrogeologisches Übersichtsgutachten Kreis Stollberg. Bericht (unveröff.), VEB Hydrogeologie Nordhausen, Freiberg.

VEB HYDROGEOLOGIE (1982b) Hydrogeologisches Übersichtsgutachten Kreis Hohenstein-Ernstthal. Bericht (unveröff.), VEB Hydrogeologie Nordhausen, Freiberg.

VILLEGAS M. E., BACHU S., RAMON J. C., UNDERSCHULTZ J. R. (1995) Flow of formation waters in the Llanos basin, Colombia. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*

VOGEL B. (1992) Hydrogeologische Untersuchungen im Einzugsgebiet der Deponie „Weißer Weg“. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.

VOIGT (2004) Geophysikalische Untersuchungen an der Tiefbohrung Oelsnitz 1/2003. Bericht (unveröff.).

WAGENBRETH O., STEINER W. (1990) Geologische Streifzüge: Landschaft und Erdgeschichte zwischen Kap Arkona und Fichtelberg. Deutscher Verlag Grundstoffindustrie, 4. Aufl., Leipzig.

WALTER R. (1992) Geologie von Mitteleuropa. 5. Aufl., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart.

WALTER R. (1992) Geologie von Mitteleuropa. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart.

WALTHER (1999) Mündliche und schriftliche Mitteilungen und digitale Daten. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Abteilung Oberflächenwasser, Dresden.

WALTHER (2006) Hydrologische Daten Oberflächengewässer. Digitale Daten. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Abteilung Oberflächenwasser, Dresden.

- WAPPLER A. F. (1898) Über die Überschwemmung der Bockwaer und Oberhohndorfer Steinkohlenwerke durch die 1897er Muldenhochflut. Jahrbuch Berg- und Hüttenwesen in Sachsen, Jahrgang 1898.
- WASTERNAK J. (1958) Ergebnisse tektonischer Untersuchungen in der Phyllithülle des sächsischen Erzgebirges. Z. Geologie, 7, S. 484-493, Berlin.
- WASY (1998) Wasserhaushaltsuntersuchungen im Raum Zwickau-Oelsnitz. Abschlußbericht. Bericht (unveröff.), WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, Dresden.
- WATER RESOURCES BOARD (1972) The Hydrogeology of the London Basin. Water Resources Board, Reading, Berks.
- WATZNAUER (1965) Stratigraphie und Fazies des erzgebirgischen Kristallins im Rahmen des mitteldeutschen Varistikums. Geologische Rundschau, 54, S. 853-860.
- WEAVER T. R., FRAPE S. K., CHEERY J. A. (1995) Recent cross-formational fluid flow and mixing in the shallow Michigan Basin. Geological Society of America Bulletin, vol.107, pp.697-707.
- WEINLICH F. H., BRÄUER K., KÄMPF H., STRAUCH G., TESAR J., WEISE S. M. (1999) An active subcontinental mantle volatile system in the western Eger rift, Central Europe: Gas flux, isotopic (He, C, and N) and compositional fingerprints. Geochim. Cosmochim. Acta 63(21), S.3653-3671.
- WENDT J. (1999) Zur Geokinetik im sächsischen Vogtland. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 517, S.60 ff.
- WENDT S., TITTEL B., MITTAG R., FORKMANN B., BERGER H.-J. (1996) Seismologische Übersichtskarte des Freistaates Sachsen 1 : 400 000. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Bereich Boden und Geologie, Freiberg.
- WHITTAKER A. (1975) A postulated post-Hercynian rift valley system in southern Britain. Geol. Mag, 112, pp. 137-149. In: DUFF P. McL. D., SMITH A. J. (Eds.) (1992) Geology of England and Wales. The Geological Society, London, U.K.
- WIDMOSER P., RAPP P. (1996) Flußgebietsmodellierung mit dem N-A-Modell NASIM – Hinweise zur Eignung des Modells als Ergänzung zum hydrologischen Meßdienst. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie.
- WIEDE A. (1901) Die Wasserabdämmung beim Abteufen des Pöhlauer Schachtes der Gewerkschaft Morgenstern in Reinsdorf durch Versteinung der natürlichen Wasseradern. Jahrbuch Berg- und Hüttenwesen in Sachsen, Jahrgang 1901.
- WILLIAMSON R. J. (1983) A transient hydrological model of part of the Murray basin. Vic. Geol. Surv. Unpubl. Rept. 1983/36
- WILLMAN H. B., ATHERTON E., BUSCHBACH T. C., COLLINSON C., FRYE J. C., HOPKINS M. E., LINEBACK J. A., SIMON J. A. (1975) Handbook of Illinois stratigraphy. Illinois State Geol. Surv. Bull. 95.
- WILSON A. M., GRANT G., BOLES J. R. (1999) Paleohydrogeology of the San Joaquin basin, California. Geological Society of America Bulletin 111, no. 3, pp. 432-449.
- WIROJANAGUD P., KREITLER C. W., SMITH D. A. (1986) Numerical modeling of regional ground-water flow in the deep-brine aquifers of the Palo Duro Basin, Texas Panhandle. The University of Texas at Austin, Bur. Econ. Geol. Rept Invest. 159
- WITTENBURG R. (1997) Rezente tektonische Bewegungskomponenten an der Gera-Jáchymov-Zone. Exkursionsführer und Veröffentlichung, GGW 199, Berlin.
- WITTENBURG R. (2005) Spitzenleistungen der Triangulationsära durch die GPS-Brille. Neotektonik in Sachsen ?, Bericht (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- WOLFGRAMM M., SEIBT A., HURTER S., ZIMMERMANN G. (2003) Origin of geothermal fluids of Permo-Carboniferous rocks in the NE German Basin (NE Germany). Journal of Geochemical Exploration, Vol.78-79, No.2003, pp.127-131.

WOOD J. (1988) In: HANOR J. S., KHARAKA Y. K., LAND L. S. (1988) Penrose Conference report: Geochemistry of waters in deep sedimentary basins. *Geology (Boulder)* 16, nr. 6, pp. 560-561.

WOOD J. R., HEWITT T. A. (1984) Reservoir diagenesis and convective fluid flow. *AAPG Memoir* 37, pp. 99-110.

WRIGHT E. P (1986) Review of the Hydrogeology of the Kufra Basin, North Africa. *Berliner geowiss. Abh. (A)* 72, pp. 76-86.

WRIGHT E. P., BENFIELD A. C., EDMUNDS W. M., KITCHING R. (1982) Hydrogeology of the Kufra and Sirte basins, eastern Libya. *Q. J. Eng. Geol.* 15, pp. 83-103.

XIE X. N., JIAO J. J., CHENG J. M. (2003) Regional variation of formation water chemistry and diagenesis reaction in underpressured system; example from Shiwu Depression of Songliao Basin, NE China. *Journal of Geochemical Exploration*, vol.78-79, no.2003, pp.585-590.

Xie X., Fan Z., Liu X., Lu Y. (2006) Geochemistry of formation water and its implication on overpressured fluid flow in the Dongying Depression of the Bohaiwan Basin, China. *Journal of Geochemical Exploration* vol. 89, no.2006, pp.432-435.

YEH G. T. (1987) 3DFEMWATER: A three-dimensional finite element model of water flow through saturated-unsaturated media. ORNL-6368, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.

YEH G. T. (1990) 3DLEWASTE: A hybrid Lagrangian-Eulerian finite element model of waste transport through saturated-unsaturated media. PSU Technical Report, Department of Civil Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA.

ZAIKOVSKI A., KOSANKE B. J., HUBBARD N. (1987) Noble gas composition of deep brines from the Palo duro Basin, Texas. *Geochim. Cosmochim. Acta* 51, pp. 73-84.

ZAIKOWSKI A., KOSANKE B. J., HUBBARD N. (1987) Noble gas composition of deep brines from the Palo Duro Basin, Texas. *Geochim. Cosmochim. Acta* 51, pp. 73-84.

ZAWISZA L., PIESIK-BUS W. (2005) Hydrodynamiczne modelowanie basenów osadowych na przykładzie basenu permńskiego monokliny przedsudeckiej. Hydrodynamic modelling of sedimentary basins on the example of the Permian Basin in the Foresudetic Monocline. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, vol.22, no.1, pp.469-478, 37.

ZGI (1984) Hydrogeologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik 1:50 000. Kartenblätter 1306-1/2, 1307-1/2, 1308-1/2, 1306-3/4, 1307-3/4, Zentrales Geologisches Institut, Berlin.

ZHANG M., FRAPE S. K., LOVE A. J., HERCZEG A. L., LEHMANN B.E., BEYERLE U., PURTSCHERT R. (2006) Chlorine stable isotope studies of old groundwater, southwestern Great Artesian Basin, Australia. *Applied Geochemistry* (2007) (in Publikation), doi:10.1016/j.apgeochem.2006.12.004.

ZIMMERMANN A.. (1998) Hydrogeologisches Systemmodell des ehemaligen Industriegeländes Solaris Chemnitz, Neefestraße. Diplomarbeit (unveröff.), TU Bergakademie Freiberg.

ZIMMERMANN, KÜHNAPFEL (1993) Ergebnisbericht Hydrogeologisches Modelluntersuchungsgebiet Deponie „Weißer Weg“. Bericht (unveröff.), IHU-Gesellschaft für Ingenieur-, Hydro-, und Umweltgeologie. Dresden.

ZWEIG M. (1999) Mündliche und schriftliche Auskünfte. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.

ZWEIG M. (2006a) Hinweise zum Programm GEOFEM 2004. Mündl. und schriftl. Mitteilungen, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.

ZWEIG M. (2006b) Berechnungsergebnisse zur Grundwasserneubildung mit GEOFEM 2004. Datenübergaben, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.

ZWEIG M. (2006c) Abwassereinleitungen in die Chemnitz und Würschnitz und Grundwasserentnahmen im Bilanzgebiet Würschnitz, Datenübergaben und schriftl. Mitteilungen. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.

ZWEIG (2006d, 2007) Informationen zum Arbeitsstand Grundwassergebietsgutachten und Wasserhaushalt im Bereich Mülsengrund. Mündl. und schriftl. (Email) Mitteilungen, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.

Weitere Literatur

ARBEITSKREIS STEINKOHLE (1995) Lehrpfad zum Zwickauer Steinkohlenbergbau. Arbeitskreis Steinkohle e. V., Zwickau.

ARBEITSKREIS STEINKOHLE (1996) Lehrpfad zum Zwickauer Steinkohlenbergbau. Bockwaer Revier. Steinkohlenbergbauverein Zwickau e. V., Zwickau.

BKS (1998) Mischwasserkontingentierung Einzugsgebiet ZKA Zwickau-Crossen. Arbeitsbericht im Auftrag der Wasserwerke Zwickau (unveröff.), BKS Ingenieurbüro GbR mbH, Wilkau-Haßlau.

CAINE J. S., EVANS J. P., FORSTER C. B. (1996) Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, v. 24, no. 11, p. 1025-1028.

EVANS J. P., FORSTER C. B., GODDARD J. V. (1997) Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones. *Journal of Structural Geology*, v. 19, n. 11, p. 1393-1404.

FRÖHLICH D. G. (1960) Hydrogeologisches Gutachten zu den Pumpversuchen an den Wasserbohrungen in Meerane-Crottenlaide, Kreis Glauchau. Bericht (unveröff.), GD Freiberg.

GARLING F. (1990) Grundwasservorratsprognose Bezirk Chemnitz. Bericht (unveröff.), HGN Hydrogeologie GmbH, Niederlassung Dresden.

GREHL B. (2001) Bewertung, geologische Zuordnung und Auswertung von Pumpversuchen in einem Beispielgebiet der Vorerzgebirgssenke sowie Darstellung der Ergebnisse in einem hydrogeologischen Kennwertmodell. Abschlussarbeit (unveröff.), Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.

HANEBERG W. C. (1995) Steady state groundwater flow across idealized faults. *Water Resources Research*, v. 31, n. 7, p. 1815-1820.

HÄNSCH F., PELZ A. (1908) Das Zwickau-Chemnitzer Kohlengebiet. In: *Landschaftsbilder aus dem Königreiche Sachsen*. Hrsg. Schöne E., Verlag von H. W. Schlimpert, Meißen.

HEINKELE et al. (2001) Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern. Bericht (unveröff.), Umweltbundesamt.

HERZOG E. (1852) Geschichte des Zwickauer Steinkohlenbergbaus. Dresden.

HERZOG E. (1927) Kurze Geschichte des Zwickauer Steinkohlenbergbaus. Teil 1 und 2. In: *Alt-Zwickau*, Heft 11 und 12, Zwickau.

HÖLTING B., HAERTLE T., HOHBERGER K.-H., NACHTIGALL K., VILLINGER E., WEINZIERL W., WROBEL J.-P. (1995) Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. *Geologisches Jahrbuch*, Reihe C 63, S. 5-24, Hannover 1995.

JANKIEWICZ P., DUIJNISVELD W. H. M., NEUMANN J. (2004?) Abflusshöhe-Sickerwasserrate-Grundwasserneubildung. Drei Themen im hydrologischen Atlas von Deutschland.

JORDAN H., Weder H.-J. (Ed.) (1995) *Hydrogeologie: Regionale Hydrogeologie: Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen*. Enke-Verlag, Stuttgart.

LFUG (1998) Auszug aus dem Sächsischen Altlastenkataster. Mitteilung Referat 33 vom 12.06.98. Bericht (unveröff.), Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.

LÓPEZ D. L., SMITH L. (1995) Fluid flow in fault zones: Analysis of the interplay of convective circulation

and topographically driven groundwater flow. Water Resources Research, v. 31, n. 6, p. 1489-1503.

MIETZSCH H. (1877) Geologische Profile durch das Kohlenfeld von Zwickau. Beiblatt zur Geologischen Spezialkarte des Königreiches Sachsen, Leipzig 1877.

NEUHAUS W., SCHEFFLER T., WITTENBURG R. (1996) Beschreibung geokinematischer Prozesse am Beispiel der Stadt Zwickau. Poster zum Deutschen Geodätentag 1996, Dresden.

NEUMANN J., WYCISK P. (2003) Hydrogeologischer Atlas von Deutschland (HAD)

WITTENBURG R. (2000) Strainanalyse am Beispiel des historischen Steinkohlenbergbaus im Revier Zwickau – Oelsnitz, Paper of 11th International Congress of the International Society for Mine Surveying, Vol. 2, S.253-258, Cracow 2000.

7.2 Abkürzungen und Formelzeichen

A	Formelzeichen Abfluß (Abschnitt 2.7.1)
AEo	Oberirdisches Einzugsgebiet
AEu	Unterirdisches Einzugsgebiet
Ao	Formelzeichen oberirdischer Abfluß (Abschnitt 2.7.1)
Au	Formelzeichen unterirdischer Abfluß (Abschnitt 2.7.1)
BG	(oberirdisches) Bilanzgebiet
E	Osten, Ost
EZG	oberirdisches Einzugsgebiet
FIS	Fachinformationssystem
GIS	Geographisches Informationssystem
GOCAD	Geological Object Computer Aided Design
GWGL	Grundwassergeringleiter, entspricht Aquitard
GWH	Grundwasserhemmer, entspricht Aquiclude
GWL	Grundwasserleiter, entspricht Aquifer
GWN	Grundwasserneubildung
GWN-MNQ	aus dem mittleren Niedrigwasserabfluss eines AEo abgeleitete GWN über diesem AEo
GWS	Grundwasserstockwerk
Hang.	Hangendes, hangende
kf	Durchlässigkeitsbeiwert
Kongl.	Konglomerat(e)
LfUG	Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie
Lieg.	Liegendes, liegende
LTZ	Lungwitztalzone
N	Norden, Nord
N	Formelzeichen Niederschlag (Abschnitt 2.7.1)
OHV	Oberhohndorfer Hauptverwerfung
psamm.	Psammitisch
pseph.	Psephitisch
Q ₀	Formelzeichen Basisabfluß (Abschnitt 2.7.1) entspricht dem langjährigen mittleren Niedrigwasserabfluss
RET	Formelzeichen reale Evapotranspiration (Abschnitt 2.7.1)

RHV	Rödlitzer Hauptverwerfung
S	Süden, Süd
S.	Schacht (z.B. Rudolf-Breitscheid-S.)
S+ - S-	Speicheränderung im Grundwasserkörper (Wasserhaushaltsgleichung)
Sdst.	Sandstein
Sed./sed.	Sediment(e)/sedimentär
SMN ZO	Sondermessnetz Zwickau-Oelsnitz
strike-slip	(Horizontale) Blattverschiebung; auch Horizontalverschiebung, Seitenverschiebung oder Transversalverschiebung
T	Transmissivität
TB	Tiefbrunnen
TEG	Teileinzugsgebiet (aus WASY 1998)
TG	Teileinzugsgebiet
UHYDRO	Datenerfassung- und Bearbeitungsprogramm zum UIS Sachsen-FIS Hydrogeologie/Geologie
UIS	Umweltinformationssystem
V	Formelzeichen Verdunstung (Abschnitt 2.7.1)
varisz.	Variszisch
VES	Vor erzgebirgssenne (Erzgebirgisches Becken, Mittelsächsische Senke)
vorwieg.	Vorwiegend
vulkan.	Vulkanisch
W	Westen, West
WL	Wechselagerung
WW	Wasserwerk
Zo	Formelzeichen oberirdischer Zufluß (Abschnitt 2.7.1)
Zu	Formelzeichen unterirdischer Zufluß (Abschnitt 2.7.1)
□GW	Formelzeichen Speicheränderung im Grundwasser (Abschnitt 2.7.1)
□S	Formelzeichen Speicheränderung im Sickerwasser (Abschnitt 2.7.1)
MlsF/ MIF	Gera-/ Mülsen-Folge
LkfF/ LkF	Leukersdorf-Folge
PlnF/ PIF	Planitz-Folge
HrtF/ HtF	Härtensdorf-Folge
GW	Grundwasser

7.3 Begriffe

Aquiclude	entspricht Grundwasserhemmer, GWH
Aquifer	entspricht Grundwasserleiter, GWL
Aquitard	entspricht Grundwassergeringleiter, GWGL
höher mineralisierte Wässer	Wässer mit Gesamtkonzentration des Lösungsinhaltes von mehr als 2000 mg/L (salinare Wässer, Solen, Salzwässer, Brackwässer über 2000 mg/L)
konstate Wässer	Tiefenwässer; tiefe Grundwässer oder Formationswässer die nicht/kaum am meteorischen Wasserkreislauf beteiligt sind
Layer	(GIS-) Themenkarten, thematische Layer oder Informationsebenen

Magmatisches Wasser	Juveniles Wasser, Restprodukt magmatischer Kristallisation
Metamorphes Wasser	Kristallwasser, wird bei Mineralumbildungen freigesetzt
Meteorisches Wasser	Vadoses Wasser, Niederschlagswasser
2D/3D-Gitter	oder „Modellgitter“; 2D/3D-Vermaschung als „mesh“, in vorliegender Arbeit i.d.R. in Form von Tetraedern
strike-slip	(Horizontale) Blattverschiebung; auch Horizontalverschiebung, Seitenverschiebung oder Transversalverschiebung
konzeptionelles GMS-Modell	GMS conceptual model. Ein im Programm GMS geführte Informationsebene, die strukturelle und hydraulische Parameter und Randbedingungen zur Projektion auf ein hydraulisches Modellgitter definiert. Konzeptionelle GMS-Modelle sind eine effektive Methodik zur Parametrisierung hydraulischer Modelle.
SOLID	durch umschließende Flächen charakterisierter Raumkörper in GMS
TIN	Fläche in GMS
variszisch	Variszische Orogenese, hier: im Sinne einer tektonischen (Haupt-) wirkungsrichtung; allg. um NW-SE streichend; regional wichtige Phasen sind (reußisch), (bretonisch), sudetisch, erzgebirgisch, asturisch
erzgebirgisch	hier: Begriff für NE-SW Richtung tektonischen Stresses und NE-SW Streichrichtung
herzynisch	hier: Begriff für NW-SE Richtung tektonischen Stresses und NW-SE Streichrichtung
saxonisch	hier: Bezeichnung postvariszischer Bruchtektonik
alpidisch	Alpidische Orogenese; regional wichtige Phasen sind austrisch und subherzyn
meridional	N-S Richtung

7.4 Tabellen

Tabelle 1	Bezeichnung hydrogeologischer Einheiten in Anlehnung an SCHLIMM (1996)	10
Tabelle 2	Externe Datenbanken und weitere wichtige Datenquellen	15
Tabelle 3	In UHYDRO neuerfasste oder korrigierte Datensätze	17
Tabelle 4	Vergleich ausgewählter Parameter in GEOFEM 2000, 2003 und 2004	26
Tabelle 5	Übersicht: Import von Vektor- und Bohrlochdaten in GOCAD	36
Tabelle 6	Geologische Einheiten im Bereich der Vorerzgebirgssenke	53
Tabelle 7	Tektonische Entwicklung im Bereich der Vorerzgebirgssenke und deren Umland	57
Tabelle 8	Indikatoren zur Charakterisierung von Grundwässern in sedimentären Senken	87
Tabelle 9	Charakterisierung von Grundwässern in sedimentären Senken mit Hilfe gelöster Edelgase	89
Tabelle 10	Grundwasserführung in der Vorerzgebirgssenke, Gruppengliederung	93
Tabelle 11	Hydrogeologische Einheiten und Modellvorstellung des Aufbaus der Grundwasserstockwerke (GWS) in der Vorerzgebirgssenke	95
Tabelle 12	Wirkungsbereiche oberflächennaher Grundwasserfließsysteme	98
Tabelle 13	Wirkungsbereiche tiefer, regionaler Grundwasserfließsysteme	100
Tabelle 14	Grundwasserführung der geolog. Einheiten der östlichen Vorerzgebirgssenke	124
Tabelle 15	Hydrogeologische Einheiten des Permokarbon und Quartär im Raum Chemnitz	130
Tabelle 16	Wichtige hydraulisch aktive herzynische Störungszonen von W nach E)	151
Tabelle 17	Wichtige hydraulisch aktive erzgebirgische Störungszonen (um NE-SW streichend)	154
Tabelle 18	Weitere wichtige hydraulisch aktive Störungen	155
Tabelle 19	Störungsquerschnitte A [m ²] auf Grundlage variierender Störungsteufen und -breiten	156
Tabelle 20	Volumenströme $\dot{V}$ [m ³ /a] entlang einer Störung in Abhängigkeit vom Querschnitt A, k_f (T/M) bei einem hydraulischen Gradienten i von 0,1	157
Tabelle 21	Volumenströme $\dot{V}$ [m ³ /a] entlang einer Störung in Abhängigkeit vom Querschnitt A, k_f (T/M) bei einem hydraulischen Gradienten i von 0,01	157
Tabelle 22	Volumenströme $\dot{V}$ [m ³ /a] entlang einer Störung in Abhängigkeit vom Querschnitt A, k_f (T/M) bei einem hydraulischen Gradienten i von 0,001	157
Tabelle 23	Randbedingungen für Störungszonen im Bilanzgebiet Koberbach	158
Tabelle 24	Berechneter Grundwasserfluss auf der Störung im Koberbachtal	159
Tabelle 25	Berechneter Grundwasserfluss auf der Störung bei Niederalbertsdorf	159
Tabelle 26	Gebietswerte der Grundwasserneubildung ^{*)} (GWN) mit GEOFEM 2003 und 2004	166
Tabelle 27	Zusammenstellung der verwendeten Pegel	169
Tabelle 28	Bilanzgebiete, eingrenzende Pegel und mittlerer Basisabfluss (Abschnitt 2.7.3)	169

Tabelle 29	Berechnungsergebnisse und Vergleich der Grundwasserneubildung im Bereich der Zwickauer Mulde	171
Tabelle 30	Berechnungsergebnisse und Vergleich der Grundwasserneubildung für Bilanzgebiete in der Vorerzgebirgssenke	175
Tabelle 31	Aufschlüsse Grundwasserbeschaffenheit im Bereich der Vorerzgebirgssenke	178
Tabelle 32	Ermittelte bzw. erwartete Parameter anthropogen unbeeinflusster Rotliegend-Grundwässer in der Vorerzgebirgssenke	179
Tabelle 33	Grundwasserfaziestypen in der Vorerzgebirgssenke - Leitparameter ^{*)}	183
Tabelle 34	Lösungsgehalte verschiedener (Grund)wasser-Faziestypen, Beispiele	185
Tabelle 35	Aufschlussdaten in der Aufschlussdatenbank Thüringen	207
Tabelle 36	Kurzcharakteristik Aufschlussdaten, Allgemeine Angaben und Teufen	208
Tabelle 37	Kurzcharakteristik Bohrlochmodell-Aufschlussdaten, Stratigraphie	209
Tabelle 38	Anzahl der Schichtdatensätze in stratigraphischer Aufschlüsselung	210
Tabelle 39	Schichtdatenbezogene Auswertung des FIS für Ansprachen tiefer 15m	211
Tabelle 40	Parameter zur Modelldimensionierung im FEMWATER-Programmcode in GMS	227
Tabelle 41	Umsetzung des Strukturmodells in das Gitter des Strömungsmodells	228
Tabelle 42	Eigenschaften des dreidimensionalen Gitters des hydraulischen Modells	229
Tabelle 43	Kennwerte der hydrogeologischen Einheiten (Modellierungsansätze)	230
Tabelle 44	Hydraulische Kennwerte wichtiger räumlich modellierter struktureller Elemente (Modellierungsansatz)	231
Tabelle 45	Hydraulische Kennwerte weiterer wichtiger struktureller Elemente	232
Tabelle 46	Durchlässigkeitsklassen für den oberen GWL / Grundwasserleiterstockwerk	233
Tabelle 47	Materialien des hydraulischen Modells	234
Tabelle 48	Einheiten, Run-Optionen und Iterationsparameter des FEMWATER Modells ^{*)}	239
Tabelle 49	Grundwassermessstellen TLUG (Thüringen)	241
Tabelle 50	Grundwassermessstellen LfUG (Sachsen), Prä-Quartär	242
Tabelle 51	Grundwassermessstellen mit unsicheren Filterlagen LfUG (Sachsen), Prä-Quartär	243
Tabelle 52	Materialzusammenführung und Kalibrierung	244
Tabelle 53	Fehlerentwicklung während der Kalibrierung	248
Tabelle 54	Berechneter Grundwasserspiegel, beobachtete Werte und Differenzen an verschiedenen Stichtagen 2002, 2005 und 2006	251

7.5 Abbildungen

Abbildung 1	Arbeitsablauf Hydrogeologische Analyse und Modellierung der VES	13
Abbildung 2	Bearbeitungsabläufe in GOCAD	35
Abbildung 3	Bearbeitungsabläufe Struktur- und Strömungsmodellierung mit GMS	40
Abbildung 4	Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets	48
Abbildung 5	Die Vorerzgebirgssenke: Landschaft und geologische Position	49
Abbildung 6	Die zentrale Vorerzgebirgssenke bei Zwickau-Oelsnitz	49
Abbildung 7	Die Vorerzgebirgssenke und ihre Einbettung in das Sächsisch Thüringische Grundgebirge – geologische Übersicht	52
Abbildung 8	Schema typischer Grundwasserfluss-Regimes in sedimentären Senken	65
Abbildung 9	Diagenese tiefer Grundwässer sedimentärer Senken: Einflussfaktoren und Randbedingungen	84
Abbildung 10	Prinzipskizze wichtiger hydrodynamischer Prozesse in der VES	101
Abbildung 11	Sichere und vermutete tektonische Strukturen in der Vorerzgebirgssenke und ihrem Umland (Erläuterungen, vgl. Text)	148
Abbildung 12	Grenzen unterirdischer Einzugsgebiete im zentralen Untersuchungsgebiet (Erläuterungen, vgl. Text)	164
Abbildung 13	Grundwasserneubildung: Lage und Kennung der zugehörigen Einzugsgebiete	167
Abbildung 14	Bilanzgebiete im Bereich der Vorerzgebirgssenke (Erläuterungen, vgl. Text)	168
Abbildung 15	Quartäre Vereisungen der Elster-, Saale- und Weichselkaltzeit in Ostdeutschland (nach LIEDTKE 1981, WALTER 1992, ergänzt)	192
Abbildung 16	Wasser-Land-Verbreitung im nördlichen Mitteleuropa im Oligözän (nach SCHMIDT et al. 1990 und WALTER 1992, ergänzt)	193
Abbildung 17	Digitales Geländemodell der Vorerzgebirgssenke und ihres Umlandes	206
Abbildung 18	Dichte und Verteilung von Aufschlussdaten mit Kennung des Endhorizontes	207
Abbildung 19	Verteilung von Aufschlussdaten mit Teufen größer 25m mit Kennung des Endhorizontes (inklusive Aufschlussdaten Thüringen)	208
Abbildung 20	Aufschlüsse mit Teufen größer 15m, perspektivische Darstellung	211
Abbildung 21	Perspektivische Darstellung der Basis Trias im NW des Modellgebiets (4fach überhöht)	216
Abbildung 22	Basiskonturen Trias mit Aufschlussdaten	217
Abbildung 23	Aufschlussdaten mit Basislage der Mülsen-Folge	218
Abbildung 24	Basislage der Gera-Mülsen-Folge (Versetzungen geglättet)	219
Abbildung 25	Hydrogeologische Einheiten im Vorerzgebirgssenkenraum	220
Abbildung 26	Räumliche Diskretisierung des Gitters des hydraulischen Modells	229
Abbildung 27	Hydraulisches Parametermodell (Materialien), oberes Grundwasserstockwerk	235
Abbildung 28	Horizontalschnitte durch das hydraulische Parametermodell (ohne separate Störungsimplementierung)	235

Abbildung 29	Implementierung von Störungszonen im hydraulischen Modell (Erläuterung vgl. Text)	236
Abbildung 30	Randbedingungen des hydraulischen Modells: 1. und 2. Art, Flussrandbedingungen (grün: Festpotential, blau: Flussrandbedingungen, rot: no-flow Randbedingung)	237
Abbildung 31	Typische Effekte bei der Modellrechnung (Error vs. Iteration), Ausschnitte	240
Abbildung 32	Kalibrierungsmessstellen, Prä-Quartär (grün) und weitere Messstellen (rot)	242
Abbildung 33	Auszug, Modellkalibrierung: Error vs. Simulation	246
Abbildung 34	Berechnete vs. beobachtete Grundwasserstände zu Beginn der Kalibrierung	246
Abbildung 35	Berechnete vs. beobachtete Grundwasserstände während der Kalibrierung	247
Abbildung 36	Berechnete vs. beobachtete Grundwasserstände am Ende der Kalibrierung	247
Abbildung 37	Ausgewählte Kalibrierungsmessstellen: Auskopplung GMS	248
Abbildung 38	Räumliche Abbildung der Kalibrierungsmessstellen (einschl. weiterer Quartärmessstellen) am Ende der Kalibrierung	249
Abbildung 39	Grundwassergleichenplan, oberflächennahe Auflockerungszone	255
Abbildung 40	Grundwassergleichenplan, horizontaler Schnitt, 0m NN	256
Abbildung 41	Grundwassergleichenplan, horizontaler Schnitt, -510m NN	256
Abbildung 42	Grundwasserfluss in der Gera-Mülsen-Folge	257
Abbildung 43	Grundwasserfluss in der unteren Leukersdorf-Folge und dem Übergangsbereich in die Zeitz-Schmöllner Mulde	257
Abbildung 44	Vektorbasierte Darstellung der Fließgeschwindigkeiten im Modellraum	258
Abbildung 45	Perspektivische Darstellung von Fließgeschwindigkeitsvektoren (mit Lungwitztalzone)	259
Abbildung 46	Grundwasserfließwege (Pathlines) bei Traceraufgabe im oberflächennahen Kristallin	260
Abbildung 47	Grundwasserfließwege bei Traceraufgabe im tieferen Kristallin (-500mNN)	260
Abbildung 48	Perspektivische Darstellung der Fließbahnen aus Abbildung 47, südliches Vorland der VES	261
Abbildung 49	Grundwasserfließwege bei Aufgabe in der VES und nördlich, oberflächennah	262
Abbildung 50	Grundwasserfließwege (Pathlines) bei Aufgabe in der VES und weiter nördlich im Niveau -500m NN	262
Abbildung 51	Perspektivische Darstellung der Fließbahnen aus Abbildung 50, VES und nördliches Vorland	263
Abbildung 52	Auftreten höher mineralisierte Grundwässer - backwards tracking	264
Abbildung 53	Vektorbasierte Darstellung der Fließgeschwindigkeiten im Modellraum (Szenario)	266
Abbildung 54	Profilschnitt mit Fließgeschwindigkeiten in Vektordarstellung (Normalmodell oben, Szenario unten)	266

7.6 Anlagen

- Anlage 1 Dokument: Fallstudien zur Grundwasserhydraulik in tiefen sedimentären Senken weltweit
- Anlage 2 Tabelle: Geologische Einheiten und tektonische Entwicklung in der Vorerzgebirgssenke und dem Umland (ausführliche Variante der Textversion)
- Anlage 3 Tabelle: Hydrogeologische Charakteristik geologischer Einheiten in der Vorerzgebirgssenke
- Anlage 4 Dokument: Diskussion unterirdischer Einzugsgebiete in der Vorerzgebirgssenke
- Anlage 5 Dokument: Im digitalen hydrogeologischen Modell verwandte GOCAD-Objekte
- Anlage 6 Digitale Daten

ANLAGEN

zur
Dissertationsschrift
zum
zum Thema

Hydrogeologische Analyse
und großräumige Modellierung
des weiteren Vorerzgebirgssenkenraumes

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Dokument: Fallstudien zur Grundwasserhydraulik in tiefen sedimentären Senken weltweit
Anlage 2	Tabelle: Geologische Einheiten und tektonische Entwicklung in der Vorerzgebirgssenke und dem Umland (ausführl. Variante der Textversion)
Anlage 3	Tabelle: Hydrogeologische Charakteristik geologischer Einheiten in der Vorerzgebirgssenke
Anlage 4	Dokument: Diskussion unterirdischer Einzugsgebiete in der Vorerzgebirgssenke
Anlage 5	Dokument: Im digitalen hydrogeologischen Modell verwandte GOCAD-Objekte
Anlage 6	Digitale Daten

Anlage 1

Fallstudien: Hydraulik und Charakter tiefer Grundwässer in sedimentären Senken

Inhalt

1	Systematik	3
1.1	Gliederung	3
1.2	Angaben zu den klimatischen Verhältnissen	4
1.3	Begriffe	5
2	Ausgewählte Beispiele	6
2.1	Alberta Basin (SW-Teil)	6
2.2	Alberta Basin (E-Teil, Cold Lake Region)	8
2.3	Bath-Bristol Basin	9
2.4	Canning Basin	10
2.5	Cheshire Basin	12
2.6	Dacic Basin	13
2.7	East Midland Basins	13
2.8	East Anglia Basin	16
2.9	Hampshire und Wessex Basin	17
2.10	Illinois Basin	18
2.11	Kufra Basin	20
2.12	Llano basin	21
2.13	London Basin	22
2.14	Midland Valley	24
2.15	Münster Becken	25
2.16	Murray Basin	27
2.17	Northern Ireland Permo-Triassic Basin	28
2.18	Nordwesteuropäische Senke (Niederländisches Becken)	29
2.19	Orcadian Basin	30
2.20	Palo Duro Basin	31
2.21	San Joaquin Basin	33
2.22	Sommerset Basin	35
2.23	South Wales Syncline (Coalfields)	35
2.24	Ungarische Senke	37
2.25	Vor erzgebirgssenke	38
2.26	Worcester Basin	40
2.27	Weitere Senkenstrukturen	41

1 Systematik

1.1 Gliederung

Gliederungspunkt und Name

Lage
Kurzbeschreibung <i>Kurzcharakteristik der Senkenstruktur; Typ; Alter; tektonische Position</i>
Klima, Hydrologie, geologische und hydrogeologische Verhältnisse <i>Klimacharakteristik: beschreibende Klimaklassifikation nach W. Köppen (in HEYER 1975) Kurzbeschreibung der geologischen und hydrologisch-hydrogeologischen Verhältnisse (Liegend zu Hangend)</i>
Grundwässer und ihre Charakteristik; Isotopen <i>Angaben zu Auftreten, Mineralisation, Isotopengehalte der Grundwässer</i>
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik <i>Herkunft; Beschreibung wichtiger hydraulischer Mechanismen; Konvektion, Zirkulation, regionaler Grundwasserfluss, Wirkung von Störungszonen, Besonderheiten</i>
Parameter <i>Transmissivitäten/ kf-Werte; Porositäten; geothermischer Gradient/Wärmefluss</i>
Vergleich/ Relevanz für die Verhältnisse in der VES <i>Abschätzung der Relevanz der beschriebenen Parameter und Mechanismen für die Vorerzgebirgssenke; Übertragbarkeit von Erkenntnissen; Vergleichbarkeit</i>
Literatur/ Autoren/ Bearbeitungsgrad <i>Umfang der verfügbaren/ verwendeten Literatur (Bibliothek, Datenbanken, Internet); Aufschlussgrad; Defizite</i>
Bemerkungen <i>benachbarte ähnliche Senken</i>

1.2 Angaben zu den klimatischen Verhältnissen

Die klimatischen Verhältnisse sind zur Bewertung der Angaben zu den hydrogeologischen Verhältnisse, z.B. in Bezug auf die Grundwasserneubildung, von entscheidender Bedeutung. Die verwandte Kurzbeschreibung der rezenten klimatischen Verhältnisse folgt der Systematik der beschreibenden Klimaklassifikation nach W. Köppen in HEYER (1975). Für die folgenden Betrachtungen wird sie wie in Tabelle 1 dargestellt zusammengefasst.

Tabelle 1 Tab. Hauptklimatypen mit Kennung aus 2 Buchstaben

Kennung 1		Kennung 1+2	Kurzbeschreibung
A	Tropisches Klima ohne Winter	Af	Tropisches Regenwaldklima; N >60mm/ Monat
		Aw	Savannenklima; wintertrocken; trockenster Monat N <60mm
		Am	Zwischenform; tropisches Regenwaldklima mit einer Trockenzeit
B	Trockenklima	BS	Steppenlima
		BW	Wüstenlima
C	Warm-gemäßigtes Klima	Cw	Warmes wintertrockenes Klima
		Cs	Warmes sommertrockenes Klima; trockenster Monat N <40mm
		Cf	Feuchtgemäßigtes Klima
D	Boreales oder Schnee-Wald-Klima	Dw	Wintertrockenkalt Klima
		Df	Winterfeuchtkalt Klima
E	Schneeklima	ET	Tundrenlima
		EF	Klima ewigen Frostes

Diese Kennung wird zur weiteren Spezifizierung der Hauptklimatypen um einen weiteren Buchstaben ergänzt (Tabelle 2).

Tabelle 2 Kennung, 3. Buchstabe zur weiteren Unterteilung der Klimatypen

Kennung 3	Kurzbeschreibung
a	heiße Sommer; Mitteltemp. wärmster Monat >22°C
b	warme Sommer; Mitteltemp. wärmster Monat <22°C; >3 Monate mit >9°C
c	kühle Sommer; Mitteltemp. wärmster Monat <22°C; 1-3 Monate mit >9°C
d	strenge Winter; Mitteltemp. kältester Monat <-38°C
g	Ganges-Typ; Temp.-Jahresmax. vor Sommersonnenwende und Sommerregenzeit
h	heiß; Jahresmittel der Temp. >18°C
k	kalt; Jahresmittel der Temp. <18°C

1.3 Begriffe

Die Bedeutung der verwandten Begriffe entsprechen denen des Textes. Es soll hier nur kurz auf die in der internationalen Literatur zur Beschreibung grundwasserführender Einheiten verwandten Begriffe Aquifer, Aquitard und Aquiclude/Aquifuge hingewiesen werden. Diese werden im folgenden als Synonyme für die grundwassergesättigten Bereiche von Grundwasserleitern, -geringleitern und -hemmern respektive verwendet. Die beschriebenen hydrogeologischen Eigenschaften können dabei jedoch i.d.R. auf die gesamte Einheit übertragen werden.

2 Ausgewählte Beispiele

2.1 Alberta Basin (SW-Teil)

Lage: Alberta, Kanada (hier behandelt: SW-Teil des Alberta Basin)
Kurzbeschreibung: asymmetrische Orogen-Vorland Senke (zwischen kanadischem Schild und Rocky Mountains); Mächtigkeit: bis 6-7km; mehrere 100km Durchmesser
Klima: Winterfeuchtkalt, sommerwarm (Dfb) bis winterfeuchtkalt, sommerkühl (Dfc); z.T. kaltes Step- penklima-Prärienklima (BSk) Geologie und hydrogeologische Einheiten: ▪ keilförmig nach W abtauchende Sedimentpakete ▪ Einfallen 5-10m/km (BACHU et al. 1991) ▪ Karbonate (meist dolomitisiert; D) mit mächtigem Plattform-Riff-Komplex (OD)– bilden 4 regionale hydrogeologische Einheiten, z.T. mit Kohlenwasserstoffvorkommen die am NE Senkenrand austreichen, nach SW bis zur Deformationsfront der Rocky Mountains abtauchend ▪ jede Einheit mit mehreren Aquiferen (Plattform und Riff-Karbonate) und Aquitarden (Schiefer- ferrone und Mergel); die z.T. hydraulisch isoliert sind (Kohlenwasserstoff-Fallen) ▪ Bsp.: Wabamun Aquifer (Bachu 1995) mit begrenzenden Aquitarden ▪ Hangend: Sedimente (KR und TE) ▪ stark tektonisch beansprucht (Laramidische Orogenese: Kippung nach W und Heraushebung der Rocky M. und der E-Teile der Senke, Erosion; Störungs- und Überschiebungszonen sowie später „verheilte“ intensive Klüftung bis ins Grundgebirge)
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: ▪ Mineralisation mit Teufe zunehmend; <1g/L bis >350g/L (BACHU 1995b) ▪ Dichte: 1,175g/cm³ in W (3000m Teufe) bis 1,01g/cm³ im E (ROWE et al. 1970; KESTIN et al. 1981); Maxima bis >1,3g/cm³ (BACHU 1995b) ▪ Temperaturen mit Teufe/ nach W zunehmend: ab rund 3000m >100°C (BACHU 1995) ▪ mit Teufe zunehmender Druckspiegel (3000m Teufe = 1050m; 500m = 325 m) (BACHU 1995) ▪ ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr extrem hoch in devonischen spätdiagenetischen sub-surface Calziten (bis max. 0,7370 (!) in Kluftfüllungen mit Kristallisationstemp. zwischen 130 und 160°C) = senkenexterne Fluida, vermutlich aus ⁸⁷Sr-reichen Metasedimenten des PC (Schiefer und silikat. Klastika) ▪ höchste ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr- Gehalte in W suggerieren einen generellen W-E GW/ Fluida Fluss; nach E Abnahme durch allmähliche Verdünnung und Einstellung neuer reaktions-Gleichgewichte ▪ weist auf <u>squeegee-type</u> flow (siehe oben) ▪ Nachweis thermochemischer Sulfat-Reduktion
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ Regionaler GW-Fluss: SW-NE (HITCHON 1969, 2006) ▪ regionale GW-Fliessgeschwindigkeit = 20cm/a (BACHU et al. 1991); mglw. deutlich geringer (ADAMS et al. 2004) ▪ allg. sehr komplexe Fliessverhältnisse mit lokalen, intermediären und regionalen (Beckemasstab) Fliesssystemen; Antrieb: Topographie, erosional rebound, tectonic compression und Kohlenwasserstoff-Generation (BACHU 1995b; MICHAEL et al. 2001) ▪ aufgrund der damit einhergehenden Aisotropie fast aller Parameter nur schwer numerisch modellierbar; <u>besser</u>: Nutzung der über 200.000 Felddaten

▪ lokal aufgrund von Trägheitseffekten (buoyancy) an Stellen besonders steilen Einfallens und mit geringen GW-Gradienten kehrt sich die GW-Fließrichtung gegen die aus den GW-Spiegel-Gradienten abgeleitete SW-NE Richtung; insbes. im W-Teil der Senke (BACHU 1995) ▪ i. d. R. konvektiver Wärmetransport dominierend (BACHU 1988, 1993; BACHU et al. 1991); z. T. aber deutliche Variationen aufgrund variabler Lithologie und Wärmefluss (BACHU 1995) <u>Hydrogeologische Entwicklung</u> (siehe auch oben): ▪ Mittl. PZ: W-E Migration hoch mineralisierter Wässer (u.a. Pb-Zn-Ba) im Westteil der Senke/ des Orogens ▪ generell: Von PRZ bis Devon: Fluid Fluss über Künfte auch in späteren Aquicluden/ Aquitarden; Speisung aus Fundament in Devon ▪ OKR – UTE: Laramidische Orogenese; tektonischer „Austrieb“ von Fluida aus und entlang von Überschiebungsflächen in das Vorland und/ oder entlang von relativ permeablen Störungszonen (auch Kohlenwasserstoff-Bildung und Migration) ▪ Postlaramidisch: Ausbildung tiefer meteorisch gespeister Konvektion im SW vorgelagerten Orogen-Gürtel die jedoch nicht bis ins D dringen; Höhe des Anteils meteorischer Wässer wird diskutiert (ADAMS et al. 2004) ▪ NE gerichtete Strömung konnater hoch mineralisierter Wässer im devonischen Aquifer-System ▪ gleichzeitig NW – SE gerichteter Fluss in mehreren Horizonten subparallel zum Orogen im tiefsten Teil der devonischen Aquifere ▪ seit UTE: Postorogener Uplift /Erosion mit Anhub um 1,5 - 2km ▪ <u>squeegee-type flow</u>: Fluida werden lateral entlang von Überschiebungsflächen oder vertikal über Störungen aus den PC Metasedimenten (basement) über gestörtes C in die Karbonat-Aquifere getrieben ▪ squeegee-type Fluss lateral sehr begrenzt (100-200km) = unterstützt allg. Erkenntnisse über geringen Flux tektonisch induzierten GW-Flusses
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: junge unsymetrische Senke; stark (alpidisch) tektonisiert; größer und sehr tief; verbreitet Karbonate
Literatur: ADAMS et al. (2004), AMTHOR et al. (1993), BACHU (1995), BACHU (1995b), BACHU et al. (2002), MICHAEL et al. (2004), HITCHON (2006), MACHEL (2000), MACHEL und CAVEL (1999); MACHEL et al. (1996), MOSSOP und SHETSEN (1994), OLIVER J. (1986), RICKARD et al. (1979); sehr gut dokumentiert
Anmerkungen: Teil des Western Canada Sedimentary Basin; benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Williston Basin; Schema Abbildung S. 216 (MACHEL 2000); mehr als 200.000 (!) Bohrungen abgeteuft

2.2 Alberta Basin (E-Teil, Cold Lake Region)

Lage: W-Alberta, Kanada (Alberta Basin)
Kurzbeschreibung: Teilsenke einer asymmetrischen Orogen-Vorland Senke (zwischen kanadischem Schild und Rocky Mountains); Mächtigkeit hier: 700 - 1000m; E-W: 160km; N-S: 140km
Klima: Winterfeuchtkalt, sommerwarm (Dfb) bis winterfeuchtkalt, sommerkühl (Dfc); z.T. kaltes Steppenklima-Prärienklima (BSk) Geologie und hydrogeologische Einheiten: ▪ Schichten nach SW einfallend ▪ 21 stratigraphische Einheiten bilden 12 hydrostratigraphische Einheiten die das hydrogeologische System bilden <u>Abfolge</u> (BACHU und SAUVEPLANE 1984): ▪ C über PC Fundament (71 m) ▪ D: Halit (Aquiclude, ca. 100m mächtig); Sandstein (Aquifer); Kalkstein/Schiefer WL (Aquifer, Beaverhill Lake Fm., 303m); Kalkstein (Cooking Lake Fm.); Schiefertone (Aquitard); Dolomitfolgen (Aquifer) ▪ KR: Sandstein (McMurray, Aquifer); Schiefertone (Aquitard); Sandstein/Schluffstein WL (Clearwater und Upper Manville Group, Aquifer, 188m); Schluffstein (Aquitard); Sandstein (Viking Fm., Aquifer); schluffige Tonstein; Tonsteinfolgen (Aquitards, u.a. Colorado shale = 200-400m) ▪ Q: Geschiebelehm, Sand, Schluff, Schotter (Aquifer/Aquitard WL); ca. 100m mächtig
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: ▪ Salinität: 10mg/L im nordöstlichen Mannville Aquifer bis 310g/L im basalen kambrischen Aquifer (BACHU et al. 1991)
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ oberflächennaher GW-Fluss nach E (Cold Lake) (BACHU et al. 1984) ▪ komplexes Aquifer/Aquitard- System; nur ein Aquifer ist vollständig durch Aquitards abgegrenzt (Viking Sandstone) ▪ ansonsten hydraulische Anbindung zwischen den Aquiferen die lokal GW-Übergänge ermöglichen ▪ Viking Sandstone: topographisch induzierter <u>lokaler GW-Fluss</u> in Richtung nächste Vorfluter (BACHU et al. 1984) ▪ GWN: über oberflächennahe Aquifere auch in tiefere GW-Stockwerke oder Infiltration direkt entlang der Ausstrichbereiche (W) ▪ Cooking Lake und Beavering Lake Units: tiefste Aquifere; GW-Fluss mit geringem Gradient nach E entsprechend dem das gesamte Becken umfassenden <u>regionalen GW-Fluss</u> (HITCHON 1969, 2006) ▪ mittlere Aquifere: zeigen i.d.R. intermediären GW-Fluss (vgl. auch TOTH 1963; WITHERSPOON 1966, 1967, 1968) ▪ lokal kommt es zu Übergängen bzw. Gleichläufigkeit von intermediärem und regionalem GW-Fluss (gleiche Druckspiegel, BACHU et al. 1984) ▪ Upper Mannville Aquifer: weithin kein lateraler GW-Fluss erkennbar (konstante GW-Spiegel); nur im SW nach Zeichnung der Topographie erkennbar – möglicher Hinweis auf vertikale GW-Fluss Komponente ▪ BACHU et al. (1991) postuliert vertikalen nach oben gerichteten GW-Fluss aus: PC und C und Beaverhill Lake und Ireton F.

Parameter (BACHU et al. 1984 oder wie angegeben): - regionale GW-Fliessgeschwindigkeit = 20cm/a (BACHU et al. 1991) - Mc Murray F. (Sandstein): $k_f = 7,4 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$; $T = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ - Mc Murray F. (Sandstein): Dichte 1006kg/m^3; 24°C; Porosität 0,24; $k_f = 3,1 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$; $S = 0,008$ (BACHU et al. 1991) - Manville allgemein: Dichte 1007kg/m^3; 23°C; Porosität 0,24; $k_f = 4,1 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$; $S = 0,005$ (BACHU et al. 1991) - Lower Manville Group (= Mc Murray F. u. a., Sandstein u.a.): Permeabilität 10^{-16}-10^{-13}m^2, S (Speicherkoef.)= 0,001-0,016 - Clearwater: Dichte 1005kg/m^3; 23°C; Porosität 0,27; $k_f = 4,3 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$; $S = 0,0008$ (BACHU et al. 1991) - Upper Manville Group (Sandstein/Schluffstein WL): Permeabilität 10^{-16}-10^{-12}m^2, S (Speicherkoef.)= 0,001-0,016 - Viking F. (Sandstein): Permeabilität 10^{-16}-10^{-13}m^2, S (Speicherkoef.)= 0,002-0,032 - Beaverhill Lake F.: Dichte 1033kg/m^3; 28°C; Porosität 0,10; $k_f = 3,5 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$; $S = 0,0004$ (BACHU et al. 1991) - Oberes Paläoz.: Permeabilität 10^{-16}-10^{-13}m^2, S (Speicherkoef.)= 0,004 - Unteres Paläoz.: Permeabilität 10^{-15}-10^{-14}m^2 - Kambrium: Dichte 1160kg/m^3; 40°C; Porosität 0,23; $k_f = 3 \cdot 10^{-7} \text{m/s} - 5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$; $S = 0,0003$; (BACHU et al. 1991)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: etwas größer; ähnliche Teufen und Schichtmächtigkeiten; z.T. vergleichbare Lithologie (Ton-, Schluff- und Sandsteine); flacher und in konstante Richtung einfallend (abtauchend); Alter verschieden (Devon und Kreide)
Literatur: ADAMS et al. (2004), BACHU et al. (1991), BACHU S. und SAUVEPLANE C. M. (1984), HITCHON (2006, 1969), MICHAEL et al. (2004); gut dokumentiert
Anmerkungen: Teil des Western Canada Sedimentary Basin; siehe Alberta Basin (SW-Teil; Methodik der Auswertung von ca 3100 sehr inhomogenen Bohrdatensätzen (BACHU et al. 1984); Cold Lake Region: mehr als 14800 Bohrungen 1990 (BACHU et al. 1991)

2.3 Bath-Bristol Basin

Lage: Avon, W-England, Grossbritannien
Kurzbeschreibung: strukturelle variszische Senke; Mächtigkeit: ?, E-W: ca. 50km, N-S >100km
Klima: feuchtemäßig, sommerwarm (Cfb)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: - Devon bis Jura über älterem Grundgebirge; Kalksteine, Oolithe, Dolomite, Ton-, Schluff- und Mergelsteine; Konglomerate - flach einfallende (3-4°) sedimentäre Senkenstruktur
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: (vgl. unten)

Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ sicheres Beispiel für aktive GW-Zirkulation in Teufen bis über 2km in Grossbritannien: - Thermalquellen in Bath (46,5°C) und Bristol (24°C) - GWN in den SW gelegenen Mendip Hills (u.a. in karbone Kalksteine, triassische Dolomite und Konglomerate) (ANDREWS et al. 1982) - Wässer sinken bis in ca. 2,7-4,3km Teufe (bei ca. 80°C) und steigen dann auf südlich einfal-lenden E-W streichenden Störungen auf (Zirkulation) - Wasseralter meist <10.000 Jahre; sind im chem. Gleichgewicht mit den karbonen Kalken, e-ventuell auch mit dem Old Red Sandstone - Speisung/Entlastung aufsteigender tiefer thermaler Wässer auch in flachere Aquifere vermu-tet (GW-Chemie) - mögliches Beispiel für Aufstieg und cross-formational flow in karbone Senkenstrukturen allg. (DOWNING et al. 1987)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: ▪ etwas tiefer ▪ verbreitet karbonatische Sedimente ▪ mässig tektonisch gestört ▪ weniger steiles Einfallen der Schichten am Beckenrand (3-4°) ▪ z.T. ähnliche Gesteinsalter (Karbon und Perm) und vergleichbare Sedimente
Literatur: ANDREWS et al. (1982), DOWNING et al. (1987); gut dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Sommerset Basin; Worcester Basin; South Wales Syncline (Coalfield)

2.4 Canning Basin

Lage: N-Western Australia, Australien
Kurzbeschreibung: sedimentäre Plattform-Senke; Mächtigkeit: im N-Teil bis 10km (Fitzroy Trough); im S-Teil (Kid-son & Willara Teilsenken) bis 5km; On-shore Ausdehnung: NW-SE Richtung: 800km, SW-NE: 670km
Klima: ▪ Steppe, heiß (BSh) bis Wüste, heiß (BWh) ▪ Niederschlag: >600mm im N bis <200mm in der Wüste; alle Flüsse periodisch ▪ Fitzroy River im N; Sand- und Küsten-Dünen in den übrigen Senkenteilen (Great Sandy Des-ert) ▪ Geologie und hydrogeologische Einheiten: <u>Geologie:</u> ▪ in mehrere NW-SE verlaufende strukturelle Teilsenken unterteilt ▪ diskontinuierliche Abfolge von Ordovizium bis Kreide als Produkte von Transgessions- und Regressionszyklen über kristallinem Proterozoikum; känozoische Bedeckung ▪ kontinental bis marin; z.T. evaporitisch (insbesondere in der südlichen Teilsenke) <u>Abfolge:</u> (GHASSEMI et al. 1990; LAU et al. 1987) ▪ PC: Kristallin ▪ O: Sandstein, Tonstein, Kalkstein, Dolomit, Tonstein/Kalkstein WL (marin) ▪ S: Ton-, Schluffstein, Dolomit, Evaporite (u.a. Salze) (marin/ evaporitisch/ sabkha)

▪ D: äolische Sandsteine (<u>Tandalgoos Red Beds</u>; Aquifer), Sandsteine, Pelite, Dolomite (Aquiclude), Evaporite, Kalke (marin bis evaporitisch; Aquiclude) ▪ K: Sand- Tonsteine (marin/sabkha bis fluviatil) ▪ P (+oberes K): marine bis randmarine Serie (<u>Grant Group</u>; Aquifer); Kalkstein (marin); <u>Poole Sandstein</u> (fluviatil; Aquifer); Tonstein (Aquiclude) / Kalkstein WL (marin); Sandsteine (marin bis fluviatil; Aquifer) ▪ untere TR (+ oberes P): Tonsteine (marin; Aquiclude); Sandsteine (fluviatil; Aquifer) ▪ oberer J: Sandsteine (<u>Wallal Sandstein</u>; marin bis Delta; Aquifer) ▪ untere KR: Schluff- Tonstein (marin; Aquiclude); Sandstein (<u>Broome Sandstein</u>; Delta; Aquifer) ▪ TE - rezent: Sandstein; Calcrete (Aquifer)
Grundwasserchemie, Isotopen: <u>Salinität:</u> (GHASSEMI et al. 1990) ▪ Zunahme der Salinität von der GWN (gering) entlang des Fließweges ▪ z.T. Einfluss von Evaporit-Lösung (S-D) und Meereswasser (Küstenbereich) ▪ Poole Sandstone (0,4 – 9g/L); Grant Group (0,27 - 37g/L); Tandalgoo Sandstein (2,8 – 27g/L) <u>GW-Temperaturen:</u> 30-84°C (Anstieg mit Tiefe; siehe unten) (GHASSEMI et al. 1990) ▪ sedimentäre Zn-Pb Sulfid Vererzungen in devonischen Riffkalken: bei 100-110°C aus hochsalinen Lösungen die entlang von Störungen aus tieferen Beckenteilen aufstiegen (ETMINAN et al. 1989)
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: (GHASSEMI et al. 1990) ▪ komplexe Aquifersysteme aufgrund von Erosionseffekten und von Tektonik ▪ Tandalgoo-, Poole- und Grant-Aquifere als wichtigste tiefe Aquifere ▪ allg.: GWN in S bzw. SW- Höhenlagen und Speisung der devonischen bis karbonischen Sandsteine ▪ diese sind hydraulisch durch erosiven Kontakt oder durch durchlässige Zwischenschichten verbunden; Rolle der Tektonik noch ungeklärt ▪ <u>Poole/Grant Aquifer</u> (K-P): GW-Fluss von GWN an südlichen und westlichen Ausstrichen in das Beckenzentrum; GWN auch durch hangendes Mesozoikum; Entlastung in den Ozean in NW; küstennah Salzwasserintrusion durch GW-Stände unter NN ▪ <u>Tandalgoos Aquifer</u> (D): GW-Fluss SE nach NW; GWN im S und SE aus hangend. Grant-Aquifer
Parameter: (GHASSEMI et al. 1990) ▪ Poole Sandstein (Fluviatile Sandsteine; P): P= 14 %; $k_f = 8,7 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$; $v = 0,2 \text{ m/a}$; T= 31-48°C ▪ Grant Group (marine Sandsteine; oberes K- unteres P): P= 11 %; $k_f = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$; $v = 0,2 \text{ m/a}$; T= 30-74°C ▪ Tandalgoo Sandstein (Red Beds; D): P= 17 %; $k_f = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$; $v = 0,4 \text{ m/a}$; T= 47-83°C
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: ▪ größer und tiefer ▪ breitere stratigraphische Spanne ▪ verbreitet auch marine Ablagerungen in K-T ▪ Schichtenfolgen des D-T bezüglich Lithologie, Teufenlage und hydraulischen Parametern z.T. mit dem Karbon/ Perm der VES vergleichbar (!)
Literatur: ETMINAN und HOOMANN (1989), GHASSEMI et al. (1990), LAU et al. (1987), TOWNER und GIBSON (1983); gering dokumentiert
Anmerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Great Artesian Basin (Australien)

2.5 Cheshire Basin

Lage: Cheshire, W-England, Grossbritannien
Kurzbeschreibung: Permo-triassische sed. Senke; Mächtigkeit: >3,5km (Basis Perm); N-S: ca. 65km, E-W ca. 60km
Klima: feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: <u>Abfolge:</u> ▪ tieferes (PC) Grundgebirge: am SE Rand anstehend; wechselt unterhalb der Senke (Krautongrenze) ▪ Karbon: über unterpaläozoischem kaledonischem Grundgebirge; meist kohleführendes Westfal (N); undifferenziertes Karbon insbes. am S-Rand ▪ Perm bis Unterer Jura: Schluff- und Tonsteine, Sandsteine, Dolomite, Konglomerate, Brekzien, Mergelsteine ▪ östlicher Senkenrand tektonisch vom Grundgebirge abgegrenzt; W-Rand sind stufenartig angeordnete Störungen möglich (DUFF et al. 1992)
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: (siehe unten)
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ regionaler GW-Fluss: allgemein von den topographischen Höhen im S und SE nach NW durch die Senke in das Mersey estuary ▪ <u>im Zentrum der Senke:</u> permotriassische Sandsteine in >3km Teufe mit Permeabilitäten von immer noch >10D (GALE et al. 1984) ▪ GW-Fluss bewegt sich jedoch vermutlich vorwiegend lateral um das Senkentiefe herum auf seitlichen noch höher durchlässigen Kluftzonen ▪ liegendes oberes Paläozoikum (Karbon) in den tiefsten Senkenteilen: ○ sehr geringe Permeabilitäten ○ GW-Fluss nach W gerichtet ○ lateraler cross-formational GW-Fluss aus karbonischen in triassische Folgen ▪ Wärmefluss: allg. gering – Hinweis auf fehlende aufsteigende GW (kein vertikaler GW-Fluss)
Parameter: permotriassische Sandsteine in >3km Teufe: Permeabilitäten von >10 D (GALE et al. 1984)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: ▪ ähnliche Größe ▪ Senkenränder ähnlich tektonisch gestört (W-Flanke stufenförmig abfallend) ▪ z.T. ähnliche Gesteinsalter (Karbon und Perm) und vergleichbare Sedimentgesteine
Literatur: DOWNING et al. (1987), DUFF und SMITH (1992), GALE et al. (1984); gering dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Carlisle Basin, Irish Sea Basin

2.6 Dacic Basin

Lage: S-Rumänien (Moesian Platform, Vorsenke der S-Karpaten und südliche E-Karpaten)
Kurzbeschreibung: Plattform-Senke und Vorsenke im Karpaten-Vorland zwischen Süd-Karpaten (alpidisch) und Donau; Mächtigkeit: - 6000m; N-S: bis 150km, E-W: ca. 450km
Klima: feuchtgemässigt, sommerheiß (Cfa)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: <u>Abfolge:</u> (nach N abtauchend) ▪ paläozoisches Grundgebirge; Granitintrusionen (-P) ▪ Sandsteine, Kalksteine, Dolomite (P-T; Aquifer) ▪ Konglomerate, Mergel (Unteres Miozän) ▪ Sandsteine, Mergel, Tuffe, Sandsteine, Mergel, Sande, Tone (Miozän-rezent; liegend zu hangend)
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: (GHEORGHE et al. 1993) <u>Moesian Plattform:</u> ▪ tiefreichende Aquifer-Komplexe ▪ gute Aquifere mit nach S zunehmenden Speicherkapazitäten und Porositäten ▪ nach N Abnahme, aber Verstärkung der Thermalfelder ▪ allgemein gleichmäßige Temperaturzunahme mit Teufe nach N abtauchende Aquifers und Thermalwässer im Sinne des Piston Flow Modells: ▪ im N: Wasserspiegel in mehreren 100m Teufe unter der Oberfläche ▪ im S: 180-200m (Craiova) und 70-80m (Bukarest) unter der Oberfläche im gleichen Aquifer <u>Karpaten-Vorsenke:</u> ▪ Thermal-Grundwasserleiter nur im W im Getic basin (Sandsteine und Sande) ▪ bei Caciulata artesische Thermalwasser in 200-3200m Teufe (Sandstein- und Konglomerathorizonte, Senon): 25-89°C mit 1,5 – 7L/s; aufgrund heterogener Geologie stark schwankend
Parameter: N-Teil: Porositäten 3-20 %, Permeabilität 10mD (GHEORGHE et al. 1993)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: Größer und tiefer; z.T. jüngere und unverfestigte Sed.; z.T. ähnliche Gesteine; Thermalwässer häufig
Literatur: GHEORGHE et al. (1993); gering dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Ungarische Senke

2.7 East Midland Basins

Lage: E-Midlands, E-England, Grossbritannien
Kurzbeschreibung: East Yorkshire und Lincolnshire Becken; Senke mit synsedimentärer Tektonik („growth faults“) über herz. Grundgebirge; Mächtigkeit: bis >5000m, N-S: >200km, E-W: ca. 150km (on-shore)

Klima:

feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb)

Geologie und hydrogeologische Einheiten:

Karbon bis Quartär über prä-karbonem herzynischem Grundgebirge; nach E unter die Nordsee einfallend, nach W sukzessive austreichend; nach N zunehmende Mächtigkeit; Beckenentwicklung von synsedimentärer Tektonik („growth faults“) begleitet

Abfolge:

- -D: prä-karbones Grundgebirge
- K: (1) Kalksteine (massiv, geschichtet und Riffkalke, aufgrund lokal guter Küftung lokal Aquifer); (2) Grobsandsteine mit Schiefertönen und Sdst. = Millstone Grit (meist Aquifer); relativ homogen; nicht im E und S, z.T. mit basalen Schiefertönen (Aquiclude), bis 1000m; (3) kohleführende Folgen (inhomogen) mit Sdst. und Schiefertönen (z.T. Aquifer), bis >1400m (bis >4000m); allg. meist Aquiclude und Aquitard
- P: basale Sandsteine (Aquifer) und hangende Pelite mit Evaporiteinlagerungen (Aquiclude)
- T, untere: Sandsteine (Sherwood Sandstone, untere T)
- J, mittlerer/ Bajoc: Kalkstein (Lincolnshire Limestone) und hangende Klastika
- Q: glaziale Sedimente

Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen:

Karbon: i.d.R. geringe Porositäten und Durchlässigkeiten; GW-Fluss meist an lokale Kluft- und Störungszonen, insbes. in den liegenden Kalksteinen, gebunden (GALE et al. 1984b); höhere Permeabilitäten in hangenden Sandsteinen (DOWNING et al. 1987)

- In den Ausstrichen der Folgen oft hohe GWN und Speisung hangender Schichten
- Zunahme der Mineralisation von GW im Karbon vom Liegenden zum Hangenden und nach N: Kalkstein (>99g/L); Grobsandstein (>180mg/L) und kohlenführende Schichten >200g/L TDS (DOWNING et al. 1969)
- in den inhomogenen kohleführenden Schichten sehr variable Salinitäten auf engem Raum – Hinweis auf komplizierte wechselhafte hydraulische, z.T. stagnierende Verhältnisse (DOWNING et al. 1987)

Trias:

- Sherwood Sandstone: pleistozäne Oberflächen- Wässer mit extrem geringen Cl-Gehalten (<10mg/L Cl (!)) bis E von Lincoln; Isotopen und Paläotemperaturen (Gas-Analysen) belegen pleistozäne Herkunft (BATH et al. 1979; EDMUNDS et al. 1982; ANDREWS et al. 1984)
- unterhalb der Nordsee mit Teufe zunehmende Mineralisation (35g/L im Hangenden und 80g/L im Liegenden des Sherwood Sdst.

Jura-rezent:

- Zunahme der GW-Alter (rezent bis pleistozän) entlang des Gradienten
- Chemie weist auf komplizierte Lösungs-/Fällungsreaktionen zwischen den GW und Gestein hin (DOWNING et al. 1977)

Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik:

- Herkunft der hochmineralisierten Wässer aus Diagenese-Prozessen durch Filtration durch Tonsteine = semipermeable Membranen vermutet (DOWNING et al. 1969)
- Änderung dieser (hohen) Hintergrund-Mineralisation durch Zumischung/ Verdünnung durch jüngere meteorische Wässer (Indikation für aktives GW-Fluss System) (DOWNING et al. 1987)
- Sherwood Sandstone: meteorische junge (Isotopen) Wässer; Salinität (siehe oben) z.T. durch Diffusion und Austausch-Reaktionen mit Evaporiten in Liegendem Perm (geringes (Br/Cl-Verhältnis) und durch Migration aus Karbon (DOWNING et al. 1985)

<u>Hydraulik:</u> ▪ regionaler GW-Fluss (insbes. in den liegenden karbonen Sdst.) in Richtung E (Nordsee) ▪ im S mit Übergang von GW aus Unter- in Oberkarbon (Kalkstein – Millstone Grit – kohleführende Schichten) über Perm weiter in hangendes Mesozoikum vermutet (DOWNING et al. 1987); insbesondere dort wo trennende Tonschiefer (siehe oben) fehlen ▪ thermische Anomalien (erhöhter Wärmefluss) zeigen aufsteigende (wärmere) Wässer in permischen Sandsteinen und Mesozoikum an (DOWNING et al. 1987) ▪ tieferreichende Zirkulation in liegenden karbonen Kalken durch Auftreten thermaler Wässer (15,5 – 27,7°C) (DOWNING et al. 1987) meteorischer Herkunft (EDMUNDS 1971) nachgewiesen ▪ hydraulische Parameter sind in den kohleführenden Folgen dabei sehr variabel (siehe oben) ▪ Sherwood Sandstone: (regionaler) GW-Strom abwärts entlang Schichtung mit (Aufwärts-) Infiltration in hangendes Mesozoikum (Wärmeanomalien bis off-shore beobachtet, ANDREWS-SPEED et al. 1984) und Infiltration aus liegendem Perm/ Karbon möglich; mit Teufe zunehmende Dichteschichtung erwartet (mit der Teufe steigende Mineralisation und abnehmender GW-Fluss (Permeabilitäten)) ▪ flacherer intermediärer GW-Fluss in karbonen bis triassischen Schichten, der von den Entlastungszonen (GW-Spiegeln) des Trent Valleys (S) und des Vale of York (N) kontrolliert wird ▪ oberflächennaher z.T. lokaler GW-Fluss entlang des Gradienten in den jurassischen Kalken (hohe Permeabilitäten in Grenzbereichen) unter gering-permeabler Bedeckung
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: ▪ etwas größer und tiefer ▪ z. T. off-shore ▪ verbreitet karbonatische Sedimente im Liegenden ▪ nur wenig tektonisch gestört ▪ hydraulische Leitfähigkeiten sind teilw. mit denen in ungestörten Bereichen der VES vergleichbar
Literatur: ANDREWS et al. (1984), ANDREWS-SPEED et al. (1984) ; BATH et al. (1979), DOWNING et al. (1977), DOWNING et al. (1985), DOWNING et al. (1987), DOWNING und HOWITT (1969) EDMUNDS (1971), EDMUNDS et al. (1982), GALE et al. (1984), GOFF und WILLIAMS (1987); mässig dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: E-Anglia Basin; London Basin; North Sea Basin

2.8 East Anglia Basin

Lage: SE-England, Grossbritannien
Kurzbeschreibung: Senkenstruktur zwischen E-Midland basins in N und London-Basin in S; Ausdehnung: ca. 80*80km on-shore
Klima: feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb) Geologie und hydrogeologische Einheiten: Mesozoikum bis Quartär ausstreichend; Untergrund auch Karbon über prä-karbonem herzyni- schem Grundgebirge; nach E unter die Nordsee einfallend <u>Abfolge:</u> ▪ Greensands (obere U-KR und untere O-KR) ▪ Chalk (upper und lower) (O-KR) ▪ Eozän ▪ Pleistozän
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: <u>Greensands und Kalke:</u> ▪ Salinität: Lower Greensands bis >0,5g/L; Kalke bis 20g/L (im Liegenden, BATH et al. 1981) ▪ Abfluss meist nach N (Wash) ▪ Unterteilung in jüngerer und älterer GW mit zunehmender Salinität/ Alter nach E ▪ Kalke als dominierende hydrogeologische Einheit (EVANS et al. 1979) ▪ entlang der Küste: Überlagerung der Kalke mit Eozän und Pleistozän; GW in den Kalken sind höher mineralisiert und haben Druckspiegel unterhalb des Meerspiegels (DOWNING et al. 1987) ▪ allg.: Anstieg der Salinität mit der Teufe ▪ Abweichungen = (1) Einfluss von Diagenese während Versenkung; (2) durch Diffusion (nach Modell in 3 Mio. J. möglich) oder (3) durch Zufuhr meteorischen Wassers als Folge von Hebungen ▪ Isotopenprofile (allmähliche Zunahme von $\delta^{18}\text{O}$ mit der Teufe) schliessen (3) eher aus (DOWNING et al. 1987)
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: <u>Hydraulik:</u> ▪ GW-Spiegel im Greensand tiefer als in den Kalken ▪ GW-Fluss bevorzugt in den Kalken und im Pleistozän, weniger durchlässiges Eozän ▪ in den Kalken: GW-Abfluss vor allem in den oberen 50m und entlang höher permeabler linearer Strukturen, die Flusstäler nachzeichnen (LLOYED et al. 1981; BATH et al. 1985)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: ▪ ähnliche Größe; in N (E-Anglia Basin) und S (London/ Thames Basin) in ähnliche Senkenstrukturen übergehend ▪ z. T. off-shore ▪ verbreitet karbonatische Sedimente im Liegenden ▪ nur wenig tektonisch gestört
Literatur: EVANS et al. (1979), DOWNING et al. (1987), BATH und EDMUNDS (1981), LLOYED et al. (1981), BATH et al. (1985); mässig dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: E-Midland basins (N); London/ Thames Basin (S); North Sea Basin

2.9 Hampshire und Wessex Basin

Lage: S-England, Grossbritannien (Hampshire, Dorset, West Sussex)
Kurzbeschreibung: Teil des Dieppe Basins (English Channel); Senken über herzynischem Grundgebirge; W= Hampshire Basin, E= Wessex Basin; Mächtigkeit: ?, N-S: ca. 80km (on-shore), E-W: ca. 280km
Klima: feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: Anlage über dem herzynischen strukturellen Wessex Basin; vorwiegend Kreide (Chalk) und TE ausreichend; im Untergrund und W auch P bis J
Abfolge: ▪ Pre-Perm (O-OK; Grundgebirge; i.d.R. Aquiclude (ALLEN & HOLLOWAY 1984)) ▪ Sandsteine, Brekzien, Mergelsteine (P) ▪ Sherwood Sandstone mit konglomeratischer Basis (untere T; 50- >250m; guter Aquifer in W-Teil; (ALLEN & HOLLOWAY 1984)) ▪ Mercia Mudstone (obere T) ▪ Kalksteine (mittl. J, Bajoc; i.d.R. Aquifer) u.a. ▪ Corallian (Sdst., oberer J, oberes Oxfordian) u.a. ▪ Kimmeridge Clay (oberer J, Kimmeridgian) u.a. ▪ Wealden (unterste KR) ▪ Lower Greensands (untere KR, Apt; i.d.R. Aquifer) ▪ Gault Clay (untere KR, Mittel-Oberalb) ▪ Upper Greensands (obere KR, Cenoman) ▪ Chalk (Kalke) (oberste KR, Cenoman-Senon; Haupt-Aquifer) ▪ TE: London Clay (unteres Eozän) u.a.
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen, Herkunft salinarer Wässer: ▪ Salinität: generell mit Teufe ansteigend (bis 300g/L; EDMUNDS 1986) ▪ GW im Sherwood Sandstone (Ausstrich im W, nach E abtauchend): Salinität <50 - >250g/L; mit Teufe ansteigend; <u>typisches Beispiel für Dichte-Schichtung in einem mächtigen homogenen Aquifer</u> ▪ Salinität mit Evaporitvorkommen im hangend. Mercia Mudstone korrelierbar (LOTT et al. 1982) ▪ Verbreitung auch durch Diffusion möglich ▪ Dichteschichtung bei relativ stagnierenden GW-Verhältnissen vermutet
Tendenzen: (EDMUNDS 1986; DOWNING et al. 1987) ▪ <u>Isotopie:</u> progressive Zunahme von $\delta^{18}\text{O}$ mit zunehmender Salinität im Wessex Basin (Sonderstellung gegenüber anderen britischen Senken) ▪ Abnahme Br/Cl mit zunehmender Salinität (Hinweis auf nicht-marine Herkunft der Wässer) ▪ Verweilzeiten von 15 Mio. J. oder mehr nachgewiesen (^4He) (ANDREWS 1987)
Genese der salinaren Wässer: ▪ Periodische Mischung salinarer Wässer (aus Evaporiten ? – z.B. dem Mercia Mudstone) mit Wässern meteorischer Isotopensignaturen ▪ Ultrafiltrationsprozesse: Zurückhaltung schwererer Isotope bei Wasser-Gestein Interaktion (COPLEN et al. 1973) ▪ Antrieb durch cross-formational GW-Fluss (durch topographisch oder tektonisch (alpidisch) induzierte overpressures) und durch Anstieg des geotherm. Gradienten (DOWNING et al. 1987)

Hydraulik: ▪ natürliche Entwässerung in Richtung S (English Channel) ▪ bei TE-Bedeckung kaum wesentlicher GW-Fluss in tieferen Schichten ▪ im W-Teil des Beckens: lokaler GW-Fluss in Richtung Oberflächendrainage (W-E); tieferer intermediärer bis regionaler GW-Fluss in N-S Richtung vermutet ▪ Regionaler GW-Strom: GW-Spiegel in hangender KR lenken GW im Sherwood Sandstone nach S ab ▪ GWN in die Sandsteine nur cross-formational oder über den Mere Fault im N aus jüngeren Schichten; Entlastung durch langsamen Aufwärts-Strom in Depressionen des Hampshire Basin (erhöhter Wärmeffluss !) (DOWNING et al. 1987) ▪ Purbeck-Isle of Wight Störung: Versetzung des Sherwood Sandstone (T) u.a. gegen Kimmeridge Clay (J): Begrenzung des laterale GW-Flusses in den Sdst. (erhöhter Wärmeffluss durch aufwärts fliessende GW) (DOWNING et al. 1987)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: ▪ etwas größer ▪ z. T. off-shore ▪ verbreitet karbonatische Sedimente ▪ leicht tektonisch gestört ▪ Sand- und Tonstein-Folgen z.T. vergleichbar ▪ Störungen als hydraulische Barrieren
Literatur: ALLEN et al. (1984), ANDREWS (1987), DOWNING et al. (1987), EDMUNDS (1986), LOTT et al. (1982); mässig dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: E-Midland basins; London/ Thames Basin; East-Anglia Basin

2.10 Illinois Basin

Lage: Illinois (Kentucky, Indiana), U.S.A.
Kurzbeschreibung: intrakratonische Senke (Plattform); Mächtigkeit: -4300m, nach S zunehmend; oval in NNW-SSE Richtung: 450km, WSW-ENE: 320km
Klima: feuchtgemässigt, sommerheiß (Cfa)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: ▪ von Sätteln in W und S abgegrenzt, nach E in Plattform-Sedimentation übergehend ▪ Sedimentation von spätem Kambrium bis Oberkarbon (Pennsylvanian) über kristallinem Grundgebirge erhalten; im Post-Unterperm uplift, Beckenschliessung und Erosion permischer Sedimente
Abfolge: Karbonate und Quartz-Arenite (C,O); Karbonate (S,D,UK); Wechsellagerung von Sand-, Ton-, Schluff- und Kalkstein; vorwiegend marin
▪ keine Salzablagerungen, Gips und Anhydrit nur untergeordnet in Karbonaten (UK); GW-führung in den zahlreichen Sand- und Kalksteinhorizonten, insbes. in den Prä- Ober Mississippian Folgen, in Verbindung mit Gas und Öl

Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen:

Tiefe Grundwässer:

- starke Abreicherung von K, Mg, und SO_4 ; leichte Abreicherung von Na; Anreicherung von Ca im Vergleich zu Meereswasser
- mit zunehmender Teufe Wechsel von HCO_3 - SO_4 über Na-Cl zu Na-Ca-Cl Wässern
- Salinität zwischen 4,2 und 232g/L; vom Beckenrand zum Zentrum, mit Teufe und in Fallrichtung entlang der Schichtung in Richtung Beckenzentrum zunehmend; die Zuwachsrate verringert sich mit zunehmender Teufe
- starke Schwankungen in TDS, Sr und $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ auch innerhalb einzelner Schichtenfolgen/ auf engem Raum aufgrund wechselnder Lithologie und hydraulischer Barrieren

Korrelationen:

- Salinität -Teufe: schlecht, schwach positiv; Salinität-Sr-Konz.: keine; Salinität - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ leicht negativ; Salinität - Stratigraphie: keine; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - Stratigraphie: keine; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - Teufe: keine; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – Sr: keine bis schwach negativ

Strontium:

- generell $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Wasser und zugehörigem Gestein oft unterschiedlich; insbes. in Karbonaten – meist nicht im Gleichgewicht: lokal unterschiedliche Chemie und Isotopie
- Sr-Gesamtkonzentrationen: 1,7 – 908mg/L; max. Schwankung: 1964: 258, 1984-86: 281-286mg/L
- Wässer generell mit wenigen Ausnahmen höher radiogen als histor. Meerwasser (S-D $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ca. 0,7088 – 0,7078)
- allg.: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in silikatischer Matrix hoch; in karbonatischer Matrix geringer
- ^{87}Sr - aus Detritus (**Tonminerale**, Muskovit K-Feldspat z.B. aus Albany shale) vermutet
- Karbonate: Wässer mit histor. Meerwasser $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, radiogenes Sr in Karbonaten andernorts bekannt (McNutt et al. 1987)
- Klastika: höhere $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, da hohe Rb/Sr; Tonschiefer: deutlich erhöhte $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; Sandsteine: erhöhte $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; Ursache: **Tonminerale** der Matrix, Muskovit, K-Feldspat

Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik:

- **2+X Komponentenensystem:** Mix von in situ-Meerwasser mit Oberflächenwasser und Wässern anderer hydrogeologischer Einheiten; in situ weitere lokal Zuströme/ Mischungen
- Perioden mit regionalem GW-Fluss und weiträumiger Öl-Migration
- Numerische Modelle bestätigen weiträumige laterale Migration von Fluida während der Heraushebung des Pascola arcs (im W des Beckens)
- Aufwärts-Migration am Beckenrand durch gravitativ induzierten Fluss
- dabei Mischung/ Mix/ Strömung vertikal und lateral über Schichtgrenzen hinaus („cross-formational“)
- lokal aber schichtgebundene isolierte Wässer aufgrund struktureller und stratigraphischer Fallen (hydraulischer Barrieren)
- Devon und Silur bilden eine mächtige hydraulisch gekoppelte (hydrogeologische) Einheit
- nach Modell: in-situ Meerwasser bis über 10 Mio. J. im System erhaltbar; nach 200 Mio. J. (Heraushebung) müssten in-situ Wässer jedoch „ausgespült“ sein (RANGANATHAN 1993)

Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES:

- breitere stratigraphische Spanne
- Senke kaum tektonisch gestört
- Größer und tiefer; Senkenflanken fallen meist flacher ein
- vorwiegend marine Schichtenfolgen; auch Karbonate
- Öl-Generation u.a. in den New Albany shales (OD)
- hydraulische Leitfähigkeiten sind vermutlich größenordnungsmäßig mit denen in ungestörten Bereichen der VES vergleichbar

Literatur: BARROWS und CLUFF (1984), BETHKE (1986), BETHKE et al. (1986), BURKE et al. (1982), GRAF et al. (1966), HANOR (1979, 1983), MC Nutt et al. 1987; (MCINTOSH et al. 2004), MEENTS et al. (1952), RANGANATHAN (1993), STUEBER A. M. et al. (1987), SLEEP et al. (1980), WILLMAN et al. (1975); gut dokumentiert
Anmerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Forest City Basin (u.a. W-Missouri), Arkoma Basin (u.a. N-Arkansas)

2.11 Kufra Basin

Lage: Libyen, Tschad, (Sudan, Ägypten), NW-Afrika
Kurzbeschreibung: randkratonische Senke zwischen afrikanischem Kraton und Tethys mit diskordanten Schichtenfolgen und leichter Bruchtektonik (SW-NE); Mächtigkeit: -3000m, NW-SE: 500km
Klima: Wüste, heiß (BWh)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: ▪ Arides Klima; Niederschläge zwischen 1,3 mm im Senkenzentrum (Kufra) und 50-100mm in den umgebenden Hochländern (Tibesti u.a.); Vegetation und natürliche GW-Austritte nur in einigen Wadis bzw. Oasen; ▪ von post-herzynisch herausgehobenen kristallinen Satteln abgegrenzt; mehrfache epirogene Hebungen und Senkungen mit resultierender Sedimentation und Erosion und Bruchtektonik ▪ Kambrium-Kreide: an W- und N-Rand Ausstriche von jüngeren Sed. diskordant überlagert; Anstehendes: Sand, Schotter oder Festgestein; seit UKR vorwiegend Erosion und Transport in nördl. angrenzendes Sirte Basin Abfolge: gefaltete Metamorphite und Granite (PC); kontinentale bis marine Sdst. und schluffige Tonsteine (-700m, C-O); marine Sdst. und Schwarzschiefer (-90m, S); marine schluffige Tonsteine (-200m) und kont. Sdst. (-100m, D); kont. Sdst. und z.T. marine Tonsteine (-800m, K); limnische und fluviatile Sdst., untergeordnet Tonsteine und Kongl. (-900m = Nubischer Sdst, P-UKR.); Sand, fossile Böden, Sabkha-Sed. (-100m, Quartär - rezent)
Hydrogeologische Einheiten: ▪ Post-Eozäne Aquifere: a) Unter- und Mittelmiozäner/ Oligozäner Aquifer, b) Post-Mittelmiozäner Aquifer ▪ Nubian Aquifer: regional, senkenübergreifend; im Bereich der Kufra Senke bis 800m mächtig; Flurabstände 0 bis mehrere 10er m; geringe Gradienten; trotz zwischengeschalteter Ton- und Tonsteinlagen hydraulische Einheit über gesamte Teufe ▪ Liegende paläozoische Sdst.-Aquifere: vermutl. geringe k_f-Werte; häufig silifiziert
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: gute Qualität, warm, schwefelhaltig; z.T Fe-Gehalte bis 100mg/L im N-Teil

Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ regionaler GW-Fluss von SW – NE bzw. von S – N; geringe Gradienten ▪ GWN: in Hochlagen am Senkenrand (ca. $5\text{ m}^3/\text{s}$) und GW-Zustrom aus S (Menge unbekannt); GW-Abfluss: Oasen ($22,4\text{ m}^3/\text{s}$) ▪ GW-Abstrom nach N und NE (ca. $6\text{ m}^3/\text{s}$) – kein hydraulisches Gleichgewicht ▪ Hydraulische Kontinuität innerhalb des nubischen und zwischen nubischem und post-eozänen Aquiferen; letztere werden von der Diskordanz an der Grenzfläche beider Einheiten bestimmt – i.d.R. gute Anbindung; hohe horizontale und vertikale Durchlässigkeiten = konstante Druckspiegel in allen Teufen ▪ senkenzenzentrale NW – SE Wasserscheide ▪ GW-Alter: bei Kufra (Senkenzentrum): 24.000 - 33.000a
Parameter: Transmissivitäten (allg. Nubischer Aquifer): $1,8 \cdot 10^{-1} - 4,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ($k_f = 2,3 \cdot 10^{-4} - 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$); bis 300m Teufe: $T = 2,3 \cdot 10^{-4} - 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ($k_f = 7,7 \cdot 10^{-7} - 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$); bis 500m Teufe: $T = 2,0 \cdot 10^{-2} - 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ($k_f = 4 \cdot 10^{-5} - 8,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: arides Klima; größer; Senkenflanken fallen deutlich flacher ein; Senke wenig tektonisch gestört; Schichtenausstriche in N und W diskordant überlagert; geringer (topographisch induzierter) hydraul. Gradient; hydraulische Leitf. sind mit denen in ungestört. Bereichen der VES vergleichbar
Literatur: AHMED (1983), FISK et al. (1976), HELLSTROM (1940), KLITZSCH (1971), SANDFORD (1933), WRIGHT (1986), wenig dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Sirte Senke, Tschad Becken, Mittelmeer-Nil Senke

2.12 Llano basin

Lage: Kolumbien, Südamerika
Kurzbeschreibung: Orogen-Vorland Senke zwischen dem präkambrischen Schild von Guyana (E) und der Cordilliere Oriental (W), Mächtigkeit bis >5000m im W
Klima: Savanne (Aw) bis tropischer Regenwald (Af)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: ▪ nach NW abtauchende Senke (bis -4900m an der Überschiebungsgrenze im NW) ▪ Wechsellagerung von Fein- bis Grobklastika (Aquifere bis Aquitarde) ▪ Überschiebungsflächen am W-Rand der Senke
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: <u>Bsp. Mirador-Guadalupe Aquifer-System:</u> Sandstein Aquifer begrenzt von Tonschiefer-Aquitarden ▪ Mineralisation: relativ gering in allen Teufen ; $<20\text{ mg/L}$ (VILLEGAS et al. 1994) ▪ Dichte : Abnahme mit Teufe (Temperatur-Zunahme bei gleichbleibender Mineralisation); 0,98 (E) auf $<0,94\text{ g/cm}^3$ in über 5000m Teufe (W) (BACHU und MICHAEL 2002)

Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ GW-Fluss meist in Fallrichtung des Aquifers entsprechend Druckgradienten ▪ aufgrund der Dichteabnahme (!) mit Teufe, spielen Trägheitseffekte (sind nach oben, also meist entgegen Fall- bzw. topographisch induzierter GW-Fließrichtung gerichtet) eine wichtige Rolle – insbes. in westlichen Beckenteilen mit geringem Gradienten ▪ Wirkung: Verstärkung bzw. Umkehrung des topographisch induzierten GW-Flusses (BACHU 1995)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: junge unsymmetrische Senke; größer und deutlich tiefer; ähnliche relativ gering mineralisierte Tiefenwässer
Literatur: BACHU (1995), VILLEGAS et al. (1994); mässig dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken:

2.13 London Basin

Lage: SE-England, Grossbritannien
Kurzbeschreibung: Teil des Thames / Southern North Sea Tertiary Basin; tertiäre Senke diskordant über Grundgebirge; Mächtigkeit: ?, N-S: ca. 100km, E-W: ca. 150km (on-shore)
Klima: feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: <u>Abfolge:</u> ▪ Kalksteine (mittl. J, Bajoc; Aquifer) ▪ Corallian (oberer J, oberes Oxfordian; vorwiegend Kalksteine; z.T. Aquifer) ▪ Kimmeridge Clay (oberer J, Kimmeridgian) ▪ Lower Greensands (untere KR, Apt; Aquifer) ▪ Gault Clay (untere KR, Mittel-Oberalb) ▪ Upper Greensands (obere KR, Cenoman) ▪ Chalk (Kalke) (oberste KR, Cenoman-Senon; Aquifer) ▪ TE: London Clay (unteres Eozän) u.a. ▪ Pleistozän
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: ▪ allgemein geringe GW-Alter (deutlich kleiner 25.000 Jahre) (EDMUNDS 1976) ▪ $\delta^{18}\text{O}$ und Deuterium- Werte sind höher als in den E-Midland Basins (Sherwood Sdst.): Beleg für postglaziale Wässer und GW-Fluss auch in weniger durchlässigen (z.B. Tal-fernen) Bereichen (DOWNING et al. 1987) ▪ im W Porenwässern (gespannte GW) mit bis zu 7g/L Cl (EDMUNDS 1976); leicht saline Wässer auch im freien GW im W des Beckens nachgewiesen – Mischung zwischen meteorischen und salinen Wässern weiter fortgeschritten als in den E-Midlands basins, aber nicht abgeschlossen (EDMUNDS et al. 1973)

Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik:Hydraulik:

- natürliche Entwässerung in Richtung S bis E (Thames-Tal und Estuary) (WATER RESOURCES BOARD 1972)
- ursprünglich (vor Wasserhaltung) Artesik in Bereichen wo London Clay jurassische Kalke und älteres Tertiär überlagert
- da Druckspiegel in den liegenden Folgen i.d.R. höher als im Chalk, z.T. noch leakage pleistozäner Wässer vom Lower Greensand über Gault in den Chalk (EVANS et al. 1979; MATHER et al. 1973) der in einem regionalen cross-formational GW-Fluss im Liegenden des oberen Jura resultiert
- Corallian: in Ausstrichbereichen GW-Fluss in Fallrichtung - in gespannten Abschnitten des Aquifers auch aufwärts gerichteter GW-Fluss (ALEXANDER und BRIGHTMAN 1985) aufgrund der niedrigeren Druckspiegel im überlagernden Chalk
- die entgegengesetzten Strömungen treffen sich dabei an der Basis des hangenden Kimmeridge Clay (Nachweis durch Isotopen)
- Intensität und Richtung des intermediären GW-Fluss ist hier stark abhängig von den Druckspiegeln und den relativen Permeabilitäten der Schichtenfolgen (ALEXANDER und BRIGHTMAN 1985) und damit auch stark vom Relief (Tal und Kamm-Landschaften der ausstreichenden mesozoischen Gesteine)

Durchlässigkeiten:

- GW-Fluss im Chalk i.d.R. auf die oberen 50m beschränkt – in größeren Teufen stark abnehmende Permeabilitäten (WATER RESOURCES BOARD 1972; OWEN und ROBINSON 1978)
- starke Heterogenität der Transmissivitäten – hohe Durchlässigkeiten vor allem im Bereich von Flusstälern (DOWNING et al. 1987)
- im Zentralteil und an der Südflanke des London Basin ($T = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) deutlich geringere Transmissivitäten als im Ausstrichbereich (WATER RESOURCES BOARD 1972; MOREL 1979)

Parameter:

Kalkstein-Folgen (J): $T = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (tiefer Bereiche = Zentral- und S-Teil des London Basin)

Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES:

- etwas größer
- z. T. off-shore
- verbreitet karbonatische Sedimente
- nur wenig tektonisch gestört

Literatur:

DOWNING et al. (1987), EDMUNDS (1976), EDMUNDS et al. (1973), EVANS et al. (1979), MATHER et al. (1973), MOREL (1979), OWEN et al. (1978), WATER RESOURCES BOARD (1972), ALEXANDER et al. (1985); mässig dokumentiert

Bemerkungen:

benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: E-Anglia Basin; Hampshire Basin; E-Midland Basins

2.14 Midland Valley

Lage: Midland Valley, Schottland, Grossbritannien
Kurzbeschreibung: = Midland Valley Basin Strukturelle kaledonische Senke mit jungpaläozischer Füllung zwischen Highland Boundary Fault (N) und Southern Upland Fault (S); Mächtigkeit: >5000m; SW-NE: ca. 190km, SE-NW: -75km
Klima: feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: - alluviale sedimentäre Senke mit marinen Einschaltungen (marine Ingressionen) Abfolge: (ANDERTON et al. 1993; CRAIG 1991; DUNNING et al. 1978 ; BGS 1993): - kaledonisch konsolidiertes Grundgebirge (Plutonite, Metamorphite (Schiefer u.a.) Grauwacken, Sandsteine bis Tonsteine im Untergrund, z.T. anstehend; -S) - D: Lower (bis >3500m) und Upper Old Red Sandstone (200-900m, feinklastischer): Konglomerate, Sandsteine, Schluffsteine, basische bis saure Vulkanite (Kalk-alkalisch, andesitisch, rhyolitisch, basaltisch; Tuffe, Agglomerate, Laven) z.T. in WL mit den Klastika, insbesondere im Lower Old Red Sandstone -K: karbone Kohlenfolgen mit Kalk- Sand und Schluffstein-Horizonten, Vulkanite
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: siehe unten
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: - sehr komplexe GW-Strömungsverhältnisse - oft lokale GW-Fluss Systeme aufgrund engräumig wechselnder geologischer Verhältnisse - generell Ausbildung topographisch bestimmter Einzugsgebiete und Drainage in die zugehörigen Vorfluter - im Zentralteil des Midland Valley lokal Nachweis überdurchschnittlichen Wärmeflusses ($>60\text{mW/m}^2$) – Indiz für Infiltration aus tieferen Horizonten (vertikaler GW-Fluss), jedoch noch unsicher (DOWNING 1987) - in vielen der aufgegebenen Kohlengruben sind die ursprünglichen GW-Spiegel wieder eingestellt bzw. stellen sich ein Permeabilitäten: - Old Red Sandstone: signifikante Permeabilitäten im Zentrum des Beckens, insbesondere in der Knox Pulpit Formation vermutet (BROWNE et al. 1985) - Karbone Folgen: vorzugsweise kluftgebundener lateraler GW-Fluss da Wechsellagerung von Kalk-, Sand- und Schluffsteinen (DOWNING et al. 1987)
Parameter: Wärmefluss im Zentrum des Beckens z.T. überdurchschnittlich ($>60\text{mW/m}^2$)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: - größer - karbone Kohlenfolgen (Steinkohle) und verbreitet Kalksteine - tektonisch gestört - heterogener Aufbau - z.T. vergleichbare Sedimente
Literatur: ANDERTON et al. 1993 ; BROWNE et al. (1985), CRAIG (1991), DOWNING et al. (1987)
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Orcadian Basin, Northern Ireland Permo-Triassic Basin

2.15 Münster Becken

Lage: NW-Deutschland; nördl. der Ruhr im Bereich der Flüsse Ems und Lippe
Kurzbeschreibung: assymetrische, trapezförmige Senkenstruktur; Kreidesenke; Mächtigkeit: <3000m; Ausdehnung: N-S: ca 80km, E-W: bis 150km
Klima: feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb); 680 -1200mm mittl. jährl. Niederschlag; mit Höhe zunehmend Geologie und hydrogeologische Einheiten: Höhenlage Beckenfüllung zwischen >400m und <2500m; Landoberfläche nach W und NW abfallend; Ausbildung von 4 wichtigen hydrogeologischen Einheiten (1) – (4) <u>Abfolge:</u> (MICHEL et al. 1985) (1) variszisch gefaltetes Paläozoikum und seine mesozoische, präkretazische Bedeckung: vorwiegend kristalline Schiefer, Grauwacken, Sandstein, Schluffstein, Tonstein und Mergelstein (meist Aquitard oder Aquiclude; nur lokal Aquifer; bis mehrere 1000m mächtig) (2) Untere Kreide: vorwiegend Kalkstein und Sandstein (basaler Aquifer; bis 400m mächtig) (3) „Emscher Mergel“, mittl. Coniac und Unteres Santon: Mergel- und Tonsteinfoolge (Aquiclude; bis 800m mächtig) (4) Obere Kreide – Quartär: oberflächennahe nicht flächendeckend verbreitete sehr heterogene Sedimentfolgen (z.B. Sande, glaziale Serien) die zahlreiche mehr oder minder isolierte lokale bis intermediäre Aquifer/Aquitard-Systeme bilden (einige Zehner bis Hunderte m mächtig) ▪ BODE (1964) und KARRENBURG (1974) beschreiben das Münster Becken als mehr oder minder einheitliches hydrogeologisches System ▪ MICHEL (1963, 1983) beschreibt die Hydrochemie mit besonderer Berücksichtigung der Süßwasser-Salzwasser Trennschicht
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: ▪ hoch mineralisierte GW in Steinkohlenbergbau aufgeschlossen (MICHEL et al. 1985) ▪ Temperatur und Salinität steigen mit der Teufe
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: verschiedene übereinander gelagerte und z.T. miteinander kommunizierende GW-Fluss Systeme (MICHEL et al. 1985): ▪ weitreichendes regionales GW-Fliess System: meist in basalem Aquifer (2); Karstanbindung ▪ verschiedene kleiner sub-regionale Systeme die meist isoliert voneinander auftreten (Haltern-Kreide, Obere Ems-Ebene, Osning-Vorland) ▪ zahlreiche lokale GW-Flusssysteme meist mit direkter Anbindung an die Oberflächenwasserkreisläufe <u>Regionale GW-Fluss-Systeme:</u> ▪ GWN entlang der Ausstriche der unteren Kreide an der Grenze zu den liegenden Aquitarden im NE ▪ tertiäre Bedeckung in W fungiert als GW-Barriere ▪ extreme Absenkung des GW-Spiegels von 20m ü. NN auf ca. 1200m u. NN im Jahre 1985 (MICHEL et al. 1985) ▪ MICHEL et al. (1985) unterteilen regionalen GW-Strom in 2 Sub-Systeme:

(1) randliche Gebiete mit hohem GW-Umsatz, z.T. im Karst; Neubildung direkt aus Niederschlägen; Entlastung durch Überlauf-Quellen bei Kontakt mit dem stauenden „Emscher Mergel“; junges Süßwasser; GW-Spiegel phreatisch bis gespannt/ artesisch bei Mergelüberdeckung (2) zentrale Senkenteile mit geringem GW-Umsatz und sehr geringen Fließgeschwindigkeiten (Ausnahme: hohe Gradienten und Geschwindigkeiten bei Bergbau-Einfluss); hochmineralisierte, alte Wässer; Temp. und Mineralisation mit Teufe steigend; sehr geringe GWN; Entlastung als mehr oder minder mineralisierte Quellen am Kontakt Kalkstein/Emscher Mergel und diffus entlang von Störungszonen sowie durch den Berbau (!); immer gespannte oder artesische GWL ▪ beide Systeme sind in der Regel hydraulisch verbunden und im Gleichgewicht, wobei (1) die (2) überlagert ▪ Gleichgewicht = dynamisch: Veränderung mit Zeit in Abhängigkeit von Wasser- und Druckspiegelverteilung, GWN und Entlastung; Indikator = Salzwasser/Süßwassergrenze ▪ Auftreten von Salz- und Süßwasser am Kontakt Kalkstein/Emscher Mergel auf engstem Raum ▪ Salzwasserfront zieht sich vom Ausstrich des Emscher Mergel unter diesen zurück; Kontakt allmählich nach N und in die Tiefe zurück; Salinität nimmt ab; diese Tendenz wird durch erhöhte Pumpmengen (wirtschaftliche und medizinische Nutzung der Solen) verstärkt Ursachen: Ausdehnung des Senkenrand-GW-System (1) bei angenommenen gleichbleibenden natürlichen Bedingungen (Klima etc.) aufgrund von: ▪ Entnahme hoch mineralisierter Wässer (Grubenwasserförderung = >10 Mrd. m³/ 100 a, Förderung als Solequellen u.a.); sehr geringe Neubildung der Solen des Systems (2)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: etwas größer; andere Sedimentalter (meist Kreide, oder älter als Karbon); z.T. unverfestigte Sedimente; Kalke; sehr ähnliche klimatische Bedingungen
Literatur: BODE (1964), KARRENBURG (1974), MICHEL (1963, 1983), MICHEL et al. (1985); gut dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Nordwestdeutsches Becken/ Norddeutsche/ Polnische Senke

2.16 Murray Basin

Lage: SE – Australien (hier behandelt: SE-Teil der Senke)
Kurzbeschreibung: intrakratonische kreisförmige Senke; Mächtigkeit: -600m (nur Känozoikum), Durchmesser insgesamt ca. 600km; SE-Teil: 230*180km
Klima: Steppe, kalt (BSk) bis Steppe, heiß (BSh)
Geologie und hydrogeologische Einheiten (SE-Teil der Senke): ▪ von Höhenlagen umgrenzt; Oberflächendrainage von den östlichen Hochgebieten nach W ▪ flach lagerndes Känozoikum über paläozoischem bis kretazischem basement: marine und kontinentale Sedimente im W (TE); mächtige fluviolakustrine Sedimente in mehreren Teilsenken/ Talfüllungen im E (TE-Q)
Abfolge: ▪ basement (-KR): geklüftete Magmatite, Metamorphite und Sedimentite; mit Salzeinlagerungen; geringleitender Aquifer ▪ Renmark Group (Eozän–Miozän): Quarzsande und -schotter, Tone, Schluffe, Kohle; Aquifer ▪ Calivil Formation (oberes Miozän/ unteres Pliozän): fluviale Sande und Schotter; Aquifer; 30-50m ▪ Parilla Sand (oberes Miozän - unteres Pliozän): diverse marine Sande; Aquifer; 60-100m ▪ Shepparton Formation (Pliozän – Oberes Pleistozän): Tone und Schluffe mit gering mächtigen Einlagerungen von Sanden und Schottern; Aquitard; 60m
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: <u>GW-Mineralisationen:</u> basement 3-4.000mg/L (max 30g/L); Calivil-Formation >250mg/L; Parilla Sand 30-40g/L; hangende Formationen 15 – 50mg/L (oberflächennahe GWL)
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ geschlossene GW-Senke: GWN aus dem Hochland fließt in den alten Talfüllungen ausschliesslich in Richtung tieferes Beckenzentrum (GWN-Entlastungsgebiet) und entwässert in hangende Schichten, in den Murray-Fluss und in Seen und Salzebenen ▪ allg. geringe Flurabstände – zum Beckenzentrum bis 0m abnehmend; GW-Speisungszone (5-100mm GWN) bis in das Beckenzentrum hineinreichend ▪ in Entlastungsgebieten Aufwärtskomponente im GW-Strom, die je nach Wegsamkeit wirksam wird (GW-Austritte) ▪ <u>generell:</u> GWN reagiert stärker variabel als GW-Entlastung: Niederschlagsereignisse und –perioden haben besonders großen Einfluss auf GWN („sheet flooding“) – kurzfristig deutlich erhöhte GWN und über Jahre anhaltender Anstieg des Druckspiegels und Verschiebung der Grenze GW-Speisungszone/ -Entlastungszone in Richtung Becken; der Einfluss künstlicher Bewässerung auf den GW-Druckspiegel ist dabei untergeordnet ▪ GWN und Änderungen des Druckspiegels im oberen GWL haben Einfluss auf Speisung in/ Zehrung aus den tieferen GWL (leakage) ▪ mit generell steigenden Druckspiegeln und so sinkenden Gradienten in den GWL durch erhöhte GWN sinkt auch die Speisungsrate/Entlastung der oberen in den tieferen GWL („deep drainage“); damit müssen die Wässer zunehmend im oberen GWL entlasten = Ausweitung der Entlastungszone = Ausweitung der potentiellen Versalzungsgebiete - Problem: Versalzung der Böden in Entlastungsgebieten; insbesondere bei zusätzlicher Bewässerung (wie heute schon im Loddon Valley) ▪ zukünftiges Problem: GW-Anstieg – Ausweitung der Entlastungszone – Versalzung ganzer Ebenen (Riverine Plane) in 2035 – 2085 ▪ breite Übergangszone in Abhängigkeit von GW-Niveau

Parameter: $k_f = 1,2 \cdot 10^{-5} - 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ und geringe hydraulische Gradienten (Parilla Sand); Calivil- und Renmark Folgen deutlich höher; GW-Spiegelanstieg: 0,03 – 1,8m/a
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: jüngere weniger verfestigte Sedimente; keine Tektonik; weniger tiefreichend, höhere hydraulische Leitfähigkeiten; stärkere Untergrund-Morphologie (alte Talformen)
Literatur: GUTTERIDGE et al. (1983), MACUMBER (1984), MACUMBER (1986), TICKELL und HUMPHRYS (1985), TOTH (1962), TOTH (1963), WILLIAMSON (1983); wenig dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken:

2.17 Northern Ireland Permo-Triassic Basin

Lage: Central Northern Ireland, Grossbritannien
Kurzbeschreibung: Permo-triassische Senke über kaledonisch konsolidiertem Grundgebirge; Mächtigkeit: >2000m (Perm-Trias); NW-SE: 50-100km, NE-SW: >100km
Klima: feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: nahezu kontinuierliche Sedimentation von Karbon bis Trias (nicht im tiefen Unter-Rotliegend u.a.) in 2 tiefen Senken als südwestliche Fortsetzung des Midland Valleys (Schottland) (BENNETT et al. 1980)
Abfolge: (ANDERTON et al. 1993; DOWNING et al. 1987) - PC-Unteres Paläozoikum: kristallines basement (Metamorphite, Plutonite); Aquiclude - D: stark verfestigt; Aquiclude - K: Kalkstein, Schluff- und Tonstein - P, unteres: meist Sandsteine; z.T gute Aquifers - P, oberes: Evaporite, Mergelsteine, Schluffsteine, Kalksteine, Dolomite, Sandsteine; z.T. Aquifers - T: meist Sandsteine; z.T. gute Aquifers (z.B. Sherwood Sandstone)
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: - Permotriassische Sandsteine: häufig signifikante primäre Porositäten und Permeabilitäten noch in 1 - 1,5km Teufe; insbesondere im hangenden Sherwood Sandstone (Untere T) - nur teilweise Zementation oder starke Kompaktion - tiefere GW: Salinitäten bis 200g/L - Herkunft: aus meteorischen Wässern (stabile Isotopen)
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: - Regionaler GW-Fluss: in den Beckenzentren bis in 2km Teufe vermutet - geringe Temperatur-Gradienten weisen auf aktive GW.Zirkulation bis in das Beckentiefste hin
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: - größer - tektonisch gestört - ähnlich mächtige permokarbone Sedimentfolgen - z.T. vergleichbare Sedimente

Literatur: ANDERTON et al. (1993) ; BENNETT und HARRISON (1980), DOWNING et al. (1987)
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Orcadian Basin, Midland Valley (Scotland)

2.18 Nordwesteuropäische Senke (Niederländisches Becken)

Lage: hier südl. Teil der NW-deutschen Senke (Mitteleuropäische Senke) – westl. Teil (Süd-Nordsee-Senke) – südl. Teil (<u>Niederländisches Becken</u>), Niederlande
Kurzbeschreibung: Teilsenke der NW-Europäischen Senke (postvariszische Senkenstruktur nördlich der Varisziden); Mächtigkeit hier: bis 4000m (Basis Zechstein); NW-SE: ca 200km, NE-SW: ca. 150km
Klima: feuchtemäßig, sommerwarm (Cfb)
Geologie und hydrogeologische Einheiten Devon bis Quartär über älterem Fundament; Salze und Tone: Aquiclude; typisch: Salzdiapire <u>Abfolge</u> (liegend zu hangend; Walter 1992 u.a.): ▪ D: meist Old Red-Folgen (Sandsteine, Aquifer); z.T Karbonate/ Evaporite ▪ K: Kohlenkalke, Sandstein-Tonschiefer WL, z.T. kohleführend ▪ P: Rotliegendes (bis 1000m; kont. Sandsteine; z.T. tonig karbonatische Folgen und Salze); Zechstein (zyklische Ablagerungen von Kalken, Anhydriten und Salzen) ▪ T: Sandsteine; Tonstein/Salz; Kalkstein; Tonstein; Salz; Tonstein/Gips; z.T. Sandstein) ▪ J: Tonstein; Sandstein, z.T. mit Kohlelagen; Tonstein ▪ KR: Sandstein; Tonstein; Kalkstein ▪ TE: Tonstein; Kalkstein, Tonstein; Kalkstein; Tonstein ▪ Q: meist Sande; Pelite
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: ▪ Mineralisation: >10g/L (Sandstein/Schluffstein-Aquifer, D, 480m Tiefe); >20g/L (Kalkstein, TE-KR) (GLASBERGEN 1987) ▪ generell Zunahme von GW-Alter und Mineralisation mit Tiefe bzw. Fließweg (Cl: bis 42,5g/L); jedoch zahlreiche Ausnahmen (z.B. bei vertikalem GW-Fluss entlang von Störungen, siehe unten)
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik (on-shore Bereich): ▪ topographisch induzierter GW-Fluss oberhalb des nichtpermeablen Zechstein von GWN in S und W (Ausstriche) meist schichtparallel nach N/ NW (Nordsee) vermutet; Geschwindigkeiten bis 0,1m/a (numerisches Modell; GLASBERGEN 1987) ▪ wichtigste Randbedingungen: Geländehöhe bei GWN, Störungen und Aushalten der hydrogeologischen Einheiten ▪ 3 wichtige hydrogeologische Einheiten: 1) Devon-Rotliegend; 2) Mesozoikum; 3) Tertiär-rezent ▪ meist schichtparalleler GW-Fluss, aber auch und Infiltration aus devonischen und karbonischen Folgen (Sandsteine und Kalke) in hangende Horizonte oder umgekehrt; vertikaler cross-formational GW-Fluss entlang von Störungszonen oder über Aufwölbungen (Diapire) ▪ Ausbildung eines tiefreichenden (D-K) hydrologischen Kreislaufes regionalen Maßstabes ▪ GW-Alter (Devonische Sandsteinen/Tonschiefer in 480m Tiefe) um 25.000 Jahre (¹⁴C und ¹⁸O) (GLASBERGEN 1987)

▪ in weniger permeablen jüngeren Folgen z.T. deutlich höhere GW-Alter (35.000 – 40.000 Jahre) – hier horizontaler Transport auf Störungszonen über mehrere 10erkm (GLASBERGEN 1987) ▪ tiefer GW-Anstrom NaCl reicher Wässer im Karbon aus dem Ruhrgebiet wahrscheinlich (MICHEL 1963) ▪ hohe Mineralisationen in Post-Zechstein Horizonten durch Salzlösung (GLASBERGEN 1981) aber gemäß Br/Cl auch durch Anreicherung aus dem Meerwasser (GLASBERGEN 1987) ▪ Wässer aus Devon/Karbon/Perm erhalten ihre hohe Mineralisation meist durch Evaporitlösung (Prüfung durch Kurven (y vs. x) Cl vs. Br, TDS vs. Br, Cl vs. ^{18}O in GLASBERGEN 1987) ähnlich den norddeutschen Kaligruben (Herbert et al. 1986)
Parameter: Sandstein/Tonstein (480m Teufe; D): $k_f = 1,55 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$ (GLASBERGEN 1985), Porosität 0,6 % (mit Klüftung höher) (BLESS et al. 1981); allg. devonische Sandsteine: $k_f = 1,0 \cdot 10^{-4}$ (numerisches Modell; SMAN 1985) - $2,8 \cdot 10^{-5} \text{m/s}$ (FLINK 1985) Tertiäre Sande (490m Teufe): $k_f = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$ (ROOIJEN et al. 1984)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: größer; auch jüngere, z.T. unverfestigte Sedimente; mächtige Salzablagerungen; von Karbon bis Perm ähnliche Petrologie wie VES
Literatur: GLASBERGEN (1987), WALTER (1992); gut dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Nordwestdeutsches Becken/ Norddeutsch-Polnische Senke

2.19 Orcadian Basin

Lage: Orkadien (Murray Firth), NE-Schottland, Grossbritannien
Kurzbeschreibung: = intermontanes Orcadian Lake Basin; Strukturelle kaledonische Senke entlang des Great Glen Fault und Helmsdale Fault; Mächtigkeit: >5000m; SW-NE: ca. 160km, SE-NW: einige 10er km (beidseitig entlang des Murray Firth) (on-shore)
Klima: feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb) Geologie und hydrogeologische Einheiten: <u>hier:</u> schottisches Festland ohne Orkney und Shetland Islands <u>Abfolge:</u> (ANDERTON et al. 1993; CRAIG 1991; DUNNING et al. 1978 ; BGS 1993): ▪ kaledonisch konsolidiertes Grundgebirge im Untergrund (Grauwacken, Schiefer und andere Metamorphite (Moine), Plutonite -S) ▪ D: mächtige Abfolgen des Old Red Sandstone (vor allem Sand- und Schluffsteine mit Einschaltungen lakustriner und alluvialer Sedimente (klastisch bis kalkig) und saurer bis basischer Vulkanite; z.T. Aquifere) ▪ Lower Old Red Sandstone (430m, zumeist Sandsteine; mit basalen Konglomerat-, Brekzien- und Kalksteinlagen) ▪ Middle Old Red Sandstone (-5000m, Schluffsteine, Sand-und Tonsteine, oft zyklisch auch Konglomerate, basische bis saure Vulkanite) ▪ Upper Old Red Sandstone (600m, Sand- bis Tonstein) ▪ Perm und Mesozoikum: geringe Vorkommen entlang des Murray Firth

Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: siehe unten
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ Sandstein-Folgen des Old Red Sandstein: generell gering permeabel; nur lokal als Aquifere von Bedeutung – z.B. am S-Rand des Morray Firth (ROBINS 1985) ▪ off-shore: gut geklüftete permeable fluviatile devonische Sandsteine in ca. 2700m (600m mächtig) (BUTLER et al. 1976) ▪ Hinweis auf gute Permeabilitäten auch in größeren Teufen – meist kontrolliert durch Intensität störungsgebundener Klüftung
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: ▪ größer und tiefer, z.T. off-shore ▪ tektonisch gestört ▪ z.T. vergleichbare Sedimente
Literatur: ANDERTON et al. 1993; BUTLER et al. (1976), CRAIG (1991), DOWNING et al. (1987), DUNNING et al. (1978), BGS (1993), ROBINS (1985)
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Orcadian Basin of Orkneys & Shetland (Teilsenken des Orcadian Basin), Midland Valley, Northern Ireland Permo-Triassic Basin

2.20 Palo Duro Basin

Lage: Texas, U.S.A.
Kurzbeschreibung: intrakratonische Senke mit relativ einfachem ungestörten geologischen Bau; Mächtigkeit: 3500m, N-S: 195km, E-W: 250km
Klima: feuchtgemässigt, sommerheiß (Cfa)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: von kristallinen Satteln abgegrenzt, in N und S tektonisch; Kambrium bis Quartär über kristallinem Grundgebirge <u>Abfolge:</u> ▪ magmat. und metamorphe Einheiten (PC); Aquiclude ▪ Sdst. (C), Dolomit (O), Kalkstein/Hornstein (K), Karbonate/Tonschiefer/Sandsteine (K-P); alle marin; Tiefer Becken Aquifer ▪ Salze/Anhydrit/“Red Beds“/Dolomit (P); Aquitarde ▪ limnische Klastika/Kalkstein (T), marine Klastika (KR), limnische Klastika (TE-Q); oberer Aquifer

Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen:

Tiefer Becken Aquifer: Wässer mit 32-59°C und 140-290g/L TDS

- Anionen: Cl^- >98%; Kationen: Na^+ 70-90 %, dennoch NaCl untersättigt (Median -0,61)
- z.T. erhöhte Kationen($^{2+}$) und verringerte SO_4 - und Karbonat-Konzentrationen durch Ionenaustauschreaktionen (hohe Na-Aktivität)
- Sättigung/Gleichgewicht mit Calcit, Dolomit, Na-Smektit, Albit und Mikroklin wahrscheinlich, mit Celestit sicher, mit Anhydrit bei den meisten Proben; Na^+ , Cl^- , K^+ : Anstieg mit Teufe; SO_4^{2-} und Alkalinität: Abnahme mit Teufe; Gesamtmineralisation: keine eindeutige Korrelation mit Teufe
- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ und Sr-Konzentrationen weisen auf Alter/Einflüsse: a) etwas jünger als Perm (geringfügig höher radiogen als Perm-Meerwasser, karbonatisch-dolomitisch) und b) deutlich jünger als Perm (höher radiogen, silikatisch und geringere Sr-Konzentrationen)- in Abhängigkeit von Lage der Probennahmepunkte; mgl. Ist auch der unterschiedl. lange Kontakt mit ^{87}Sr -haltigen Silikaten
- $\delta^{18}\text{O}$ Werte schwanken zwischen meteorisch und ^{18}O angereichert

Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik:

- je nach Lage a) direkt aus evaporiertem Perm-Meeresswasser (vermutlich untergeordnet, mgl. z.T. im Zentral- und Ostteil des Beckens vermutet, insbes. in Zonen geringer Durchlässigkeit) und b) durch Halit-Lösung im Untergrund aus GWN (bevorzugt; vor allem im W des Beckens)
- in Abhängigkeit von Zeit und Fließgeschwindigkeit (siehe oben) seit Perm 2-65 mal Neubildung der hoch mineralisierten Wässer aus GWN möglich; konnate Wässer wären danach in „normal“ durchstroemten Bereichen kaum mehr vorhanden
- allerdings ermittelte HUBBARD (1988) ueber Edelgasanalysen Residenz-Zeiten zwischen 100 und 300mio. J. fuer einige hochmineralisierte Waesser
- Temperaturen prä-känozoischer Lösungen 50-74°C mit 20,8-21,8 Gew. % NaCl (heute kühler und 12 Gew. % NaCl)

Hydraulik:

- ein wesentlicher, Topographie-induzierter regionaler hydraulischer Gradient existiert erst seit frühestens Oberkreide (Laramidische Tektonik), vermutlich aber erst seit Heraushebung im Känozoikum (10-15 Mio. J.)
- GW-Nährgebiet in W bis S: auf Grundlage heutigen Bedingungen (Gradient, k_f) GW-Fließzeiten bis zum Tiefen Aquifer (50-200km bei 25-200km/ Mio J.) = <1 – 8 Mio. J.

Parameter:

effekt. Porosität: 5 %; k_f -Werte: $6,3 \cdot 10^{-9} - 8 \cdot 10^{-10}$ m/s

Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES:

- größer; Senkenflanken fallen deutlich flacher ein
- Senke selbst kaum tektonisch gestört
- ein wesentlicher (topographisch induzierter) hydraulischer Gradient existiert erst seit 10-15 Mio. Jahren
- vorwiegend marine Schichtenfolgen im Liegenden; ähnliche Alter
- hydraulische Leitfähigkeiten sind mit denen in ungestörten Bereichen der VES vergleichbar

Literatur:

BAIR et al. (1985), BASSET et al. (1982), BUDNIK et al. (1982), DEVARY (1983), FISHER et al. (1987), HUBBARD (1988), INTERA (1984), KYLE et al. (1987), MEANS et al. (1987), SENGGER et al. (1987a), SENGGER et al. (1987b), SMITH et al. (1985), WIROJANAGUD et al. (1986); gut dokumentiert

Bemerkungen:

benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Anadarko Basin, Dalhart Basin, Hardeman Basin, Midland Basin, Tucumcari Basin

2.21 San Joaquin Basin

Lage: Zentral-Kalifornien, U.S.A.
Kurzbeschreibung: intramontane asymmetrische junge tektonische Senke mit sedimentärer Füllung zwischen Coast Ranges (W), Sierra Nevada (E) und Tehachapi-/ San Emigdio Gebirge (S); NW-SE verlaufend; Mächtigkeit: 5000-7000m (am Bakersfield arch), NW-SE: 410km, SW-NE: 55-110km
Klima: warm, sommertrocken, sommerheiß (Csa) Geologie und hydrogeologische Einheiten: ▪ <u>Hydrologie:</u> Drainage nach NW (Richtung Stockton arch); seit ca.100 Jahren Sinken des regionalen GW-Spiegels ▪ <u>Tektonik:</u> stark tektonisch beansprucht; zwischen KR-Miozän= forarc basin; schnelle Absenkung; Oberes Miozän: Änderung des tektonischen Regimes zu strike-slip; Anhebung der Senkenränder seit frühestens Pliozän: Abschiebungen in E, junge (1-2 Mio. J.) compressional faults in W (Versetzungsbeträge bis 1km); nicht massgeblich für regionalen GW-Fluss ▪ <u>Abfolge:</u> fast ausschließlich Siliklastika (Tone, Sande, Schotter) des Eozän/Oligozän und Miozän-rezent (dominierend); Öl in Faltenstrukturen im W der Senke ▪ <u>Lagerung:</u> Delta- und Schuttfächersedimentation: sehr heterogene Sedimentation, kleinräumig variabel; lokal sind Störungen von Bedeutung
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: ▪ geothermischer Gradient: 2,5°C/100m ▪ Mineralisation: selten über 40g/L, da keine Evaporite; ▪ ungewöhnliche uneinheitliche Verbreitung höher mineralisierter Wässer durch Auswirkungen diagenetischer Prozesse, z.B. Verdünnung und Druckerhöhung durch Dehydrierung (Smektit zu Illit, BOLES et al. 1987); allg. Abnahme der Mineralisation mit Teufe ▪ an den Beckenrändern oberflächennah Verdünnung durch meteorische Wässer ▪ Diagenetische Prozesse (BOLES 1987; 1998; BOLES et al. 1987; SCHULTZ et al. 1989; HAYES et al. 1992; FELDMAN et al. 1993): Karbonat-Fällung (Zement), Lösung und Albitisierung von Plagiklasen, Kaolinitfällung, Illitisierung
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: <u>Hydraulik:</u> ▪ stark transientes GW-Fliessystem ▪ moderater Überdruck im Senkenbereich, insbesondere unterhalb 4km (BERRY 1973) aufgrund von Kompression durch Sedimentauflast, Tondehydrierung, tektonischen Druck und Öl-Generation ▪ gering permeable Störungen verhindern Druckentlastung (BERRY 1973) ▪ Druckausgleich jedoch selten länger als 25 M. J. (länger z.B. in Tonstein-Schichten) (Gleichung nach CARSLAW et al. 1962) ▪ 3 GW-Typen (FISHER et al. 1990; FELDMAN et al. 1993): (1)meteorisches Wasser aus GWN, (2) alteriertes (z.B. verdünntes – Ton-Dehydrierung) marines Wasser (tiefe konnate GW), (3) Mischwasser aus 2 und 3 durch regionalen cross-formational flow ▪ Sedimentationsraten zwischen 0,15 und 0,60mm/a <u>Modellergebnisse:</u> ▪ Lithologie, Topographie (tektonisch induzierte Hebungen) und marine Regression = Haupteinfluss auf Strömung im oberen Bereich ▪ aufströmende GW durch Kompaktion im Senkenzentrum (unterer Bereich) ▪ GWN und Ton-Dehydrierung hauptverantwortlich für Mineralisationsverteilung

▪ Ausbildung eines Überdruckbereiches im tiefen Zentrum (>3km) der Senke (insb. d. Kompaktion) ▪ in den oberen 2km dominiert Topographie-induzierter GW-Fluss ▪ Ausbildung schichtgebundenen GW-Flusses (channeling) aufgrund lokal erhöhter Durchlässigkeiten ▪ Süßwasser verdrängt im Verlaufe der Verlandung das primäre Meerwasser, unter 1-2km Teufe jedoch noch bis in >10 Mio. J. höher mineralisierte Wässer; im Beckentiefsten = Verdünnung durch Illitisierung ▪ Umschwenken der Fliessrichtung im Stevens Sdst. vor 5,5 Mio. J. von Topographie induziert E-W nach Kompaktions-induziert W-E ▪ primäre Zementausfällungen (Ca, Mg), die später von aufsteigenden Wässern wieder gelöst wurden <u>Sensitivitätsstudie:</u> ▪ Einfluss höherer Störungsspermeabilitäten bleibt gering – wichtiger sind Gesteinspermeabilitäten entlang der Schichtung, insbes. im oberen Bereich und die Becken- Morphologie ▪ Einfluss Diffusion gegenüber Dispersion und Konvektion sehr gering Prognosen: <u>Modelle:</u> 2D finite Elemente Modell unter Berücksichtigung von Sediment Kompaktion, Ton-Dehydrierung, Änderung der Fluid-Dichte und Viskosität i.A. von P, T und Salinität; Parametergeneration siehe WILSON et al. (1999)
Parameter (WILSON et al. 1999): <u>k_f-Werte [m/s]:</u> Sande und Schotter: $3,2 \cdot 10^{-7}$ (oberflächennah), $3,2 \cdot 10^{-11}$ (in der Teufe 5-7km); Tone und Schluffe: $3,2 \cdot 10^{-10}$ (oberflächennah), $3,2 \cdot 10^{-15}$ (in der Teufe 5-7km); Störungen: vertikaler k_f= 10fache des Umgebungsgesteins <u>Anisotropie</u> [$K_{\max\_Schichtungsflächen} / K_{\min\_senkrecht\ zu\ Schichtungsfläche}$]: alle sed. Schichten (Schotter bis Tone) 100, Grundgebirge 1, Störungen 1/10 der Schichtenfolgen <u>Porosität:</u> 0,6-0,05 (Tonsteine) bis 0,15-0,4 (Sdst., Schotter); Porosität/k_f-Diagramm und weiter Diagramme siehe WILSON et al. (1999) <u>Dispersivität:</u> $D_{Longitudinal}=400m$, $D_{Transvers}=40m$; basaler Wärmefluss: $50mW/m^2$
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: größer und deutlich tiefer; jüngere Sedimente, z.t. marin E-Rand der Senke ähnlich einfallend und gestört
Literatur: BERRY (1973), BOLES (1987), BOLES (1998), BOLES et al. (1987), CARSLAW et al. (1962), ENGBRETSON (1982), FELDMAN et al. (1993), FISHER et al. (1990), HAYES et al. (1992), SCHULTZ et al. (1989), WILSON et al. (1999); gut dokumentiert
Bemerkungen: detaillierte Modellbeschreibung (Parametergeneration, Randbedingungen) in WILSON et al. (1999) benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Sacramento basin (N)

2.22 Somerset Basin

Lage: Somerset, SW-England, Grossbritannien
Kurzbeschreibung: strukturelle variszische Senke; Mächtigkeit: ?, ca. 50*50km
Klima: feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: ▪ im Untergrund (tektonische) Grabenstruktur vermutet (WHITTAKER 1975) ▪ zwischen Mendip Hills im N und Quantock Hills in S ▪ anstehend Jura und Trias (Mercia Sandstone; Aquifer); im Untergrund und an den Rändern austreichend Devon bis Jura über älterem variszischem Grundgebirge
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: (vgl. unten)
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ Hauptdrainage nach N – NW in den Bristol Channel ▪ GWN über devonischen bis jurassischen Schichtenfolgen in den erhöhten Randlagen (siehe oben) ▪ Zirkulation zwischen Hochlagen und zentralen Entlastungsgebieten (Flüsse) bzw. dem Bristol Channel vermutet (DOWNING et al. 1987) ▪ im Vergleich zu den hangenden Schluffsteinen hohe Permeabilität in den liegenden permotriassischen Sandsteinen ▪ Regionaler GW-Fluss: dies führt zu <u>langen regionalen horizontalen GW-Migrations-Pfaden in den unter-triassischen und permischen Sandsteinen</u> und einer nur langsamen Entlastung durch die hangenden gering permeablen Mercia Mudstone ▪ dafür sprechen auch die kaum gelösten Halit-/ Evaporit-Lagen im Mercia Mudstone (ALEXANDER et al. 1981) ▪ lange Migrationszeiten in den Schluffsteinen
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: ▪ ähnliche Grösse ▪ verbreitet karbonatische Sedimente ▪ wenig tektonisch gestört ▪ z.T. ähnliche Gesteinsalter (Karbon und Perm) und vergleichbare Sedimente
Literatur: ALEXANDER et al. (1981), DOWNING et al. (1987), WHITTAKER (1975); wenig dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Bath-Bristol Basin; Worcester Basin; South Wales Syncline (Coalfield)

2.23 South Wales Syncline (Coalfields)

Lage: Glamorgan, SW-Dyfed, S-Powys, W-Gwent; S-Wales, Grossbritannien
Kurzbeschreibung: Strukturelle variszische Senke; Mächtigkeit: ?, E-W: ca. 95km, N-S: 35-50km
Klima: feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb)
Geologie und hydrogeologische Einheiten:

▪ paralische, der variszischen Front vorgelagerte Senke mit mächtigen Kohlenfolgen (Westfal) ▪ Synklinalstruktur mit komplexem strukturellen Bau: Faltung; große NW-SE Störungen („cross-faults“ und „strike-thrust faults“); 2 weitreichende NE-SW Störungen (Neath und Swansea Täler); alle mit komplizierter zeitlicher und räumlicher Entwicklung (DUFF et al. 1992) <u>Abfolge (nach E ausdünnend):</u> ▪ Lower Old Red Sandstone (Sandsteine, Mergel; Ober-D; z.T Aquifer) ▪ Upper Old Red Sandstone u.a. (Sandsteine; Ober-D; z.T. Aquifer) ▪ Kalkstein (Tournai, Visé; Aquifer) ▪ Millstone Grit Serie (Sandsteine; Namur; Aquifer) ▪ Unteres Westfal (Kohle mit Sandstein- bis Toneinschaltungen; Sandstein z.T Aquifer) ▪ Oberes Westfal (Kohle, Schluff- und Tonsteine, Sandsteine; letztere Aquifer)
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: Thermalwässer: im südlichen Ausstrichbereich mit 22°C
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ GW-Fluss von höher gelegenen N-Rand der Senke im Liegenden der kohleführenden Schichten zum S-Rand der Senke und Entlastung ▪ <u>hier:</u> GWN in ca. 500m oberhalb der Quellen (Analysen gelöster inerter Gase, BURGESS et al. 1980); Absinken der Wässer bis in ca. 600m Teufe und Migration in den Kalken in S-Richtung um ca. 25km (THOMAS et al. 1983) und und Aufstieg/Entlastung auf Störungszonen ▪ regionaler GW: insbesondere in den Kalkstein-Folgen, nur z.T. im Millstone Grit (DOWNING et al. 1987) und den unteren Kohlenfolgen ▪ Genese der Thermalwässer ähnlich der im Bath-Bristol Basin (siehe dort) ▪ z.T. jahrelange hohe Zuflüsse in den Gruben (bis 71 L/s noch nach 54 Jahren; DOWNING et al. 1987) = hohe Permeabilitäten und/oder Speichervermögen der GWL ▪ häufig: Infiltration aus Kalken und Sandsteinfohlen (Millstone Grit und Sandsteine im Liegenden der Kohlefolgen) in die Abbaue der unteren Kohlenfolgen, nur z.T. über Störungen (INESON 1967; ALLEN 1985) ▪ Störungen und Klüftung insbesondere in den Kalken möglicherweise durch Bewegungen im Tertiär (Hämatit-Vererzungen aus tertiären hydrothermalen Lösungen, SQUIRRELL et al. 1969) ▪ geothermische, geophysikalische und geochemische Indizien weisen auf einen Magmenkörper in nur 3,5km Teufe (BLOXAM et al. 1985)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: ▪ ähnliche Größe und Teufe ▪ Kohlenfolgen (Steinkohle) und verbreitet Kalksteine ▪ tektonisch gestört ▪ z.T. ähnliche Gesteinsalter (Karbon und Perm) und vergleichbare Sedimente
Literatur: ALLEN (1985), BURGESS et al. (1980), BLOXAM et al. (1985), DOWNING et al. (1987), DUFF et al. (1992), INESON (1967), SQUIRRELL et al. (1969), THOMAS et al. (1983); gut dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Somerset Basin; Worcester Basin; Bath-Bristol Basin

2.24 Ungarische Senke

Lage: Ungarn, NW-Rumänien
Kurzbeschreibung: Back-arc basin; Intermontane Senke mit mehreren tiefen Sub-Senken; alpidisch; Mächtigkeit: bis >2500m; N-S: 310km, E-W: 620km
Klima: feuchtgemässigt, sommerheiß (Cfa) bis feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: ▪ Niederschläge: >600mm Abfolge: kristallines Grundgebirge; mächtiger Karst im Zentrum und am Rand der Senke (T); basale Ton, Mergel, Schluffstein, Sandstein (Miozän); Sedimente (meist Aquiclude, oberes Miozän); Abtragungsschutt (Aquitarde-Aquiclude; Oberes Pliozän); Vulkanite ▪ mehrere GWL im Karst und, z.T. in Miozän, Vulkaniten und Pliozän ausgebildet; ▪ weiträumiges Ausstreichen hoch durchlässiger Schichtenfolgen – tiefes Multi-Schicht Fließsystem
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: ▪ Mineralisation: bis >5g/L ▪ bei ca. 900m Übergang Sand – Sandstein in den Subsenken (deutlicher Rückgang der Porosität): Bikarbonat zu Na-Karbonat Wässern ▪ Miozän: Na-Cl-Typ Wässer; ursprünglich stagnierend; werden aber von aufsteigenden Wässern des Konvektionssystems nach oben gedrängt (konvektive Anomalien); deshalb Ausbildung höher mineralisierter GW-Horizonte im Hangenden möglich ▪ Pliozän: hohe Cl und Gesamtmineralisationen
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ Wärmefluss deutlich über Welt-Durchschnitt; Max. 81°C/1000m ▪ Bildung konvektiv bedingter Wärmeanomalien die nach der Teufe ausklingen; nach GÁLFI-STEGENA (1977) sind 20-50 % der Anomalien konvektiv bedingt ▪ Wärmetransport GW: $4,19 - 12,57 \cdot 10^7$ W (pliozäne Schuttschichten); $12,57 - 20,9 \cdot 10^7$ W (Karst) = 3-4 % des gesamten Wärmefflusses ▪ Wärmeffluss an der Oberfläche: 70-110mW/m² (MATYAS et al. 1997) ▪ Tiefreichendes Multi-Schicht Fließsystem in thermischem Gleichgewicht (steady state) von kühlen gering mineralisierten absinkenden Wässern (negative Wärmeanomalie; Bi-Karbonat-Typ) im Speisungsgebiet und aufsteigenden höher mineralisierten warmen Wässern im Entlastungsgebiet (positive Wärmeanomalie) = Kontinuität der regionalen GW-Strömung ▪ dennoch nicht immer Korrelation von positiver Wärmeanomalie und hohen Mineralisationen ▪ Speisung der Karst-GWL durch Pliozän-GW ▪ Karst- und pliozäne Aquifere sind aufgrund der oft durchlässigen Aquitards hydraulisch verbunden ▪ Karstquellen oft störungsgebunden ▪ Mineralisation abhängig von: geringe Migrationsgeschwindigkeit = lange Migrationsdauer = hohe Lösungs menge; geringe Permeabilität; Wässer aus dem Grundgebirge mit hohen Lösungsgehalten werden „mitgenommen“ ▪ Kohlenwasserstoffe treten an den aufsteigenden Teilen des Konvektionssystems auf <u>E-Pannonisches Becken (Rumänien)</u> (GHEORGHE et al. 1993) ▪ wichtige thermalwasser führende Aquifere in T,KR und Pliozän ▪ weniger bedeutende auch in anderen folgen und im Grundgebirge ▪ Aufwölbung des Temperaturgradienten bei Oradea

Aquifer-Komplexe: ▪ <u>Trias</u>: 800m (Oradea Zone, Kalksteine, Dolomite); 85 - 90°C 1000m³/d ; Druckspiegel zwischen 60 und 150m; westlich Oradea bis 2800m mächtige Kalke mit artesischen Brunnen (120°C) ▪ <u>Untere Kreide</u>: bis 1000m erbohrt; Kalkstein, SE von Oradea am E-Rand des Pannonischen Beckens; GW im hangenden 50°C, im liegenden 35°C (geothermische Inversion: an Störungen aufsteigende heisse Wässer aus Teufen über 1000m und Verteilung in oberen Horizonten und im Karst) ▪ <u>Pontian</u> (Post-Miozän): Sand/Lehm Wechsellagerung; 20-300m; 50-90°C; artesische Entlastung von 1000 bis 3000m³/d; GWN im angrenzenden Höhenlagen; Aufteilung in abgegrenzte thermale Zonen
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: größer; jüngere z.T. unverfestigte Sedimente und Karst; höhere geothermische Gradienten
Literatur: ALFÖLDI et al. (1976), ALMASI (2003, 2001), , ERDÉLYI (1979), ERDÉLYI (1985), GÁLFI-STEGENA (1977), GHEORGHE et al. (1993), HORVÁTH et al. (1979), LIEBE (1985), TÓTH (2003, 1980), TOTH et al. 2001; mässig dokumentiert
Bemerkungen: Pannonisches Becken; Bezeichnungen im rumänischen Teil der Senke: West Plain oder E-Pannonisches Becken

2.25 Vorerzgebirgssenke

Lage: Mittel- und Westsachsen, Deutschland
Kurzbeschreibung: Intramonaner in mehrere Teilsenken untergliederter permomesozoischer Molassetrog; variszisch; Mächtigkeit: bis >1300m; Ausdehnung: N-S: 7 – 26km, E-W: 54 – 70km
Klima: ▪ feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb) ▪ Niederschläge: 705-959mm; gewichtetes Mittel: 876mm (LfUG 1999)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: <u>Abfolge (liegend zu hangend):</u> ▪ PC – D: varisz. Grundgebirge; Glimmerschiefer, Gneise, Granulite, Grauwacken, Ton-schiefer und Phyllite (meist Aquicludes) und Quarzite (meist Aquitard bis Aquifer); untergeordnet Magmatite ▪ K (Hainichen Schichten): Konglomerate, Schiefertone mit Kohlenlagen, Sandsteine, Arkosen (Aquifer) ▪ K (Flöha Schichten): Konglomerate, Sandsteine, Schiefertone mit Kohlenlagen (Aquifer) ▪ K (Zwickau Schichten): Melaphyre, Sandsteine und Konglomerate mit Verwitterungsmatrix, Schiefertone mit Steinkohleflözen (meist Aquiclude) ▪ P (Härtensdorf-Folge): Konglomerate, Sandsteine, Schluff- bis Tonsteinlagen, basische Tuffe und Vulkanite (meist Aquifer-Aquitard) ▪ P (Planitz-Folge): basische Tuffe und Vulkanite; Konglomerate, Sandsteine, Pelite, Pyroklastika, Ignimbrite (meist Aquitard bis Aquiclude) ▪ P (Leukersdorf-Folge): Arkosesandsteine, Schiefertone, Konglomerate, hangend verstärkt Schiefertone (meist Aquitard bis Aquiclude)

▪ P (Gera-/ Mülsen-Folge): Konglomerate, Schluffsteine, Konglomerate, Schluff- und Tonsteine (meist Aquifer) ▪ P (Zechstein): Schiefertone, Sandsteine, Dolomite (nur Randbereich der VES; meist Aquifer bis Aquitard) ▪ KR – T: Sandsteine und Konglomerate (nur Randbereich der VES; meist Aquifer) ▪ TE: Schotter, Sande, Kiese, Tone (Aquifer bis Aquiclude) ▪ Q: Sande und Schotter (meist Aquifer bis Aquitard)
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: ▪ oberflächennahes Grundwasser: geringe bis mittlere Gesamtmineralisation (600 – 4000µS/cm); anthropogene Einflüsse vorhanden (z.B. Nitrat, Schwermetalle) ▪ tiefere ungestörte Grund- bzw. Mineralwässer: sehr geringe bis mittlere Gesamtmineralisation (<600 µS/cm); meist um 300mg/L (CuE 1997); z.T. erhöhte Chloridgehalte ▪ höher mineralisierte (chloridische) Tiefenwässer: sehr hohe Gesamtmineralisationen (>>2000µS/cm); Cl >2000mg/L
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ wesentlicher GW-Fluss meist nur in der Auflockerungszone/ in Austrichbereichen sowie entlang von Kluft und Störungszonen ▪ Karbon und weite (feinklastische) Teile des Unterrotliegenden weitestgehend trocken ▪ Störungszonen können sowohl hydraulisch leitend als auch stauend (verlehmt) wirken <u>Herkunft mineralisierter Wässer:</u> ▪ 1) in-situ aus Lösungsvorgängen im Gestein (C-W-H 1994; SCHNEIDER 1999) ▪ 2) reliktsche marine Salzwässer, die sich in der Tiefe anreichern (STUMM 1999) ▪ 3) Migration hoch mineralisierter Lösungen auf weitreichenden Tiefenstörungen auf NW-SE verlaufenden Störungszonen aus dem Thüringer Raum in die VES (SCHRÄBER 1968)
Parameter: (Richtwerte für Bereiche mit GW-Führung; T-Werte ohne GW-Führung um 2-4 Größenordnungen geringer als unterstrichener Wert) ▪ Grundgebirge: T meist um $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ▪ Hainichen Schichten: T = $\underline{10^{-3}}$ - $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ▪ Flöha Schichten: T = $\underline{10^{-3}}$ - $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ▪ Zwickau Schichten: T = 10^{-4} - $\underline{10^{-5}} \text{ m}^2/\text{s}$ (Ausstrichbereiche) ▪ Härtensdorf-Folge: T = $\underline{10^{-3}}$ - $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ▪ Planitz-Folge: T = 10^{-3} - $\underline{10^{-5}} \text{ m}^2/\text{s}$ ▪ Leukersdorf-Folge: T = 10^{-3} - $\underline{10^{-5}} \text{ m}^2/\text{s}$ ▪ Gera-/ Mülsen-Folge: T = $\underline{10^{-3}}$ - $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ▪ TE: T = 10^{-2} - $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ▪ Q: T = 10^{-3} - $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (bei psammitischer Ausbildung)
Literatur: ZGI (1984), CuE (1997), C-W-H (1994), SCHNEIDER (1999), SCHRÄBER (1968), STUMM (1999); mässig dokumentiert
Bemerkungen: Synonyme: Erzgebirgisches Becken, Erzgebirgsvorsenke

2.26 Worcester Basin

Lage: Gloucestershire, Hereford and Worcester, W-England, Grossbritannien
Kurzbeschreibung: Strukturelle (Graben) variszische (?) permo-triassische Senke; Mächtigkeit: ?, SW-NE: ca. 25km, NW-SE ca. 50km
Klima: feuchtgemässigt, sommerwarm (Cfb)
Geologie und hydrogeologische Einheiten: ▪ stufig abfallende Störungen (vorwiegend triassisch) an den Grabenflanken ▪ unteres J über mächtigen permo-triassischen Sedimenten ▪ überwiegend Sandsteine, Ton- und Schluffsteine, Mergel, Dolomite und Konglomerate ▪ besteht aus 2 Teil-Senken en échelon (Worcester und Winchcombe) (SMITH et al. 1984)
Grundwässer und ihre Charakteristik, Isotopen: ▪ Besonderheit im Worcester Basin: relativ geringe Mineralisation für entsprechende Teufen: 6g/L (Wildmoore Sandstone; P) und 22-29g/L für die tieferen Bridgnorth Sandstone (unteres P; SMITH et al. 1984) ▪ 22km talabwärts (Severn Tal) der letzten Austriche des Bridgnorth Sandstone hat das GW bereits Trinkwasserqualität: Nachweis für signifikanten GW-Fluss entlang dieser linearen Struktur (DOWNING et al. 1987)
Bildung höher mineralisierter Wässer/ Hydraulik: ▪ GW-Dynamik und regionaler GW-Fluss (1) wird von Druckspiegeln in den umgebenden Höhenzügen bestimmt (W, N, E) ▪ aufgrund direkter GWN entlang der Ausstriche von P und T in den Höhenzügen GW-Spiegel von 60-100m ü. NN; z.T. 160-200m ü. NN ▪ diese induzieren GW-Fluss über permo-triassische Sedimente (schichtparallel) in die Teufe und dann vertikaler aufwärts-Fluss durch den Mercia Mudstone und z.T. artesische Entlastung ins Severn Valley (BLACK et al. 1983) ▪ weiterer regionaler GW-Fliessweg (2): tiefer N-S GW-Strom in triassischen Sandsteinen durch die Worcester Senke (Nachweis von heat flow) und weiter über E-W Störungen in das Wessex Basin (DOWNING et al. 1987) (siehe „Hampshire and Wessex Basin“)
Vergleich/Relevanz für die Verhältnisse in der VES: ▪ ähnliche Größe ▪ ähnlich tektonisch gestört ▪ z.T. ähnliche Gesteinsalter (Karbon und Perm) und vergleichbare Sedimentgesteine
Literatur: BLACK et al. (1983), DOWNING et al. (1987), SMITH et al. (1984); mässig dokumentiert
Bemerkungen: benachbarte/ vergleichbare sedimentäre Senken: Somerset Basin; Bath-Bristol Basin; South Wales Syncline (Coalfield)

2.27 Weitere Senkenstrukturen

Es gibt eine Vielzahl weiterer Senkenstrukturen in denen hydrogeologische Prozesse beschrieben worden sind, aus denen – bei aller Unterschiedlichkeit der jeweiligen geologischen und hydrologisch-hydrogeologischen Randbedingungen - Anhaltspunkte für das konzeptionelle Modell Vorerzgebirge abgeleitet werden konnten. Dazu gehören: Amadeus Basin (Nordaustralien), Arkoma Basin, Bohaiwan Basin (China), Broad Fourteens Basin, Carlisle Basin, Canning Basin, East Texas Basin, Forrest City Basin, Great Artesian Basin (Australien), Gulf of Mexico Sedimentary Basin, Kuna Basin, Michigan Basin, Midland Valley, Niedersächsisches Becken, Norddeutsche/ Nordostdeutsche Senke, Nördliche und Südliche Nordsee-Senke, Orcadian Basin, Oslo Graben, Pariser Becken, Parana Becken, Persian/Arabian Gulf Basin, Rheintalgraben, Rocky Mountain Eastern Foreland Basins, Sahara Basin, Santa Barbara Basin, Schleswig-Holstein Senke, Songliao Basin (China), Val Verde Basin, Vor- Sudetische Monokline, Williston Basin (Teil des Western Canada Sedimentary Basin).

Anlage 2

Geologische Einheiten und tektonische Entwicklung in der Vorerzgebirgssenke und dem Umland

Geologische Einheiten in der Vorerzgebirgssenke und dem Umland/Tektonische Entwicklung

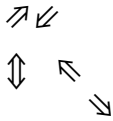
Tabelle 1 Geologische Einheiten im Bereich der Vorerzgebirgssenke (ausführliche Version der im Textteil enthaltenen Tabelle)
/nach SCHNEIDER et. al. 1996, BRAUSE 1997, VEB HYDROGEOL.–ZWICKAU 1977, HK50 1984, BLÜHER 1960, BLÜHER 1968, DABER 1992, STEINKOHLN-A-V 1912, STUTZER 1935, RUDER 1998 u.a.; Rotliegendes nach FISCHER 1990, BLÜHER 1967 u.a../

Stratigraphie in Klammern=alte Stratigraphie nach PIETSCH 1963		M [m] Mächtigkeit	Lithologie, Bemerkungen Pfeile=tektonische Hauptrichtungen bzw. Einengungsrichtung; vertikale Ord. = der Stressentwicklung	Tektonik
Quartär	Holozän	meist wenige Meter; max. bis 8 m (Tal der Zwickauer Mulde);	Dammerde, Auelehme und sandiger bis kiesiger Schluff im Bereich der Talauen der Flüsse, insbesondere im Tal der Zwickauer Mulde, Talsande, Kiese; lokal Abschwemm- und Verwitterungsschutt, Torf; anthropogene Ablagerungen (Auffüllungen, Halden, Absetzbecken, Deponien, Bergbauversatz usw.)	
	Pleistozän	anthropogene Ablagerungen meist bis einige m; lokal >10 m	Schmelzwassersande und Kiese; Lößlehm (meist 2-4 m) auf Hochflächen; Schotterterrassen der Mulde, eiszeitliche Geschiebelehme, Bändertone und Flußschotter; Relikte auf Hochflächen	
Tertiär	Neogen	meist einige Meter; max. bis ca. 40 m	Sande, Kiese, Tone (Raum Limbach); meist als Erosionsrelikte auf Hochflächen	  saxonische Tektonik im Neogen (Bruchtektonik); Heraushebung des Erzgebirges; Reaktivierung alter NW-SE Richtungen (?) <i>Basisdiskordanz</i>
	Paläogen	(Helmsdorf/Dänkritz)	vorwiegend fluviatile Sande und Kiese, z.T. tonig-schluffig; Schotter, lokal Toneinschaltungen (Oligozän)	
Kreide, Jura, Trias		Im äußerstem NW an das Untersuchungsgebiet angrenzend dem Zechstein aufgelagert; sonst abgetragen triassische (konglomeratische) Sandsteine und Konglomerate der Nordhausen-Folge (Schuttfächer)		  synalpidisch-saxonische Tektonik (Bruchtektonik); Reaktivierung alter NW-SE und anderer Richtungen (?); <i>Basisdiskordanz</i>
Perm (Zechstein)		Schiefertonsandstein WL, z.T. mit dolomitischen Lagen, Plattendolomit, im unteren Abschnitt Schiefertonsandstein Wechsellagerung mit Dolomithorizonten; im NW an das Untersuchungsgebiet angrenzend; sonst abgetragen; <i>Basisdiskordanz mit deutlichem Hiatus</i>		
Perm (Rotliegendes) Tektonische Zerböckung in NW-SE und meridionaler Richtung(Einfallen der Verwerfungen meist 45-60%, Sprunghöhen meist zwischen 0,1 und 30m)				  

(Fortsetzung 1, Tabelle 1)

Gera-Mülsen-Folge (Stufe der kleinstückigen Konglomerate)	50-150	<u>Oberer Zyklus</u> : Überwiegend psammitisch-pelitisch; in der VES nur im NW (Ponitz) nachweisbar <u>Mittlerer-Zyklus</u> : fast durchgehend matrixgestützte Konglomerate; beckenzentral selten schluffig-sandige Einschaltungen; Bindemittel meist sandig, seltener kalkig-tonig	↖ ⇒ Basisdiskordanz mit deutlichem Hiatus
	150-350	<u>Unterer Zyklus</u> : Basale matrixgestützte Konglomerate, dann geringmächtige gradierte Konglomerat-Schluffstein Zyklen; Bindemittel meist sandig, seltener kalkig-tonig; basal bis rund 1m mächtiger Zersetzungshorizont der Leukersdorf-F.	
Ob. Oberrotliegend I–Oberrotliegend II: Altmark-Bewegungen (bis in den Sedimentationszeitraum der Gera-/ Mülsen-Folge andauernd)			↖ ⇒
Leukersdorf-Folge (Stufe der vorherrschenden Schieferletten (hängend) und Stufe der Arkosesandsteine u. Letten (liegend))	100-180 max. 385 (südw.) Chemn.)	<u>Obere Teilfolge</u> : vorherrschend Schiefertone; Grobklastika am Beckenrand; sonst auch basal pelitische bis sandige Abfolgen; eingeschaltete lakustrische Karbonate; Zeisigwaldtuff im E (bis über 90 m) als Abschluß der vulkanischen Aktivität in der VES, verbunden mit Absenkung des Eruptionsareals	↖ ⇒ mehrere tektonische Impulse (Bruchtektonik; saalische und subsaalische Bewegungen ab Basis Leukersdorf-F.) mit lokalen Diskordanzen Intrusion der Innengranite ↕ ↖ ⇒ Aktivierung von NW-SE verlaufenden tekton. Strukturen im Sedimentationszeitraum der Unteren Leukersdorf-Folge
	0-500	<u>Untere Teilfolge</u> : Arkosesdst. und Schiefertone, z.T. Kongl. mit tonigem, seltener kalkigem Bindemittel (Sdst. u. Kongl.) bzw. sandig u. z.T. kalkigen Anteilen (Tonsteine); zwei sed. Großzyklen <u>Unt. Zyklus</u> : grobklast. Basis; dann Sdst./Pelit WL mit eingeschalteten konglomerat. Lagen und einigen Pyrroklasithorizonten <u>Ob. Zyklus</u> : grobklast. Basis; dann überwieg. pelitisch mit grobklast. Rinnen; untergeordnet psammitisch/psephitische Faziesgürtel Übergreifen des Sedimentationsraumes auf bisherige Abtragungsgebiete; die Unterteilung der Leukersdorf-Folge ist aufgrund fehlender (Tuff-) Leithorizonte an den Beckenrändern schwierig; allg. schwache vulkan. Aktivität	
Planitz-Folge (Stufe der unteren vulkanischen Tuffe und Ergüsse)	0-50 max. 600	<u>Obere Teilfolge</u> : Feinklastische Sequenzen (z.T karbonatisch) der Überschwemmungsebenen mit einzelnen geringmächtigen gröber-klastischen und mehreren pyroklastischen Einschaltungen (3 Leithorizonte); mehrere ignimbrische Abfolgen; verstärkte Absenkungen und Differenzierung in der Beckenentwicklung; Neueinsatz der Sedimentation im E der VES	↕ ↖ ⇒ Basisdiskordanz

(Fortsetzung 2, Tabelle 1)

	15-120 max. 900 (lokal entlang von Randstör.)	<u>Untere Teilfolge</u> : Verschiedene Horizonte basischer Tuffe und Vulkanite; konglomeratische bis pelitische Schuttfächersedimente; terrestrische bis fluviatile Ton- und Schluffsteine mit basischen Tuffen und Vulkaniten; starke Variationen in Ausbildung und Mächtigkeit in Abhängigkeit von tektonischer und vulkanischer Aktivität	 Triple junction-Grabenstruktur; zunehmend starke Absenkungen in von Randstörungen umgrenzten Bereichen innerhalb eines tekton. Weitungsregimes; NE-SW Richtung dominierend
<i>Härtensdorf-Folge</i> (Obere Teilfolge: Stufe der unteren vulkanischer Tuffe und Ergüsse; Untere Teilfolge: Stufe der Liegendsandsteine und -letten)	20-40 max > 100 (Werdau-Crimmitschau)	<u>Obere Teilfolge</u> : Sedimentationsraum deutlich über den der Unteren Teilfolge hinausgehend; Schwemmfächersedimente (flood plain sediments) mit einigen eingeschalteten pyroklastischen Horizonten (Taupadeltuff als Leithorizont); hangend vorwieg. Schluff- und Tonsteine	
	bis > 175	<u>Untere Teilfolge</u> : Konglomerat- bis Schluff-/Tonsteinabfolge (im oberen Abschnitt dominierend), lokal mit schwachen palustrischen Entwicklung. und geringmächtigen lakustrischen Karbonaten im Topbereich; meist toniges oder kalkig-dolomitisches Bindemittel; typisch sind die basalen (rot)braunen Kongl.; größere Schwemmfächer (alluvial fans) mit mächtigem Basalkonglomerat ("Graues Konglomerat") und Schlammstromabsätzen, die stark erosiv das flözführende Karbon überlagern; lokal dünne Brandschieferlagen bis Steinkohlenflözen ("Wildes Kohlengeb."); Arkosesd. und rote Letten; lokal gedieg. Kupfer; rascher horizontaler und vertikaler Fazieswechsel	 strike-slip Bewegungen in NE-SW Richtung mit geringen vertikalen Versatzbeträgen; Bruchtektonik; <i>Basisdiskordanz mit deutlichem Hiatus</i> über schrägestelltem z.T. erodiertem Westfal D (Nachphase der asturischen Phase ?, Plutonintrus.?)
Karbon			
<i>Zwickau Schichten</i> (ca. Westfal D; vermutl. ober. Westfal C bis unt. Stefan A)	max. 400 50 bis > 300 bei Zwickau; bis 183 bei Oelsnitz, /BSA 1974/	basaler Melaphyr (bis zu 80 m mächtige Decke); im unteren Abschnitt fein- bis grobkörnige, porphyrarme Sandsteine und Konglomerate mit phyllitischem Detritus verkittet; dann zudem Schieferferte mit Steinkohlenflözen (die nach N erodiert (Abwaschung) und nach Süd versteint sind, bzw. am Grundgebirge auskeilen; Einfallen (Zwickau) 12-18 ° nach N-NNE) und Sd. Top, z.T. Arkosen; im Raum Oelsnitz tiefe konglomeratische Erosionsrinnen im Topbereich; Flözeinfallen in Richtung Ausstrich (nach Süd) häufig zunehmend (Oelsnitz 10-30 °); im Raum Leukersdorf Porphyrite und Tuffe	 strike-slip Bewegungen in NE-SW Richtung mit geringen vertikalen Versatzbeträgen; (synsedimentäre Tektonik, asturische Phase); <i>Basisdiskordanz</i>
Westfal C bis C/D		asturische Phase der variszischen Hauptfaltung (Haupteinengungszeit im Bereich d. Saumsenken; in der VES vermutlich zeitl. etwas früher); wahrscheinlich Überlappung des zeitlich-räumlichen Kompressionshöhepunktes mit ersten Phasen der Dehnungs- und Molassentektonik /BRAUSE 1997 u.a./ → synsedimentäre Tektonik im Westfal D	

(Fortsetzung 3, Tabelle 1)

Flöha Schichten (Westfal B/C)	60-100 (nur pro- duktive Schichten)	Konglomerate, Sandsteine, z.T. Schiefertone mit Steinkohlenflözen, Rhyolite; Vorkommen nur im östlichsten Teil der VES	↗↘ ↕ strike-slip Bewegungen in NE-SW Rich- tung; Basisdiskordanz
Oberkarbon		<u>Granite</u> : <i>Jüngerer Intrusivkomplex</i> : autometamorphe Biotit- bis Muskovit-Biotitgranite; fein- bis mittelkörnig; durch steile bis vertikale Klüfte intensive Zerblockung; Verwerfungen in N und NW-Richtung mit begleitenden Mylonitzonen; <i>Älterer Intrusivkomplex</i> : Biotitgranit mit porphyrischer fein- bis grobkörniger Ausbildung; Kluftsyste in NW-SE und NE-SW Richtung; meist gering gestört; tiefgründig grusig verwittert <u>Rhyolite</u> : Quarz- und Granitporphyre; meist gangförmig ausgebildet; z.T. Linsen; gut geklüftet; geringe Verbreitung im Betrachtungsgebiet	
Namur		Erzgebirgische Phase der varisz. Hauptfaltung (Namur A/B) mit leichter Einengung des Hainichener Beckens; Intrusion der Granite von Kirchberg und Eibenstock	↕
Hainichen Schichten (Visé III β/γ)	bis 400 (Chemn.; 200 pro- duktive Schichten; lokal max1000	Frühmolasse; Liegendes Grundkonglomerat mit sandig-grusigem Bindemittel, Konglomerate (mit granitischen Geröllen), Schiefertone z.T. mit Steinkohlenflözen, lokal Sandsteine, Arkosen; Vorkommen nur im der VES i.e.S. nordöstlich vorgelagerten Becken von Hainichen; Schichten steil aufgerichtet; steil einfallender NW-Flügel	↖ ↘ Höheres Unterkarbon: Übergang von Kompression zu Extensionsregime ↗↘ strike-slip Bewegungen in NE-SW Richt.; <i>Basisdiskordanz</i>
Unteres Obervisé		Sudetische Phase; (Variszische Hauptfaltung; Anlage von Störungen im Grundgebirge); Kompressionsmaximum	
Altpaläozoikum			
Tieferes Unterkarbon	Grauwacken und Sandsteine, Tonschiefer, lokal Einlagen von Konglomeraten und Keratophyrtuffen		variszisch (sudetisch, reußisch, bretonisch u.a.) konSolidiert, gefaltet und gestört ⇒⇐ ↘ ↖
Devon	Diabase und Diabastuffe, z.T. mit Einlagen von Tonschiefern, Kalkstein und Konglomeratlinsen; flasrige Kalksteine, Kalkknotenschiefer; Tonschiefer mit basalen Quarzitlagen, Kalkknollenschiefer, Tonschiefer, z.T. Grauwacken		
Silur	Kiesel- und Alaunschiefer; untergeordnet Grauwacke, Kalkstein, Tonschiefer		
Ordovizium	Phyllite der Schwarzburger- und Gräfenthaler- und Phycodenserie: Ton-, Griffel-, und Lederschiefer; “Hauptquarzit” und “Frauenbachquarzit”, z.T. tonschieferartige Phyllite und (quarzitische) Sandsteine;		
<u>Vorland der östlichen VES</u> : devonisch bis ordovizische Tonschiefer und Grauwacken (Erzgebirgskristallin); südliches und westliches Vorland des Westteils der VES: devo- nisch bis ordovizische Tonschiefer und Grauwacken, Diabase und Diabastuffe			

(Fortsetzung 4, Tabelle 1)

Prävariszische Metamorphite	
<u>Erzgebirge</u>: dem zentralen und östlichen Teil der VES südlich vorgelagert sind vor allem Phyllite sowie Gneise und Linsen von Tonschiefer, phyllitischen Tonschiefern, Quarziten, Quarzitphylliten, Quarzitschiefern; lokal Einlagerungen von Metagrauwacken, Metakonglomeraten, Karbonaten (Linsen), Skarnen und Karbonatkarst (Wildenfelder Zwischengebirge); im östlichen Vorland der VES vorwiegend mittelmetamorphe Phyllite, Glimmerschiefer (Muskovit- bis Zweiglimmerschiefer) und hochmetamorphe Gneise und Tonschiefer; <u>Granulitgebirge</u>: vorwiegend Gneise, Granulite und basische Plutonite; im Schiefermantel auch Phyllite und Glimmerschiefer	variszisch oder älter konsolidiert und verschieden intensiv metamorph überprägt

Anlage 3

Hydrogeologische Charakteristik geologischer Einheiten in der Vorerzgebirgssenke

Hydrogeologische Charakterisierung der geologischen Einheiten in der VES mit Angaben zur Grundwasserführung und zum Auftreten höher mineralisierter Wässer, Besonderheiten

Geologische Formation	Hydrogeol. Einheiten/Mächtigkeiten	Verbreitung	Ausbildung/Grundwasserführung/Hydraulik	Hydrogeologische Kennwerte Beispiele [T in m^2/s , k_f in m/s]	Höher mineralisiertes Wasser/ Bemerkungen
(Anthropogene Auffüllungen)	wenige m bis mehrere 10er m	insbesondere in den alten Bergbaurevieren von Zwickau-Oelsnitz und der Wismut	Halden, Absetzbecken, Deponien, Bergbauversatz, Auffüllungen	Hydraulische Leitfähigkeit stark schwankend in Abhängigkeit von Material und Sättigungszustand; k_f : 10^{-3} bis 10^{-7} (GUB 1998b)	für die Grundwasserhältnisse nur lokal von Bedeutung
Quartär	<i>Auelehme</i> : 1-2m bei Zwickau, und Hanglehme GWGL	in den Auen und Hangbereichen der Täler	pelitische Ausbildung Trennung quartärer GWL von liegenden GWL; Einschränkung der GWN in den liegenden GWL	k_f : 10^{-5} bis 10^{-7} (Auelehme Zwickau) (GUB 1998b)	Kontaminationsschutz für den hypodermischen Abfluss und die GWN in liegenden GWL
	<i>Quartärschotter- und sande</i> , meist 1-3 m, bis 9 m im Tal der Zwickauer Mulde Tal-GWL	im Bereich der Talauen von Zwickauer Mulde, Chemnitzbach Zschopau und im Pleiße- und Pleiße- und Hegebach	psephitisch bis psammitische Ausbildung; mittlere bis sehr gute Grundwasserführung; Speisung der liegenden Festgesteins-GWL in Abhängigkeit von deren hydraulischer Leitfähigkeit und der hydraulischen Anbindung; über Kluft- und Störungszonen meist gute hydraulische Verbindung gegeben (z.B. Zwickauer Mulde Schotter und Leukersdorf-Folge; Chemnitz-Schotter und Zeisigwaldtuff)	T : $0,1 \cdot 10^{-4}$ - $200 \cdot 10^{-4} m^2/s$ (HK50 1984 u.a.); zwischen 10^{-4} und $10 \cdot 10^{-4} m^2/s$ (HGN1996a); $1,05$ bis $5,4 \cdot 10^{-3} m^2/s$ (GUB 1998b) k_f : im Bereich von 10^{-5} bis $6 \cdot 10^{-3} m/s$ (bei GWL-Mächtigkeiten von 2-3 m); zwischen $1,8 \cdot 10^{-3}$ und $n \cdot 10^{-4} m/s$; einmal $9,2 \cdot 10^{-2} m/s$ (CWH 1994); $2 \cdot 10^{-3}$ bis $10^{-4} m/s$ (GUB 1998b) (Muldeschotter Zwickau)	GWL; aufgrund der begrenzten und geringmächtigen Vorkommen meist jedoch geringe Bedeutung
	<i>Terrassen- und Hangschotter</i> GWL	in Hanglagen der Flusstäler	psephitisch Bewegungsbahnen des hypodermischen Abflusses, Speisung tiefer GWL (GWN) über Verwitterungs-/Auflockerungszone	T : $\geq 10^{-4} m^2/s$	Holozän und Pleistozän; wichtig für GWN
	<i>Lößlehmdecke</i> , meist 2-4 m GWGL	auf Hochflächen insbesondere im NE der VES	Lößlehm sowie lokal pleistozäne Schmelzwassersande		

Tertiär	hangender und liegender GWL (Helmsdorf bei Zwickau) mit trennendem GWGL	als reliktsche geringmächtige Bildungen auf Hochflächen	Sande und Kiese; toniger GWGL; Grundwasserführung stark abhängig von der Lage der Tertiärbasis, der Schichtmächtigkeit und dem Auftreten hemmender Zwischenschichten; Niederschlags-Zwischenspeicher für die GWN in den liegenden Festgesteins-GWL	T: 10^{-4} bis 10^{-5} m ² /s	nur lokal als GWL von Bedeutung (Helmsdorf bei Zwickau); wichtig für GWN über Festgesteinen
Zerrüttungs-/ Auflockerungs-/ Delithifizierungszone	GWGL/GWGL wenige Meter bis über 50 m	Verwitterungshorizont des obersten Festgesteinsbereiches (Rotliegendes und Kristallin), z.T. von Quartär/Tertiär überdeckt	bei entsprechender Klüftigkeit gute bis sehr gute Grundwasser-Leitfähigkeit auch in pelitischen Gesteinen häufig gute Klüftigkeit vorhanden, bei lettigen Verwitterungsrückständen oder/und geringer Klüftung ist die Durchlässigkeit oft vernachlässigbar gering	als GWL/GWGL T meist zwischen 10^{-3} und 10^{-5} m ² /s (k_f 10^{-4} bis 10^{-6}), lokal höher Bsp.: T= 10^{-2} bis 10^{-4} m ² /s (verwitterter Buntsandstein, Raum Meerane, SCHRÄBER 1983) in verlehmtten Bereichen GWH mit T $\leq 10^{-8}$ (k_f 10^{-9} bis $<10^{-10}$) Bsp.: T= 10^{-6} bis 10^{-8} m/s unter Tertiärüberdeckung bei Helmsdorf (PAUL 1998b)	GWGL, aber lokal von Bedeutung als GWL, insbesondere im Bereich des Buntsandsteins
Deckgebirge (Trias, unterer Buntsandstein)	Nordhausen-Folge und deren Schuttfächerbildungen	im äußersten NW an die VES angrenzend	triassische (konglomeratische) Sandsteine und Konglomerate; gute bis mittlere Grundwasserführung; im Raum Meerane Buntsandstein=GWL (SCHRÄBER 1983)	T: 10^{-4} - $5 \cdot 10^{-3}$; lokal bis $>3 \cdot 10^{-2}$ Feldversuche: T= $2,8 \cdot 10^{-5}$ - $4 \cdot 10^{-2}$ k_f = $7,3 \cdot 10^{-5}$ - $1,1 \cdot 10^{-4}$	für den Grundwasserabstrom aus der VES von Bedeutung
Mariner Zechstein	Plattendolomit (Raum Meerane)	nur im äußersten NW der VES	meist mittlere bis hohe Grundwasserführung; im Bereich des Plattendolomits (Dolomitsandstein) gute Grundwasserführung (GWL)	T: 10^{-3} bis 10^{-4} m ² /s (SCHRÄBER 1983)	für den Grundwasserabstrom aus der VES von Bedeutung
Kontinentaler Zechstein	stratigraphisches Äquivalent d. Gera-/Mülsen-Folge	Raum Meerane	Lagerungsverhältnisse werden bestimmt von Schichten mit sehr unterschiedlicher hydraulischer Leitfähigkeit (Grundwasser-Stockwerksbildung); häufig hydraulische Kurzschlüsse z.T. mit Artesik, insbes. In Störungsbereichen	T: 10^{-2} bis 10^{-5} (SCHRÄBER 1983) Feldversuche: T= $1,6 \cdot 10^{-5}$ und $1,4 \cdot 10^{-2}$ k_f = $2 \cdot 10^{-5}$ - $1,1 \cdot 10^{-4}$	

Gera-/ Mülsen-Folge	untergliedert sich regional in ein oder mehrere hydrogeologische Einheiten mit unterschiedlicher Grundwasserführung; GWL oder GWL/GWGL	wichtigster Festgesteins-GWL in der VES; Vorkommen im West- und Zentralteil der VES Poren- als auch Kluft-GWL (double porosity aquifer, Schichtfugen bis mehrere cm mächtig) und störungsgebundenes GW gute bis sehr gute Grundwasserführung (klüftungsfreundliches Gestein), insbesondere in gestörten Bereichen, mehr oder minder stark über die gesamte Mächtigkeit verbreitet hohe Grundwasserführung insbesondere in den oberflächennahen Bereichen der Auflockerungszone sowie in den liegenden Grob-konglomeratischen Bereichen GWN direkt über weitverzweigtes System von Klüften, Poren, Schichtfugen, über quartäre/tertiäre Lockersedimente, oder geringmächtige periglaziale Schuttdecken (unter ca. 2 m mächtigen Gehängelehmedecken, insbesondere in Hanglagen) i.d.R. <u>ein gemeinsamer</u> Druckwasserspiegel mit den quartären Tal-GWL ausgebildet, welcher der Höhenlage des nächstgelegenen Vorfluters entspricht (WIEDE 1901) Quellenbildung an Schicht- und Störungsflächen <u>Störungszonen:</u> häufig gute Grundwasserführung, insbes. An Abschiebungen auf den Schieferletten der Leukersdorf-Folge (Bsp. Rödlitzer HVW; mehrere Brunnen 5-15 l/s, z.T. artesisch); wenn lettig verfüllt jedoch GWGL (BLÜHER 1960, BSA 1981) <u>Beispiele-Grundwasserführung:</u> im Martin Hoop Schacht III, 0,2 bis 10 l/s aus Einzelzuläufen, z.T. unter Druck stehend 5 at / Martin Hoop Schacht IV, Wasserzuläufe z.T. unter hohem Druck 10 at / Schacht am Nordrand des Zwickauer Reviers insgesamt 40,21 l/s aus mehreren Einzelzuflüssen / Thurm 40 l/s, artesisch (Störung ?) / zahlreiche Bohrungen im westl. Teil der VES erbrachten 6 bis 27 l/s / Beraz-Brunnen Lichtenstein / Bereich Helmsdorf: zahlreiche z.T. stark artesische, z.T. störungsgebundene Grundwasserzuläufe / Raum nördl. Crimmitschau und westl. von Meerane: Grundwasser in Gera-/ Mülsen-Folge vermutlich gespannt unter Zechstein	Kontrast zwischen tektonisch gestörten und ungestörten Bereichen oft mehr als 2 Größenordnungen <u>oberflächennaher Bereich allg.</u> $T=10^{-2}$ bis 10^{-5} (ZGI 1984) <i>Raum Zwickau:</i> T um $4-8 \cdot 10^{-3}$ (in Hauptfließrichtung SE-NW bis $1,9 \cdot 10^{-2}$; in SW-NE Richtung um $4 \cdot 10^{-3}$ (GEOS 1996b) für die obersten 100 m <i>Raum Pleißeetal:</i> T um $5 \cdot 10^{-4}$ ($5 \cdot 10^{-5}$-$3 \cdot 10^{-3}$) <i>Raum Glauchau-Meerane:</i> T um $5 \cdot 10^{-4}$ (10^{-4}-$6 \cdot 10^{-3}$) <i>zentrale Störungsbereichen oder Störungskreuzen:</i> T 10^{-2} bis $2 \cdot 10^{-3}$ <i>Randbereiche von Störungen:</i> $T=10^{-3}$ bis $5 \cdot 10^{-4}$; im ungestörten Gestein: 10^{-4} bis 10^{-5} (nach JORDAN & WEDER 1995) <i>Helmsdorf-Crossen:</i> T meist 10^{-5} bis 10^{-6}; in Störungsbereichen meist $2 \cdot 10^{-4}$ bis $2 \cdot 10^{-5}$ (max. 10^{-3}) (PAUL 1998b); k_f um $3 \cdot 10^{-6}$ (G.E.O.S 1996) <i>Raum Lichtenstein:</i> T meist 3 bis $8 \cdot 10^{-4}$; lokal um 10^{-5} ($2 \cdot 10^{-5}$-$2 \cdot 10^{-3}$) <i>Südlicher Muelsengrund:</i> T bis $1,6 \cdot 10^{-2}$ ($k_f=1-3 \cdot 10^{-4}$) <i>Südl. VES-Bereich:</i> T $4 \cdot 10^{-5}$-$8 \cdot 10^{-4}$ ($k_f=4 \cdot 10^{-7}$-$8 \cdot 10^{-6}$) <u>Speicherkoeffizient:</u> $S=10^{-4}$ (GEOS 1996b) <u>Höher mineralisierte Wässer:</u> gering erhöhte Gesamtmineralisationen (z.B. Cl^- 170 g/l in Schacht am Nordrand des Zwickauer Reviers) nachgewiesen; tiefere Grundwasser-Vorkommen im Bereich Mülsengrund (etwas erhöhte Gesamtmineralisationen)

Leukersdorf-Folge	untergliedert sich regional abhängig in mehrere hydrogeologische Einheiten; GWL/GWGL	wichtiger GWL; lokal auch Doppel-Porositätseigenschaften stark schwankende Grundwasserführung (gut bis sehr gering) in Abhängigkeit von der lithologischen und strukturellen Ausbildung (vgl. unten; regionale Unterschiede) Grundwasserführungen entlang eines Horizontes selten über größere Entfernungen verfolgbar (!) höhere Grundwasserführungen sind fast immer an Kluft- bzw. Störungszonen gebunden im mittleren und östlichen Teil der VES auch Grundwasserführungen in konglomeratischen Lagen der oberen Teilfolge; die liegende Teilfolge meist pelitisch-GWGL; lokal Stockwerksbildung Quellenbildung an Schicht- und Störungsflächen <i>Großraum Zwickau:</i> Grundwasserführung vermehrt in den oberen und unteren Abschnitten der Leukersdorf-Folge nachgewiesen Ergiebigkeit von West nach Ost zunehmend gute bis sehr gute Grundwasserführung in der Zersatz- und Auflockerungszone sowie in Störungsbereichen in tonig-schluffigen Bereichen nur geringe oder keine Grundwasserführung (insbes. In der oberen Teilfolge) gute bis geringe Grundwasserführung in sandig-konglomeratischen Horizonten (meist in der unteren Teilfolge) <i>Lungwitztal, St. Egidien:</i> wichtiger GWL in Verbind. Mit d. lokalen Störungssystemen herzyn., erzgeb. Und rhein. Elemente sehr heterogene und kleinräumig wechselhafte Lithologie stark variierende GWL-Mächtigkeiten 3 GWS z.T. mit hydraulischen Kurzschlüssen über Störungen <i>Mülsengrund:</i> von Gera-/ Mülsen-Folge überlagert mehrere GWL in kongl.–sandigen Lagen der oberen und unteren Abschnitte	<u>oberflächennaher Bereich allg.:</u> $T \text{ um } 5 \cdot 10^{-6} - 10^{-4}$ <i>Zwickau-Reinsdorf:</i> $T = 7,1 \cdot 10^{-3} (k_f = 9,3 \cdot 10^{-5})$ <i>Zwickau-Schedewitz:</i> $k_f = 2 \cdot 10^{-8}$ (CWH 1994, Pumpversuch) <i>Bereich Lungwitztal, St. Egidie:</i> $T = 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-5}$ (VEB HYDRO 1982b, UFZ&HGC 1996); 3 weitere GWMST: $T = 2 - 4,6 \cdot 10^{-4}$ <i>Bereich Lugau-Oelsnitz:</i> $T = 4 \cdot 10^{-6} - 1,45 \cdot 10^{-5} (k_f = 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6})$ <i>Raum Chemnitz:</i> <u>Zeisigwaldtuff</u> (stark abhängig von tektonischer Situation), vgl. auch (KRÄMER 2000): $T = 7,3 \cdot 10^{-6} - 1,8 \cdot 10^{-4}$ (ZIMMERMANN & KÜHNAPFEL 1993) $T = 1,14 \cdot 10^{-5} - 1,32 \cdot 10^{-3}$ (BLASY et al. 1994) $T = 6,7 \cdot 10^{-6} - 6,7 \cdot 10^{-3}$ (HPC 1996) $T = 6,8 \cdot 10^{-5} - 10^{-2}$ (KRÄMER 2000) $k_f = 6,8 \cdot 10^{-7} - 2,6 \cdot 10^{-5}$ (EULENBERGER 1994) 3 GWMST bei Ch.-Reichenbrand: $T = 5 \cdot 10^{-5} - 1,3 \cdot 10^{-4}$ <u>Verwitterungszone</u> $T = 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$ (ZIMMERMANN 1998) <u>Reinsdorf-Horizont</u> (Karbonate) $T = 4 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-6}$ (stark vom Klüftungsgrad abh.) (ZIMMERMANN 1998) <u>flood plain Sedimente</u> (Schluffsteine bis Sandsteine) $T = 5 \cdot 10^{-5} - 10^{-6}$ (ZIMMERMANN 1998)	<u>Höher mineralisierte Wässer:</u> <i>Oelsnitzer Revier:</i> in der unteren Teilfolge: zahlreiche Sohlen (NaCl haltig; einmal auch H₂S) <i>Zwickauer Revier:</i> nur am Bahnhofs-schacht in 97 m Tiefe nachgewiesen; vermutlich weitere <i>Mülsengrund:</i> höher mineralisierte Wässer im liegenden GWL; allg. hohe Karbonathärten (11-13,4 °dH) (BLÜHER 1960) <i>St Egidien:</i> Tiefbrunnen bei St. Egidien (UFZ 1996)

(Fortsetzung Leukersdorf-Folge)		<i>Raum Chemnitz (Ostteil der VES)</i> Obere Leukersdorf-Teilfolge (Zeisigwaldtuff) als oberes von 3 GWS mit verschiedenen guter hydraulischer Verbindung ausgebildet (als weitere die Vulkanite der Planitz-Folge, und Kongl. Der unteren Härtensdorf-Folge) Insbes. Zeisigwaldtuff aufgrund besonders guter Klüftigkeit mit sehr guter GW-Führung (Mächtigkeit 20 bis über 90m) Schluff- und Tonsteine der Unteren Leukersdorf-Folge wirken als GWH <u>Beispiele Grundwasserführung, Leukersdorf-Folge:</u> <i>Obere Teilfolge:</i> 4-6 l/s im Mülsengrund (generell?) / Gersdorf, SE v. Oberlungwitz 4-5 l/s / Hohenstein-Ernstthal 4,2 l/s, bzw. 16 l/s nur einige 100 m entfernt im gleichen Horizont; (Einfluß Granulitgebirgsrandstör. (hier Hohensteiner SZ) wahrscheinlich); Oelsnitz einige l/s / Frauenreuth (Ostrand Werdauer Wald) 3 Brunnen in sandig-kongl. Fazies mit 3,5 bis 6 l/s / zahlreiche Bohrungen im Westteil der VES (Südflanke) fördern Grundwasser dieser Teilfolge zusammen mit „Mülsen-Grundwasser“ (Oelsnitz) / Brunnen Langhessen-Schellergrund / Baugrube Kornmarkt: sehr junge bis sehr alte Wässer auf engstem Raum, insges. 10-15 m³/h; Störungsbereich vermutet <i>Untere Teilfolge:</i> Werdauer Wald, 5 km westlich Werdau, 3-6 sandig-kongl. Bänke liefern 0,5 l/s	Gesamtporosität: um 30 % (zwischen 12,9 und 50,5 % (KLEMM & RIESE 1992)	

Planitz-Folge	meist GWGL; mit wenigen Einschaltungen von GWL-Horizonten	kaum als GWL von Bedeutung; allgemein geringe, im Osten der VES geringe bis gute Grundwasserführung Grundwasserführung je nach Fazies stark schwankend; zahlreiche stauende Zwischenschichten nur lokal von Bedeutung durch Grundwassergewinnung aus höher permeablen Horizonten, insbesondere in den Ausstrichbereichen der östlichen VES gute Grundwasserführung in Tuffhorizonten (z.B. im Melaphyr im Zwickauer Revier (WAPPLER 1898) und in geklüfteten Phorphyr (-tuffen) sowie in den Ausstrichbereichen am südlichen und nördlichen Beckenrand Grundwasserführende Horizonte (z.B. gröberklastische Einschaltungen) sind jedoch nicht aushaltend und in vielen beckenzentralen Schächten trocken <i>östlicher Teil der VES:</i> allgem. höhere Grundwasserführung in der Planitz-Folge als im westl. und zentr. Teil der VES je nach faziell-tektonischer Ausbildung GWL (z.B. Tuffe und am Beckenrand) oder GWGL (Ignimbrite, Pelite); GWL/GWGL-Modell nach TUNGER 1991, VOGEL 1992 und ZIMMERMANN & KÜHNAPFEL 1993 <u>Beispiele-Grundwasserführung:</u> 300 m NW Bahnhof Jahnsdorf 8 l/s / Östlich Kuhschappel 2,1 l/s	<u>oberflächennaher Bereich allg.:</u> $T=10^{-5}-10^{-4}$; selten 10^{-3} <u>Höher mineralisierte Wässer:</u> <i>Zwickauer Revier:</i> zahlreiche in größeren Tiefen (>300 m), z.B. Karl-Marx-Schächte; Martin-Hoop-Schächte (vgl. SCHRÄBER 1968) <i>Lugau-Oelsnitzer Revier (,S.' steht für Schacht):</i> Rudolf-Breitscheid-S. (Vereinig-Feld-S.) in Mergel/Dolomitlage Pluto-S. in Mergel-Dolomitstein-Lage (reichlich NaCl und etwas H₂S) in 470 m Steinkohlenwerk Deutschland II Teutonia Schacht AII (westlich von Gersdorf, 2 km nördl. des Lugau Oelsnitzer Reviers) in Kongl. (NaCl) in 513 m Tiefe Rudolf-Breitscheid-S. (Vereinig-Feld-S.) in ca. 600 m in Mergelstein-Dolomitlage

Härtensdorf-Folge	meist GWGL; mit gelegentlichen Einschaltungen von GWL-Horizonten (Ausstrichsbereiche/basale Abfolgen)	gebietsweise als GWL von Bedeutung; im Westen VES geringe; im Osten mittlere bis sehr gute Grundwasserführung, insbesondere im Senkenrandbereich <i>Im Westteil der VES:</i> allgemein geringe Grundwasserführung; nur lokal in Ausstrichbereichen und entlang höher permeabler Horizonte von einiger Bedeutung vereinzelte Schachtzuflüsse (Zwickau-Oelsnitz) von max. 0,5-0,6 l/s (BLÜHER 1960) <i>Im Ostteil der VES:</i> mittlere bis sehr gute Grundwasserführung, sehr gute Grundwasserführung mit Kluftwasseraustritten z.B. in den basalen Konglomeraten und in den Ausstrichbereichen, (Chemnitz-Zeiskwald-Hainichen) lokal Quellenbildung an Klüften und Schichtflächen hangende pelitische Folgen (Ton- und Schluffsteine) i.d.R. GWH bis GWGL	<u>oberflächennaher Bereich allg.:</u> <i>Westteil der VES:</i> T oberflächennah allg. 10^{-6}-10^{-4} <i>Ostteil der VES:</i> T=10^{-4}-10^{-3}; z.T. 10^{-5} <u>Höher mineralisierte Wässer:</u> Auftreten „chloridischer, harter Wässer“ aus Klüften: „häufig“ (STUTZER 1935, ARNOLD 1900/ bzw. „vereinzelt“ (BLÜHER 1960) <i>Zwickauer Revier:</i> zahlreiche in größeren Tiefen (>300 m), vgl. (SCHRÄBER 1968), z.B. Friedrich-Nikolai Schacht (I) (Tiefbau-S. I) in Sdst. Bank; Karl-Marx-Schächte I-IV in Tiefen > 600 m (Härtensdorf- bzw. Zwickau-Folge) die höchstkonzentrierten Solen im Revier; Martin-Hoop-Schächte (?) <i>Lugau Oelsnitzer Revier:</i> Rudolf-Breitscheid-S. I (Vereinigt-Feld-S. I) in Kongl. In 624 m; Albert-Funk-S. I (Vereinsglück-S.I) in Kongl in 400 m Tiefe; Kaisergrube-S. I (0,57 l/s, mit 20 °C) in 388 m; Konkordia S. Gasausbruch mit Wasseranteil (viel N₂, wenig CO₂, H₂, kaum Methan) in Kongl.- und Sandst.- Schichten der oberen Bereiche der Härtensdorf-Folge in 507 m; Steinkohlenwerk Deutschland II (nicht näher definiert)

Zwickau Schichten (Oberkarbon)	meist GWGL	nur im Zentralteil der VES, am südlichen Beckenrand anstehend	primär geringe oder fehlende; selten mittlere Grundwasserführung (BLÜHER 1960, KAULFUß & MÜLLER 1996 u.a.) primär GWGL mit Abdichtung des Lieg. Anthropogene Störbereiche mit sehr guten Wasserwegsamkeiten sind die vom Steinkohlenbergbau beeinflussten Regionen im Raum Zwickau und Lugau-Oelsnitz (Auskohlung und Versatz meist mit Handbergeversatz, gut durchlässige tertiäre Sande, bzw. kein Versatz) (Steinkohlen A-V 1912) Setzungen und resultierende Rissbildungen/Kluftweitungen aufgrund des Steinkohlenabbaues sind auch für die hydraulischen Eigenschaften der überlagernden Horizonte von Bedeutung	keine Bedeutung als GWL Zuordnung hydrogeologischer Parameter aufgrund fehlender Untersuchungen schwierig (HGN 1996 u.a.) <u>oberflächennaher Bereich allg.:</u> $T=10^{-7}-10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Ausstrichsbereiche), sonst meist deutlich darunter Ausnahme: Bergbaubeeinflusste Bereiche um Zwickau und Lugau-Oelsnitz; hier deutlich höhere Durchlässigkeiten möglich <u>Höher mineralisierte Wässer:</u> höher mineralisierte Wässer im Kohlengebirge sehr häufig (Chlorid vor allem mit Ca, Mg, Na, K, Li) (ARNOLD 1900); höher mineralisierte Wässer häufig auch oberflächennah(!) (nahe Karbonausstrichen?) und in anthropogen unbeeinflussten Tiefbrunnen (BLÜHER 1960) (<i>Fortsetzung unten</i>)	
			(<i>Fortsetzung:</i> <u>Höher mineralisierte Wässer</u> <i>Zwickauer Raum:</i> zeitweise Gewinnung von NaCl und CaCl₂ (BLÜHER 1960) und Na₂CO₃ (KAULFUß 1994) sowie Ausbildung von NaCl-Stalaktiten; Gehalte im Mischwasser aller Gruben des Zwickauer Revieres (Friedrich-Nikolay-Schacht 09.02.1964, 80 l/s, (SCHRÄBER 1968)): (in mg/l) K⁺ 39, Na⁺ 2067, Ca²⁺ 2058, Mg²⁺ 558, Fe²⁺ 27, Cl⁻ 6493, Sulfat²⁻ 943, HCO₃⁻ 342. Beispiele (vgl. auch SCHRÄBER 1960); in kongl. Sdst. Zwischen Glückauf- und Hoffnungsflöz (Chlorid, Sulfat) (STUTZER 1935); Karl-Marx-S. I-IV in über 600 m Tiefe (höchste NaCl Konz.); Martin-Hoop III und IV (Zutritte ab 1000 m Tiefe); Martin-Hoop X (bei 595 und 734 m Tiefe; z.T. Härtensdorf-F. ?); Bürger-Schächte (0,5 %ige Sole in Bürgerschacht I – Salzgewinnung; insgesamt ca. 100 t NaCl und Na₂CO₃ (KAULFUß 1994); ca. 5000 mg/l NaCl); Hoffnung-Schacht; Friedrich-Nikolay-S. (u.a. in 530 m 10-12 l/s und in 600 m Tiefe 20-25 l/s) aus Klüften (z.T. Härtensdorf-F. ?) <i>Lugau-Oelsnitzer Revier:</i> allg. chloridische Wässer (BLÜHER 1960); K.-Liebknecht-S. (ehem. Kaiserin-Augusta-Schacht) in Kongl. An Basis Glückauf-Fl. (2,2 % NaCl); Steinkohlenwerk Deutschl. II (nicht näher definiert)		
Hainichen Schichten	GWL	nur im Ostteil der VES	mittlere bis sehr gute Grundwasserführung; deutliche Klüftung; lokal Quellenbildung an Klüften	T: oberflächennah meist 10^{-3} bis $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (HK50 1984 u.a.)	aufgrund des sehr begrenzten Vorkommens in der VES oh-

Flöha Schichten	GWL	nur im Ostteil der VES	mittlere bis sehr gute Grundwasserführung; deutliche Klüftung; lokal Quellenbildung an Klüften		

Quellen: Auswertung resultiert aus der Kombination und Interpretation von Daten der folgenden Quellen: Datenbank des FIS Hydrogeologie (vgl. Textteil), ZGI 1984, VEB HYDROGEOLOGIE 1972-1982 oder wie angegeben; Angaben zu hochmineralisierten Wässern nach SCHRÄBER 1968, BLÜHER 1960 oder wie angegeben

Tabelle 1 Hydrogeologische Kurzcharakteristik des die VES umgebenden Grundgebirges

Gesteine ¹⁾	Hydrogeologische Kurzcharakteristik ²⁾
Karbonate	verkarstete Karbonate des Wildenfelder Zwischengebirges gute Grundwasserführung; kristalline Karbonate aufgrund der sehr lokalen Verbreitung unwesentlich
Tonschiefer/ phyllit. Tonschiefer	geringe bis sehr geringe Grundwasserführung (meist als hypodermischer Abfluss); geringe Klüftung; schluffig verwitternd
Quarzite (Quarzitschiefer, Tonschiefer)	Quarzit mittlere bis gute Grundwasserführung, da sehr klüftungsfreundlich (hypodermischer und Grundwasser-Abfluss; selten Kluftquellen); Quarzitschiefer und Tonschiefer des Wildenfelder Zwischengebirges weisen eine mittlere Grundwasserführung auf
Kieselschiefer	nur im Ostteil der VES von Bedeutung; allg. sehr gute, aber aufgrund begrenzter Vorkommen quantitativ geringe Grundwasserführung; sehr gute Klüftung (Schicht- und Kluftquellen); z.T. stark sulfathaltig (aus begleitendem Alaunschiefer)
Grauwacken	stark schwankende, gute bis keine Grundwasserführung (stark vom Klüftungsgrad abhängig)
Phyllite	geringe bis keine Grundwasserführung (selbst in Störungsbereichen); sehr geringe Klüftung
Glimmerschiefer	allg. geringe bis lokal mittlere Grundwasserführung bei geringer bis sehr geringer Klüftung; in Störungsbereichen jedoch z.T. gute Grundwasserführung; vereinzelt hypodermischer Abfluß; Hangschuttquellen
Gneise	allg. geringe, z.T. mittlere Grundwasserführung; meist gering geklüftet; in Störungsbereichen und Kluftzonen stärker geklüftet mit oft guter Grundwasserführung; vorwiegend hypodermischer Abfluß; Hangschutt- und Kluftquellen
Granulite	meist geringe, z.T. gute Grundwasserführung; schwache aber regelmäßige Klüftung; in Störungsbereichen auch deutlich geklüftet; dort mittlere bis gute Grundwasserführung mit unregelmäßigem aber deutlichem Grundwasser-Abfluß (hypodermische und Kluftquellen möglich)
Granite	älterer Intrusivkomplex; netzartiges Kluftsystem mit geringen Öffnungsweiten; häufig tonig zugesetzt; wesentliche Grundwasserführung nur in grusig verwitterten Bereichen, in Störungsbereichen und in den Talauen - im unverwitterten/ ungestörten Gestein GW-Führung minimal; Hangschuttquellen des hypoderm. Abflusses; jüngerer Intrusivkomplex: gute bis sehr gute Grundwasserführ. im Bereich von Störungen
Rhyolite (Quarz- und Granitporphyre)	klüftungsfreundliche Gangzonen, jedoch aufgrund der geringen Verbreitung im Betrachtungsgebiet nur lokal von Bedeutung
Diabase, Diabastuffe, Basalte, Melaphyre, andere Vulkanite	stark schwankende Grundwasserführung; an Kluftzonen gebunden-dort geringe bis mittlere Grundwasserführung (Kluftquellen möglich); Basaltdecken im Betrachtungsgebiet von untergeordneter hydrogeologischer Bedeutung
Basische Tiefengesteine	meist keine Grundwasserführung aufgrund kurzer und/oder geschlossener Klüfte; vereinzelt hypodermischer Abfluß

Quellen: nach BLÜHER (1960), BSA (1981), HGN (1996), HK50 (1984), VEB HYDROGEOLOGIE (1972-1982); Angaben zur Mineralisation von Wässern nach SCHRÄBER (1968) und BLÜHER (1960) ¹⁾ Paläozoisch konsolidierte Umrundung und Untergrund der Vorerzgebirgssenke ²⁾ insgesamt deutlich geringere Grundwasserführung als die Rotliegendfolgen, jedoch in Abhängigkeit von der Lithologie stark schwankend; das im Bereich der VES unterlagernde Grundgebirge wird in der Literatur als "vollkommen trocken" bezeichnet (BLÜHER 1960, BLÜHER 1968 u.a.); T: meist deutliche geringer als $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (vgl. Textteil); Ausnahme bilden Störungszonen, wo auch gering Grundwasserführende Gesteine weisen in Zonen tektonischer Beanspruchung meist eine deutlich höhere Grundwasserführung aufweisen (vgl. Textteil)

Anlage 4

Diskussion unterirdischer Einzugsgebiete

1 Diskussion unterirdischer Einzugsgebiete im Modellraum

1.1 Westlicher Teil der Vorerzgebirgssenke

Im westlichen Teil der Vorerzgebirgssenke sind neben den unterirdischen Einzugsgebieten (A_{Eu}) der rotliegenden Grundwasserleiter der Auflockerungszone und des unverwitterten Kluftgesteins auch jene der känozoischen Ablagerungen von Bedeutung. Dazu gehören die bis 8m mächtigen quartären Sedimente im Tal der Zwickauer Mulde sowie z.T. sehr mächtige Ablagerungen von Tertiärsedimenten auf Hochflächen, z.B. im Bereich Helmsdorf/Dänkritz. Dabei bilden die quartären und tertiären GWL, sowie die Auflockerungszone i.d.R. ein gemeinsames Grundwasserstockwerk mit einheitlichem unterirdischen Einzugsgebiet. Im Stadtbereich von Zwickau konnte meist eine enge hydraulische Verbindung zwischen diesen GWL nachgewiesen werden (GUB 1998a,b, GÖTTELMANN u.a. 1998 u.a.). Für tiefer liegende Rotliegendgrundwasserleiter mußte die Abgrenzung der A_{Eu} aufgrund fehlender anderer Anhaltspunkte auf Grundlage der Gebietsmorphologie und Tektonik erfolgen. Hauptvorfluter und Entlastungsbereich im Gebiet sind die Pleiße und die Zwickauer Mulde. Die sich aufgrund der dichten Besiedlung und starken Beeinflussung des Grundwasserregimes durch den Bergbau im Zwickauer Raum ergebenden Probleme werden im Textteil der Arbeit diskutiert.

Das nördliche Einzugsgebiet der Pleiße

Für die nördlichen Teileinzugsgebiete der Pleiße muss entlang der herzynisch (NW-SE) und N-S verlaufenden Störungs- und Kluftsysteme generell mit einer Abweichung (Erweiterung bzw. Einschränkung) des unterirdischen Einzugsgebietes (A_{Eu}) gegenüber dem oberirdischen (A_{Eo}) gerechnet werden. Anhaltspunkte dafür gibt es für (vgl. Textteil):

- den Bereich Werda-Crimmitschau: Grundwasserzustrom über Störungen aus SE und S (Ausweitung des A_{Eu})
- das Teileinzugsgebiet Koberbach: Einschränkung des A_{Eu} (Grundwasserabstrom nach SE ins Pleißetal entlang der Koberbachtal-Störung)

Das südliche Einzugsgebiet der Pleiße und Zwickauer Mulde

Dies umfasst vor allem das Erzgebirgskristallin im südlichen Vorland der Vorerzgebirgssenke, südwestlich bis südöstlich von Zwickau.

Das Erzgebirgskristallin ist hier vertreten durch wenig klüftungsfreundliche Gesteine wie Tonschiefer und Phyllite. Eine wesentliche Grundwasserführung ist fast immer an Störungs-, Kluft- und Zerrüttungszonen gebunden. Es existiert ein geringer Kenntnisstand hinsichtlich der Abgrenzung der A_{Eu} (Handlungsbedarf). In der Literatur wird deshalb im Regelfall näherungsweise von $A_{Eu}=A_{Eo}$ ausgegangen (z.B. VEB HYDRO 1977), wobei die A_{Eu} zumeist entsprechend der Ausdehnung der A_{Eo} über den Rand der VES nach S hinausreichen. Allerdings ist der Grundwasserstrom über den südlichen Vorerzgebirgsrand aufgrund des hydrogeologischen Baus als gering einzuschätzen (vgl. Textteil).

Für folgende A_{Eu} können konkretere Annahmen getroffen werden:

- A_{E0} Ortslage Schönfels (1): $A_{Eu}=A_{E0}$ (?); eine Ausdehnung von A_{Eu} entlang eines N-S verlaufenden Störungsschwarms wird vermutet
- A_{E0} Ortslage Talmühle/Schönfels (nw von (1)): Die Ausdehnung des zugehörigen A_{Eu} ist nicht genau bekannt. Wahrscheinlich entspricht es A_{E0} ; nach (VEB HYDRO 1977) reicht es nach E etwas über A_{E0} hinaus, was aber nicht nachvollzogen werden kann.
- A_{E0} Schönfels/Altrottmannsdorf (w von (1)): Wahrscheinlich gilt $A_{Eu}>A_{E0}$, da eine Erweiterung von A_{Eu} über Störungsschar bzw. Kluftzone nach SW zu erwarten ist (GW-Zufluss).
- mehrere A_{E0} Ortslagen Neumark/Altrottmannsdorf (sw von (1)): Ausdehnung der zugehörigen A_{Eu} unsicher, reichen jedoch vermutlich nach S über A_{E0} hinaus.

Südlicher Senkenbereich der westlichen Vorerzgebirgssenke

Dies umfasst die Bereiche um und nördlich der Ortslagen Lichtentanne, Planitz, Wildenfels. Eine Abgrenzung der A_{Eu} ist hier für weite Teile, nicht zuletzt aufgrund der starken anthropogenen Beeinflussung durch den Kohlebergbau und den nur ansatzweise geklärten Einfluss hydraulisch aktiver Störungen im Bereich Zwickau/Zwickauer Mulde (vgl. Textteil), nicht sicher möglich (Handlungsbedarf). Zunächst muß id.R. näherungsweise von $A_{Eu}=A_{E0}$ ausgegangen werden.

Eine Ausnahme bildet der Stadtbereich Zwickau, wo durch Untersuchungen u.a. im Rahmen der sogenannten Komplexuntersuchung Zwickau-Oelsnitz (BRAUSE 1999) einige, wenngleich insbesondere hinsichtlich der Rotliegendgrundwasserleiter noch ungenügende Anhaltspunkte vorliegen. Im unmittelbaren Stadtbereich umfassen die A_{Eu} für das obere Rotliegende auch die des überlagernden Quartärgrundwasserleiter, da davon ausgegangen werden kann, dass trotz lokaler Ausnahmen, z.B. Bereich Kornmarkt (vgl. Textteil) eine gute hydraulische Verbindung zwischen Quartärgrundwasserleiter und oberstem Rotliegendgrundwasserleiter, vor allem in den vom Steinkohlenbergbau beeinflussten Bereichen, besteht (GUB 1998a, GÖTTELMANN et al. 1998 u.a.).

Außerhalb des unmittelbaren Stadtbereiches Zwickau und des Gebietes Crossen/Helmsdorf konnten folgende Anhaltspunkte zu den A_{Eu} recherchiert werden (mittlerer Handlungsbedarf).

- A_{E0} Bereich Schneppendorf: Zugehöriges A_{Eu} gegenüber A_{E0} nach SW vermutlich erweitert, da entlang von Störungen auf Bereiche des südlich angrenzenden A_{E0} übergreifend; mglw. nach E verkürzt; ansonsten Annahme $A_{Eu}=A_{E0}$
- A_{E0} Bereich Pöhlau: Zugehöriges A_{Eu} ist gegenüber A_{E0} im Kreuzungsbereich des 1. Pöhlauer Sprung und einer erzgebirgischen Querstörung mglw. nach ENE etwas erweitert. Die u.a. in VEB HYDRO (1978) postulierte Erweiterung nach WSW kann nicht nachvollzogen werden; ansonsten Annahme $A_{Eu}=A_{E0}$
- A_{E0} Eulitzquelle Grünau: Hinweis auf $A_{Eu}=A_{E0}$

Stadtgebiet Zwickau

Im Stadtgebiet von Zwickau kommt es entlang der Zwickauer Mulde lokal zur Umkehrung des natürlichen Fließregimes. Oberflächenwasser der Zwickauer Mulde infiltriert in den quartären GWL (Influenz). Das je nach Muldenwasserstand mehr oder minder deutlich ausgeprägte Druckgefälle zwischen "Vorfluter" und Grundwasseroberfläche wird durch die Abwasserpumpwerke Silberhof und Krebsgraben westlich der Mulde sowie durch die Pumpstationen im Bereich der Bockwaer Senke auf östlicher Muldenseite verursacht. In diesen Bereichen ist bei Vergleich des Muldenwasserstands mit ufernahen Grundwassermessstellen ein deutliches Druckgefälle in Richtung Grundwasser festzustellen (GUB 1998a, HGN 1997, WASY 1998). Dieses wirkt sich auf die Abgrenzung der A_{Eu} im Stadtgebiet aus. In den Bereichen mit influenten Abflussverhältnissen fungiert die Zwickauer Mulde quasi als Grundwasserscheide. In diesen Fällen wird von der Annahme ausgegangen, dass Oberflächenwasser aus der Zwickauer Mulde beidseitig in den GWL infiltriert, es aber zu keinem wesentlichen direkten Grundwasserfluss zwischen den quartären GWL beidseitig der Mulde kommt. Grundlage für die Abgrenzung der unterirdischen Einzugsgebiete (vgl. Textteil) sind die Oberflächen- bzw. Grundwasserstände der Stichtagsmessung 02/97, weil zu diesem Zeitpunkt die Zwickauer Mulde eine Wasserspiegellage ähnlich der des für den mittleren Durchfluss charakteristischen aufwies (WASY 1998). Für den Innenstadtbereich und nördlichen Stadtbereich wurden auch Daten aus dem MOST-Projekt (HGN 1997) und aus den Untersuchungen zum Tunnelprojekt (GUB 1998a) verwendet. Für die Hangbereiche der Zwickauer Mulde kann im Bereich der Bockwaer Senke (GFE 1985, STORCH 2001) und näherungsweise für Planitz (VEB HYDRO 1977) von $A_{Eu}=A_{Eo}$ ausgegangen werden.

Gebiet Crossen/Helmsdorf und die Grundwasserscheide Zwickauer Mulde/Pleiß

Die exakte Lage der Grundwasserscheide zwischen Pleiße und Zwickauer Mulde ist nur teilweise bekannt. Hydroisohypsenpläne liegen aus dem lange Zeit zur Trink- und Brauchwassergewinnung rege genutzten Pleißetal vor (VEB HYDRO 1979). Sie lassen erkennen, dass Grundwässer auch aus Gebieten östlich der oberirdischen Wasserscheide zwischen Pleiße und Zwickauer Mulde über herzynisch streichende Störungssysteme (z.B. Oberhohndorfer Hauptverwerfung/Lauterbacher Störung) in Richtung NW in die Pleiße entlasten (siehe oben und vgl. Textteil). Zudem weisen die Rotliegendeschichten im Gebiet Crossen-Helmsdorf ein Einfallen schwach nach NW auf. Es kann von einer Verschiebung der unterirdischen Wasserscheide zwischen Pleiße und Mulde in Richtung Zwickauer Mulde ausgegangen werden.

Auch durch Untersuchungen der WISMUT GmbH im Rahmen der Erkundung und Sanierung der Aufbereitungsanlage Crossen und der IAA Helmsdorf, sind lokal Informationen zur Grundwasserdynamik in diesem Bereich vorhanden. Aus den daraus verfügbaren Unterlagen (Berichte und mündliche Auskünfte) konnten Angaben zum Verlauf der Grundwasserscheide zwischen Mulde und Pleiße sowie zur Grundwasserdynamik verwendet werden. Zum Verlauf der unterirdischen Hauptgrundwasserscheide zwischen Pleiße und Mulde nördlich und südlich von Crossen-Helmsdorf sowie zur Abgrenzung der kleineren unterirdischen Einzugsgebiete zwischen Pleiße und Mulde liegen keine verwendbaren Angaben vor.

1.2 Zentraler Teil der Vorerzgebirgssenke

Mülsengrundgebiet

Das Mülsengrundgebiet sind tektonische Strukturen, insbesondere herzynische und erzgebirgische Störungs- und Kluftzonen besonders stark ausgeprägt und bestimmen die Grundwasserdynamik maßgeblich mit (vgl. Textteil).

Im Ergebnis von Grundwasserhaushaltsuntersuchungen für den Mülsengrund insgesamt, konnte eine Einengung des A_{Eu} gegenüber dem A_{Eo} postuliert werden (vgl. Textteil). Aktuelle Untersuchungen des Wasserhaushaltes für den Mülsengrund (2007, noch nicht vorliegend) werden hier weitere Erkenntnisse liefern.

In tieferen Grundwasserstockwerken ausserhalb des Einflusses der nächstgelegenen Vorfluter ist sicherlich von einem Grundwasserabstrom nach NW auszugehen, der an die großen Kluft- und Störungszonen dieses Raums (z.B. die Pöhlauer Sprünge) gebunden sein kann.

Im Mülsengrund wurde bisher von mehreren Grundwasserstockwerken innerhalb des oberen Rotliegenden (Gera-/Mülsen- und Leukersdorf-Folge) ausgegangen, die unterschiedliche A_{Eu} aufweisen (VEB HYDRO 1972). Diese konnten jedoch nicht näher definiert werden. Tiefe Brunnen stellen danach die einzige hydraulische Verbindung zwischen hangendem und liegendem Grundwasserstockwerk dar. Der Brunnenbetrieb führte zur Ausbildung eines Absenkungstrichters im hangenden Stockwerk (z.B. Brunnen Hy Staf 19/72, Hy Gl 1/74, Hy WrdfGl 1/74, TB Oelsnitz 1, Hy Staf 22/72). Die Unterscheidung von A_{Eu} einzelner Grundwasserstockwerke schien aufgrund dieser komplexen hydraulischen Bedingungen nicht sinnvoll möglich (vgl. Textteil). Nach neueren Untersuchungen (SZYMCZAK 2000) kann im Mülsengrund jedoch von lediglich einem Grundwasserstockwerk ausgegangen werden. Dieses Stockwerk umfasst die vor allem die grundwasserführenden Bereiche der Gera-/Mülsen-Folge sowie lokal Teile der Leukersdorf-Folge. Da es sich hier um ein u.a. für die Grundwasserdynamik sehr wichtiges Gebiet handelt sind weitere Erkundungs- bzw. Monitoringmaßnahmen dringend zu empfehlen.

Für den weiteren Bereich des Einzugsgebietes Mülsengrund können auf Grundlage von Literaturangaben (VEB HYDRO 1972, ZGI 1984), unveröffentlichtem Kartenmaterial aus lokalen Grundwassererschließungsmaßnahmen und eigener Interpretation folgende Angaben zur Abgrenzung der A_{Eu} gemacht werden:

- nach W: Grundannahme $A_{Eu}=A_{Eo}$
 - Unmittelbar südlich von Thum wird das A_{Eu} durch eine begrenzende Störung geringfügig eingeschränkt.
 - zwischen Ostgrenze Waldgebiet Graurock im Norden und Pöhlwaldsiedlung im Süden erweitert sich das A_{Eu} im Bereich einer erzgebirgischen Störungsschar vermutlich etwas nach W
 - zwischen Pöhlwaldsiedlung im Norden und Hoher oder Freitagsstrasse im Süden schränkt sich das A_{Eu} mglw. geringfügig ein
- nach N: Durch Wirken hydraulisch aktiver Störungen wird $A_{Eu}<A_{Eo}$ vermutet, Verlauf aber unklar

- nach NE: Ein Grundwasserzustrom aus dem Bereich des 2. Pöhlauer Sprunges und seiner Querstörungen ist zu erwarten. Daher ist eine Erweiterung des A_{Eu} gegenüber dem A_{Eo} insbesondere im Bereich des Rümpfwaldes und der Funkenburg südwestlich von Lichtenstein möglich. Die Lage der Grundwasserscheide zu den A_{Eu} des Lungwitzbaches und Rödlitzbaches ist jedoch unsicher.
- nach E: Zwischen Heinrichsort im Norden und dem Heidelberg im Süden muß von $A_{Eu}=A_{Eo}$ ausgegangen werden.
- nach S: Zwischen dem Heidelberg im NE und der A72 südlich Ortsmannsdorf im SW reicht das A_{Eu} sicher nach Süden über das A_{Eo} bis zum Ausstrich der Gera-/ Mülsen-Folge hinaus. Entlang hydraulisch aktiver Störungen ist eine Ausweitung des A_{Eu} mglw. sogar noch weiter nach S bis in das Untere Rotliegende möglich. Entlang der Hohen oder Freitagsstrasse nördlich von Härtensdorf kann wieder mit $A_{Eu}=A_{Eo}$ gerechnet werden.

Westliche Lungwitztalzone und unterer Rödlitzbach

Für die nur lokal bekannten, recht komplizierten Grundwasserfließverhältnisse im Bereich der Lungwitztalzone (LTZ) und des unteren Rödlitzbaches (vgl. Textteil), standen keine verwendbaren Stichtagsmessungen zur Verfügung. Die meisten bisherigen Bearbeiter gehen von der generellen Annahme $A_{Eu}=A_{Eo}$ aus. Ausnahmen gibt es aber sicherlich entlang hydraulisch aktiver Störungszonen, die hier nachweislich sowohl hemmend (Barrierewirkung und Begrenzung eines A_{Eu}) als auch leitend (Erweiterung des A_{Eu}) wirken können.

Auf Grundlage der Grundwasserbilanzierung (vgl. Textteil) kann für das Einzugsgebiet des Lungwitzbaches insgesamt ein Einschränkung des A_{Eu} gegenüber dem A_{Eo} im NW, östlich der Ortslage Glauchau, sowie im SW im Grenzbereich zum Einzugsgebiet Mülsengrund (vgl. vorheriger Abschnitt) angenommen werden. Hier ist mit einem Grundwasserabstrom entlang des 2. Pöhlauer Sprunges, der RHV, der LTZ oder/und begleitender Querstörungen zu rechnen.

Nördlicher Randbereich der Vorerzgebirgssenke

Es kann davon ausgegangen werden, daß Grundwasser aus den Randbereichen des nördlich angrenzenden Grundgebirges über die nördlichen oberirdischen Einzugsgebietsgrenzen hinaus in den Bereich der Lungwitztalzone (Lungwitzbach) entlastet schmaler Bereich nördlich der des Granulitgebirgsrandes entlastet. Ursachen hierfür sind neben dem nach N weiter ansteigenden hydraulischen Gradienten einige bis in das nördliche Grundgebirge fortlaufende herzynisch bis rheinisch streichende hydraulisch leitende Störungen. Dies betrifft im mittleren Teil der VES vor allem den tektonisch stark zerblockten Senkenrand im Raum Kuh-schappel, wo eine Ausweitung der A_{Eu} nach N zu erwarten ist. Jedoch dürften die zufließenden Grundwassermengen aufgrund des erheblichen Transmissivitätskontrastes zwischen Granulitgebirgskristallin und Rotliegendem der VES eher gering sein. Allgemein muß für diesen Bereich also von der Grundannahme $A_{Eu}=A_{Eo}$ ausgegangen werden. Auf einige Teileinzugsgebiete der Lungwitztalzone wird nachfolgend eingegangen.

Einzugsgebiet Goldbach/Hüttengrundbach

Das Einzugsgebiet ist neben der Lungwitztalkluftzone durch eine nördlich parallel verlaufende E-W-Störung sowie durch zwei im Bereich des Gold- und Hüttengrundbaches um SSW-NNE verlaufende Störungen gekennzeichnet. Erstere könnte in Zusammenwirken mit der Morphologie das unterirdische Einzugsgebiet weiter unterteilen (VEB HYDRO 1982b). Letztere könnten das A_{Eu} deutlich erweitern bzw. unterirdische Teileinzugsgebiete miteinander verbinden.

Einzugsgebiet unterer Rödlitzbach/unterer Lungwitzbach

Dieses Gebiet weist eine komplizierte geologisch-tektonische und hydraulische Situation auf. Die Abgrenzung der A_{Eu} ist vermutlich sehr differenziert und abweichend von den A_{Eo} . Sie kann jedoch aufgrund der ungenügenden Kenntnisse nicht konkretisiert werden. Hier sind dringend weitere Untersuchungen notwendig. Dies gilt gleichermaßen für den weniger gut erkundeten Raum um/zwischen Bernsdorf und dem Hegebachtal, den Grenzbereich VES/Granulitgebirge, sowie für die Lungwitztalzone insgesamt, die mit ihren hohen Durchlässigkeiten eine hydraulisch besondere Position im Norden der Vorerzgebirgssenke einnimmt.

Südlicher Randbereich der Vorerzgebirgssenke

Der hohe Transmissivitätskontrast zwischen den Gesteinen des Altpaläozoikum und dem Rotliegenden der VES lässt lediglich einen geringen Grundwasserzustrom von S in die Vorerzgebirgssenke vermuten. Ob dabei, wie am nördlichen Senkenrand, hydraulisch wirksame Störungen die sich über den südlichen Beckenrand ins Erzgebirgskristallin fortsetzen, eine wesentliche Erweiterung der A_{Eu} bewirken ist weitgehend unbekannt. Im Gegensatz zur nördlichen Grenze ist der südliche Vorerzgebirgssenkenrand jedoch nur lokal tektonischer Art, was den hydraulischen Kontakt zwischen Senke und Vorland einschränken könnte (vgl. Textteil). Für die A_{Eo} im Raum Jahnsdorf kann die Ausdehnung des zugehörigen A_{Eu} nach S entlang herzynischer Störungen vermutet werden. Darüber hinaus ist aufgrund der geringeren Durchlässigkeit des Grundgebirges in Bereichen in denen die oberirdische Wasserscheide nahe dem Rand der VES verläuft mit einer, in Abhängigkeit vom Niederschlag, sich verschiebenden Grundwasserscheide zu rechnen. In Zeiten höheren Niederschlages verschiebt sie sich in Richtung VES (Rotliegendes), in Trockenperioden dagegen in Richtung Erzgebirgskristallin.

Einzugsgebiet Oberer Rödlitzbach/Rödlitzer Hauptverwerfung

Aufgrund der Barrierewirkung der Rödlitzer Hauptverwerfung (vgl. Textteil) fungiert diese zwischen Hohndorf und Waldesruh als Grundwasserscheide (hier als östliche). Hauptentlastungsbereiche des Grundwasserflusses sind mit zahlreichen ergiebigen Brunnen das Rödlitzbachtal im W und das Hegebachtal im E und SE in denen Grundwasser z.T. artesisch austritt (VEB HYDRO 1982a u.a.). Die Grenzen des weiter unterteilbaren A_{Eu} Oberer Rödlitzbach stellen sich im Einzelnen wie folgt dar:

- nach E: Rödlitzer Hauptverwerfung (Grundwasserbarriere)
- nach N/NE: Annahme $A_{Eu}=A_{Eo}$. Einer dichten Querstörung bei Rödlitz verursacht offensichtlich nur lokal und verursacht nach VEB HYDRO (1982a) keine Einschränkung des Strömungsfeldes (?). C&E (2001) vermuten auf Grundlage elektrischer Widerstands- und radiometrischer Messungen einen oberflächennahen Grundwasserabfluß entlang der Rödlitzer Hauptverwerfung nach NW.
- nach W: Unklar. Annahme $A_{Eu}=A_{Eo}$ jedoch wird die Ausweitung des A_{Eu} nach W entlang hydraulisch aktiver erzgebirgisch streichender Störungen vermutet.
- nach S: Zumindest im SW (Gebiet Neudörfler Wald) reicht das A_{Eu} vermutlich entlang von Störungen über A_{Eo} hinaus. Generell muss jedoch von $A_{Eu}=A_{Eo}$ ausgegangen werden, da der Verlauf der unterirdischen Wasserscheide zwischen Rödlitzbach und Hegebach nicht genau bekannt ist.

Einzugsgebiet Hegebach

Es muß von $A_{Eu}=A_{Eo}$ ausgegangen werden. Das A_{Eu} ist nach VEB HYDRO (1982b) entsprechend Morphologie und unter Berücksichtigung der Tektonik in weitere unterirdische Teileinzugsgebiete untergliederbar. Unterirdische Einzugsgebietsgrenzen können wie folgt angegeben werden:

- nach E und N: Annahme $A_{Eu}=A_{Eo}$
- nach SE: Rödlitzer Hauptverwerfung
- nach W: Annahme $A_{Eu}=A_{Eo}$. Der Einfluß einer in SE-NW Richtung über die Ortslage Gersdorf verlaufenden Störung ist unklar.
- nach S: Annahme $A_{Eu}=A_{Eo}$. Die Grubenbaue des ehemaligen Steinkohlenbergbaus im Raum Lugau-Oelsnitz wird jedoch die südliche Einzugsgebietsgrenze beeinflussen, vermutlich erweitern.

Raum Oelsnitz-Lugau-Niederwürschnitz-Neuwürschnitz

Im Gebiet Oelsnitz-Lugau-Niederwürschnitz-Neuwürschnitz stehen Gesteine der Leukersdorf-Folge und, am südlichen Beckenrand, der Härtensdorf-und Planitz-Folge an. Sie weisen einen vertikal wie horizontal starken Fazieswechsel, konglomeratisch bis tonig, auf. Die daraus resultierende Inhomogenität der hydraulischen Eigenschaften der Gesteinsfolgen, sowie das Auftreten hydraulisch aktiver, meist herzynisch orientierter Störungen führt zur Ausbildung zahlreicher kleinerer A_{Eu} . Dafür sprechen auch die für ein zentrales Entlastungsgebiet relativ geringen Transmissivitäten im Bereich der Würschnitz (an Fassung 9.7. nördlich von Oelsnitz z.B. $T=1\cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) mit resultierend hohen Absenkungsbeträgen an GW-Fassungen und die geringen Grubenwasserzuläufe bei Schachtabteufungen im ehemaligen Steinkohlentiefbau, z.B. im Deutschland Schacht II 46 bis 1,1 l/s und im Heinrich Schacht 47 bis 2,2 l/s (VEB HYDRO 1982a u.a.).

Die Abgrenzung von A_{Eu} wird auch durch folgende Einflussfaktoren bzw. Kenntnisdefizite erschwert (VEB HYDRO 1982a u.a.) (vgl. Textteil):

- Über die hydraulische Aktivität der Störungen und Kluftsysteme ist in diesem Bereich konkret nur wenig bekannt. Die Rödlitzer Hauptverwerfung (RHV) ist hier vermutlich nicht mehr in dem Maße stauend wie weiter nördlich.
- Die hydrogeologischen Verhältnisse werden durch den alten Steinkohlebergbau des Lugau-Oelsnitzer Reviers kompliziert. In den Grubenbauen ist das Endflutungsniveau noch nicht erreicht. Die sich in Auffüllung befindlichen Grubenbaue bedeuten eine kontinuierliche Änderung des Speichervorrats. Der Zulauf in die noch ungefluteten Teile der Grubenbaue bewirkt dabei eine Absenkung des Grundwasserspiegels. Dies wirkt sich auf den Verlauf der unterirdischen Einzugsgebiete aus (vgl. Textteil).
- Ungewöhnlich ist auch die Lage der Würschnitz als Vorfluter des ober- und unterirdischen Abflusses. Die Gesteinsschichten im Gebiet fallen nach NW. Zudem befindet sich die oberirdische Wasserscheide in NW nur ca. 30 m über Flussniveau, bei einer dem Schichtfallen entgegengesetzten Abflussrichtung nach NE bis SE. Der westlich benachbarte Vorfluter (Hegebach) liegt dagegen 20 bis 40 m tiefer.

Für den Raum Lugau sind aufgrund der geringen Anzahl hydrogeologisch verwendbarer Aufschlüsse, kaum Aussagen zu Lage der A_{Eu} möglich. Insbesondere in Hinblick auf die laufende Flutung der Grubenbaue des Lugau-Oelsnitzer Reviers ist hier Handlungsbedarf geboten. Unterirdische Einzugsgebietsgrenzen können wie folgt angegeben werden:

- nach E und N: aufgrund fehlender Hinweise muß von $A_{Eu}=A_{Eo}$ ausgegangen werden
- nach W: A_{Eu} wird vermutlich durch die RHV begrenzt. Die hydraulische Wirkung selbiger ist auf diesem Abschnitt allerdings nur ungenügend bekannt. Eventuell greift das A_{Eu} -Neuwürschnitz über die RHV nach W hinaus.
- nach S: Vermutlich greift A_{Eu} entlang herzynischer Störungen geringfügig über A_{Eo} nach S hinaus.

Raum Erlbach-Ursprung-Leukersdorf-Jahnsdorf-Niederdorf

Dieses Gebiet mit seiner Hauptentlastungszone Würschnitz/Leukersdorfer Bach (nur der NE entlastet in den Lungwitzbach) ist wasserwirtschaftlich wenig erschlossen und daher hinsichtlich seiner A_{Eu} kaum untersucht (dringender Handlungsbedarf). Folgende Einflussfaktoren erschweren zudem eine Abgrenzung der A_{Eu} :

- der südliche Grenzbereich Vorerzgebirgssenke / Erzgebirgskristallin ist teilweise von quartären Sedimenten der Würschnitz überdeckt. Deshalb ist relativ wenig über den geologisch-tektonisch und hydrogeologisch-hydraulischen Charakter dieses Raumes bekannt (vgl. Textteil)
- Im Bereich der Steegenwiesen, in der Grenzregion Vorerzgebirgssenke / Erzgebirgskristallin tritt Grundwasser artesisch aus. Menge und Herkunft (aus dem Rotliegenden oder dem Grundgebirge) des Grundwassers ist unsicher (VEB HYDRO 1982a).
- Der Verlauf und die hydraulische Wirkung von Störungen im Gebiet ist nur unzureichend bekannt

Von einer Begrenzung der A_{Eu} durch Störungen kann aber östlich von Pfaffenheim aufgrund der z.T. sehr kleinräumigen A_{Eu} von Brunnen, z.B. Fassung 8 in VEB HYDRO (1982a) ausgegangen werden. Ansonsten wird von der Grundannahme $A_{Eu}=A_{Eo}$ ausgegangen.

1.3 Ostteil der Vorerzgebirgssenke

Insgesamt muss aufgrund des unzureichenden Kenntnisstands auch für den Bereich der östlichen VES vom allgemeinen Ansatz $A_{Eu}=A_{Eo}$ ausgegangen werden. Dieses dürfte zumindest für den Bereich des die VES umgebenden Kristallins auch im wesentlichen zutreffen. Eine Differenzierung zwischen A_{Eo} und A_{Eu} ist aber, auch weiter westlich, in den permokarbonen Folgen in der Vorerzgebirgssenke zu erwarten, z.B. in Verbindung mit lokal ausgebildeten Grundwasserstockwerken (vgl. Textteil). Während die Hangendstockwerke entsprechend des lokalen Druckgefälles in die nächstgelegenen Vorfluter entlasten bzw. dort den Talgrundwasserleiter speisen, können tiefere Grundwasserstockwerke auch einem intermediären bis regionalen Druckgradienten folgend in benachbarte Einzugsgebiete entlasten. Der quantitative Anteil eines solchen Grundwasserzu- bzw. abflusses wird jedoch als eher gering eingeschätzt.

Die Grundwasserdynamik wird auch im östlichen Teil der Vorerzgebirgssenke im wesentlichen von hydraulisch aktiven Störungen, Kluft- und Zerrüttungszonen bestimmt, wobei zur hydraulischen Wirkungsweise einzelner tektonischer Strukturen nur lückenhafte Kenntnisse vorliegen (vgl. Textteil).

Die Anzahl jener Störungen, die für einen die Grenzen der A_{Eo} überschreitenden Grundwasserfluß in Frage kommen ist klein, die aus hydraulischen Parametern abgeleiteten möglicherweise transportierten Grundwassermengen gering (vgl. Textteil). Nur in Ausnahmefällen dürften diese für die Grundwasserbilanz von Bedeutung sein, mglw. im Bereich der Störung im Chemnitz-Tal (vgl. Textteil). Die Hauptvorfluter für den östlichen Teil der Vorerzgebirgssenke sind die Chemnitz, (Würschnitz, Zwönitz) und die Zschopau, (Flöha).

Nördlicher und südlicher Senkenrand der östlichen Vorerzgebirgssenke

In den der östlichen Vorerzgebirgssenke nördlich und südlich vorgelagerten kristallinen Einheiten des Granulitgebirges und des Erzgebirges muss von der Grundannahme $A_{Eu}=A_{Eo}$ ausgegangen werden. Abweichungen ergeben sich entlang von Störungen, so im Bereich der nördlich des Senkenrandes gelegenen hydraulisch aktiven Struktur von Oberfrohna-Burgstädt bei Hartmannsdorf und der Störung im Chemnitztal (vgl. Textteil). Obwohl derartige Einflüsse im Grundgebirge sicher die Ausnahme darstellen, können sie entlang einzelner Strukturen von Bedeutung sein.

A_{Eo} -Kappelbach und Permokarbonanteil des A_{Eo} -Pleißbach

Das A_{Eo} des Kappelbachs sowie das des Pleißbachs zwischen Rottluff (NE-Chemnitz) und Mündung in die Chemnitz liegt nahezu vollständig im Bereich des Permokarbons der Vorerzgebirgssenke.

Für das A_{Eo} des Kappelbachs wird in VEB HYDRO (1978) von einer A_{Eu} -Grenze entlang des Granulitgebirgsrandes ausgegangen, da aufgrund der geringen Durchlässigkeit des Granulitgebirgsschiefermantels nur vernachlässigbar geringe Zuflüsse in das Einzugsgebiet zu erwarten sind. Diese Annahme ist nachvollziehbar. Allerdings bleibt unklar inwieweit die im

Bereich des Kappelbaches verlaufende Lungwitztalzone Einfluß auf das A_{Eu} ausübt. In diesem Zusammenhang muß der Verlauf des A_{Eu} im östlichen Einzugsgebiet des Kappelbachs (Stadtbereich von Chemnitz) wie in VEB HYDRO (1978) diskutiert bezweifelt werden, da zumindest ein Teil der Industrie- und Wasserversorgungsbrunnen heute außer Betrieb ist. Die A_{Eu} -Grenze zwischen Kappelbach und Pleißbach dürfte heute ungefähr der des A_{E0} entsprechen.

Einzugsgebiet der Würschnitz im Permokarbon

Es gilt vermutlich $A_{Eu}=A_{E0}$. Eine Ausnahme bildet das Gebiet nordwestlich der B169, an der beide voneinander abweichen.

Südliches und südöstliches Einzugsgebiet der Chemnitz

Unterirdische Einzugsgebietsgrenzen können wie folgt angegeben werden:

- nach E: Für den Bereich der Wasserscheide zwischen Chemnitz und Zschopau muß von $A_{Eu}=A_{E0}$ ausgegangen werden, da hier keine anderweitigen Informationen vorliegen.
- nach N: die Grenze des A_{Eu} verläuft vom Ausstrich des Zeisigwaldtuff im Bereich der Beckenachse (Umschwenken des Schichteinfallens nach SE) in Richtung WSW zur Chemnitz.
- nach W: $A_{Eu}=A_{E0}$
- nach S: Der südliche, vermutlich tektonisch angelegte Beckenrand bildet die südliche Grenze des A_{Eu} da hier aufgrund des hohen Transmissivitätskontrasts nur ein geringer Grundwasserzustrom aus S in das Becken zu erwarten ist.

Nördliches Einzugsgebiet der Chemnitz innerhalb der VES

Das A_{Eu} wird durch die in die Chemnitz fließenden Bäche Bornaer Bach und Bahre Bach (westlich der Chemnitz) und dem Bach beim Betriebsbahnhof Hilbersdorf, Glösaer Bach und Sechsruthenbach (östlich der Chemnitz) entwässert. Unterirdische Einzugsgebietsgrenzen können wie folgt angegeben werden:

- nach E: A_{Eu} entspricht der oberirdischen Wasserscheide zur Zschopau
- nach N: Granulitgebirgsrandstörung fungiert hier aufgrund der geringen Grundwasserführung des Granulitgebirgsschiefermantels i.d.R. als Grenze des A_{Eu} . Entlang des Chemnitztals kann auf Grundlage der Grundwasserhaushaltsuntersuchungen ein Grundwasserabstrom nach NW entlang der Störung im Chemnitztal und damit eine Einschränkung des A_{Eu} vermutet werden (vgl. Textteil).
- nach W und SW: A_{Eu} entspricht der oberirdischen Wasserscheide zum Pleißbach

Einzugsgebiet der Zschopau im Raum Frankenberg

Aufgrund des geringen hydrogeologischen Erschließungsgrades muss von $A_{Eu}=A_{E0}$ ausgegangen werden.

Anlage 5

Im digitalen hydrogeologischen Modell verwandte GOCAD-Objekte

GOCAD-Objekte im Textformat

Die im folgenden beschriebenen GOCAD-Objekte sind typische Grundbausteine räumlicher GOCAD-Modelle. Die beigefügten Formatbeispiele zeigen das klassische GOCAD-Textformat, dass für den Datenexport und externe Manipulation geeignet ist. GOCAD-intern finden dagegen heute binäre Datenformate Verwendung. Die dargestellten GOCAD-Objekttypen sind Teil des GOCAD-Modells der hydrogeologischen Einheiten der Vorerzgebirgssenke. Das GOCAD-Modell bildete die Grundlage der Aktualisierung und Weiterführung der hydrogeologischen Struktur und Strömungsmodellierung in GMS (vgl. Textteil).

1. GOCAD-Punktdaten: Pointsets

GOCAD Pointsets sind die einfachste Form von Objekten in GOCAD. Dabei handelt es sich um Punkte im Raum (Atoms, Nodes oder Vertices). Häufig sind Pointsets die einzig verfügbare Datenquelle für den Aufbau eines Modells, so z.B. wenn im Untersuchungsgebiet Wasserstände aus GW-Beobachtungsrohren bekannt sind. Die meisten Daten werden deshalb durch den Import von Pointsets in GOCAD in das Modell integriert. Sie sind der wichtigste Grundbaustein für alle weiteren Arbeiten. Aus Pointsets können dann z.B. Flächen (Surfaces) oder Lineare (Curves oder Plines) konstruiert werden, die wiederum zu 3D-Körpern weiterverarbeitet werden können. Pointsets können, wie auch den anderen GOCAD-Objekten, Eigenschaften zugeordnet werden. Pointsets wurden insbesondere für den Import des DGM in GOCAD und für die Generation von Punktwolken aus einzelnen Markerhorizonten verwendet. Abb. 1 zeigt ein typisches Pointsets eines Störungsfragmentes der Rödlitzer Hauptverwerfung.

```
GOCAD VSet 1
HEADER {
name:points_example1
*Atoms*symbol:tetra
*Atoms*color:black
}
PROPERTY_CLASS_HEADER Z {
*low_clip:80.996
*high_clip:170.176
*pcclip:99
}
PROPERTY_CLASS_HEADER vector3d {
*low_clip:-1
*high_clip:0.890855
*pcclip:99
}
VRTX 1 4534491.5 5627306.5 147.686981 CNXYZ
VRTX 2 4534251.5 5627187.5 147.876007 CNXYZ
...
VRTX 26 4535612.5 5627068 122.079773 VRTX 27 4535723 5627350.5 108.549316
END
```

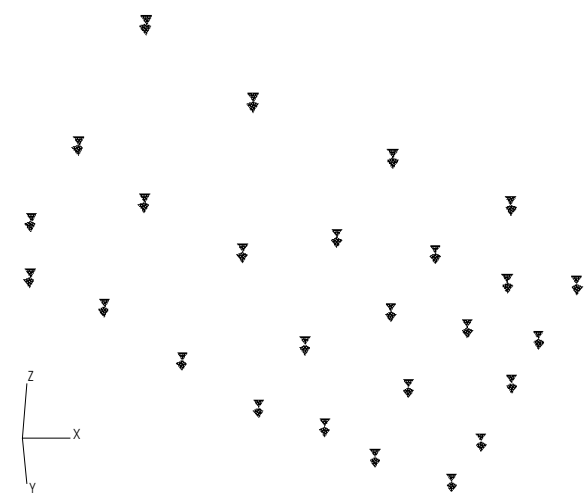


Abb. 1 Punktdaten im GOCAD-Textformat: Störungsfragment der Rödlitzer Hauptverwerfung

(„HEADER“ enthält den Namen und optische Merkmale der Punkt-Datei. „PROPERTY..“ enthält u.a. den Bereich der z-Werte aller Punkte. VRTX“ am Ende der Datei markiert die x-y-z Koordinaten der einzelnen Punkte.)

2. GOCAD-Linear: Curves

GOCAD-Curves (Plines) sind Raumpunkte die durch Segmente miteinander verbunden werden. Curves dienen zur Darstellung diverser linearer Elemente, so z.B. von Störungsausstrichen, geologischer Grenzen, Hydroisohypsen, Basislinien geologischer Horizonte u.a.

```
GOCAD PLine 1
HEADER {
  name:Pline_example1
  *line*color:black
  *Atoms*symbol:tetra
  *width:2
  *Atoms*color:gray20
}
GEOLOGICAL_TYPE top
GEOLOGICAL_FEATURE Tertiaer
PROPERTY_CLASS_HEADER Z {
  *low_clip:271.248
  *high_clip:339.279
  *pclip:99
}
ILINE
VRTX 1 4538256 5626840 278.514771
VRTX 2 4538178 5626907 278.46048
VRTX 3 4538100 5626974 278.405884
VRTX 4 4538012 5627034 276.9888
VRTX 5 4537912.5 5627084.5 273.883636
VRTX 6 4537817.5 5627150.5 271.247833
...
VRTX 53 4538584 5626472 279.832855
VRTX 54 4538525 5626536 279.440308
VRTX 55 4538458.5 5626610 279.123169
VRTX 56 4538392 5626684 278.806
VRTX 57 4538320 5626766 278.657227

SEG 56 57 SEG 57 1 SEG 1 2 SEG 2 3 SEG 3 4 SEG 4 5 SEG 5 6 SEG 6 7
...
SEG 49 50 SEG 50 51 SEG 51 52 SEG 52 53 SEG 53 54 SEG 54 55 SEG 55 56
END
```

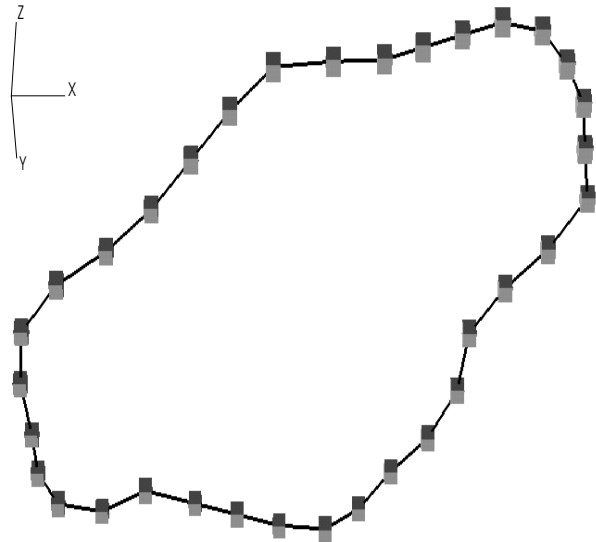


Abb. 2 Lineare im GOCAD-Textformat: Tertiäerausstrich in der nördlichen Vorerzgebirgs-senke

(„HEADER“ enthält den Namen und optische Merkmale der Lineare. Es folgen geologische Merkmalsbezeichnungen (Typ und Stratigraphie). „PROPERTY..“ enthält u.a. den Bereich der z-Werte aller Stützpunkte des Linears. „VRTX“ am Ende der Datei definiert die x-y-z Koordinaten der einzelnen Stützpunkte. „SEG“ gibt an welche Punkte (VRTX) zu Linearen verbunden werden.)

3. GOCAD-Flächen: Surfaces

GOCAD-Surfaces werden aus triangular verbundenen Punkten (Atoms) gebildet. Sie sind ein wesentliches Element im GOCAD-Modell, wenn die Darstellung flächige Objekte erfordert. GOCAD-Surfaces werden z.B. zur Modellierung der Basisflächen der einzelnen hydrogeologischen Folgen, von Grundwasserspiegeln und zur Abgrenzung hydrogeologischer und tektonischer Homogenitätsbereiche verwendet.

```

GOCAD TSurf 1
HEADER {
name:surface_example1
mesh:on
cn:on
ivolmap:false
imap:false
*Solid*color:coral
*parts:false
*border:true
*border*width:2
*border*color:white
}
GEOLOGICAL_FEATURE saxonian
GEOLOGICAL_TYPE fault
STRATIGRAPHIC_POSITION 210000000 0
PROPERTY_CLASS_HEADER Z {
*low_clip:80.996
*high_clip:170.176
*pcclip:99
}
PROPERTY_CLASS_HEADER vector3d {
*low_clip:-1
*high_clip:0.890855
*pcclip:99
}
TFACE
VRTX 1 4534491.5 5627306.5 147.686981 CNXYZ VRTX 2 4534251.5 5627187.5 147.876007 CNXYZ ...
VRTX 26 4535612.5 5627068 122.079773 VRTX 27 4535723 5627350.5 108.549316
TRGL 1 22 3 TRGL 26 24 19 TRGL 3 2 1 TRGL 15 14 13
BSTONE 1
BORDER 28 1 2
END

```

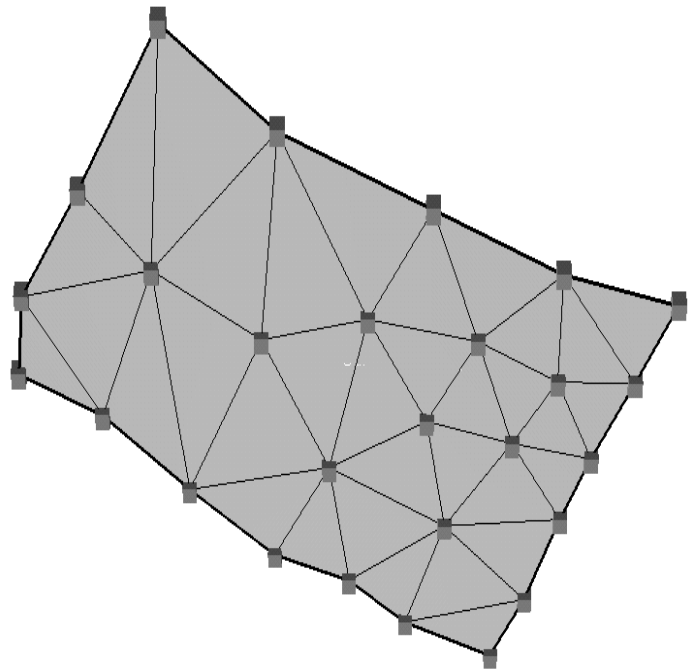


Abb. 3 Fläche im GOCAD-Textformat: Störungsfragment der Rödlitzer Hauptverwerfung

(„HEADER“ enthält den Namen und optische Merkmale der Fläche. Es folgen geologische Merkmalsbezeichnungen (Typ, Art und Stratigraphie). „PROPERTY..“ enthält u.a. den Bereich der z-Werte aller Flächenpunkte. TFACE bezeichnet die eigentliche Fläche. Dabei definiert „VRTX“ die x-y-z Koordinaten der einzelnen Stützpunkte. „TRGL“ gibt an welche Punkte (VRTX) zu den Flächentriangeln verbunden werden. BSTONE/BORDER gibt an, an welcher VRTX sich ein sogenannter „Grenzstein“ befindet, der eine Außengrenze in Abschnitte unterteilt.)

4. GOCAD-Bohrungen: Well objects

GOCAD-Well objects dienen der Darstellung und Interpretation von Bohrlochinformationen. Sie bestehen aus der eigentlichen Bohrung (Well path) und den mit ihr verknüpften Eigenschaften (Well logs oder Well curves genannt). Die Eigenschaften werden entlang des Bohrloches als Punktdaten gespeichert, wobei beliebig viele Eigenschaftstypen (also z.B. Porosität oder Transmissivität) dargestellt werden können.

Well objects finden als Träger von Markerhorizonten (z.B. der geologischen Basis einzelner Einheiten) Anwendung, z.B. durch die Umsetzung der Bohrlochinformationen aus dem FIS Hydrogeologie in GOCAD-Well objects.

```

GOCAD Well 1
HEADER {
name:Tiefbau_Schacht1
*path*width:2
*path*derrick_size:2
*label*color:black
*visible*markers:true
*label*marker:Quart
*markers*layer:true
*binary:false
*single_file:false
*curves*$curve*region:Entire Well
*markers*polygon:1
*markers*size:5
*markers*slope_size:1
*curves*$curve*style:cross
*curves*bg:false
*visible*curves:false
}
WREF 4535419 5619679 270
DPLN 0
PATH 0 270 0 0
PATH 632.98999 -362.98999 0 0
MRKR Quartaer 1 3.75 MRKR BasisLeukersdorf 2 289.690002 MRKR PlanitzTuff 5 340.060028
MRKR BasisKonglHaertensd 7 444.700012 MRKR BasisKarbon 17 630.690002
END

```

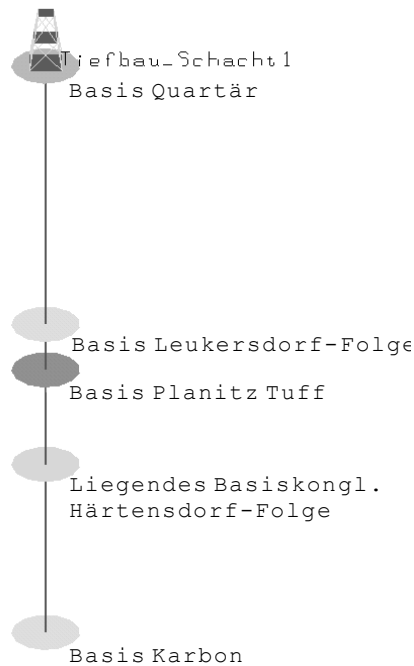


**Abb. 4 Geologische Bohrung mit wichtigen Markerhorizonten im GOCAD-Textformat:
Bsp. Tiefbau-Schacht 1 im ehemaligen Zwickauer Steinkohlenrevier**

("HEADER" enthält den Namen und optische Merkmale des Bohrungssymbols, des Bohrloches und der einzelnen Markerhorizonte. Es folgen die geometrischen Angaben für Bohrungsansatzpunkt und die Tiefe des Bohrloches. Hinter "MRKR" folgen die Bezeichnung, Nummer und z-Wert der Lage des einzelnen Markerhorizontes.)

5. GOCAD 3D-Raumobjekte: Solids

GOCAD verwendet zahlreiche sehr unterschiedliche Raumobjekte. Dazu gehören Solids (Punktwolke verbunden durch Tetraeder), Voxets (regelmäßiges Raumgitter) und Stratigraphic grids (Sgrids; unregelmäßiges Raum-Gitter). Sie dienen der Darstellung dreidimensionaler Raumelemente, also z.B. von geologischen Schichten und Störungen, Intrusiven, Lagerstätten-Körpern usw. (Solids, Sgrids) oder als Träger von Eigenschaftsinformationen, also z.B. von Transmissivität und Porosität der hydrogeologischen Einheiten (Voxets).

Zur Darstellung geologischer oder hydrogeologischer Körper werden häufig Solids verwendet (Abb. 5). Diese Datenstruktur (Tetraeder) war eine Voraussetzung für eine Weiternutzung der Modellgeometrie im hydraulischen (Finite Elemente) Modell FEMWATER.

```

GOCAD TSolid 1
HEADER {
name:Solid_example1
*Solid*color:coral
}
PROPERTY_CLASS_HEADER Z {
*low_clip:40.996
*high_clip:170.176
*pclip:99
}
TVOLUME

VRTX 1 4534742.5 5627522 99.6323853 CNXYZ
VRTX 2 4535171.5 5627440 84.7972565 CNXYZ
VRTX 3 4536080.5 5627181.5 114.718407 CNXYZ
VRTX 4 4535723 5627350.5 108.549316 CNXYZ
...
VRTX 53 4534742.5 5627522 139.632385 CNXYZ VRTX 54 4534251.5 5627187.5 147.876007 CNXYZ

TETRA 48 22 31 10 TETRA 53 43 7 36 TETRA 48 12 42 29 TETRA 51 30 26 3 TETRA 53 1 43 36
TETRA 52 2 50 5 TETRA 43 5 6 1 TETRA 46 37 32 8 TETRA 43 22 38 6 TETRA 33 18 30 26
...
TETRA 44 33 30 3 TETRA 48 43 31 22 TETRA 45 23 39 32 TETRA 45 32 34 23

END

```

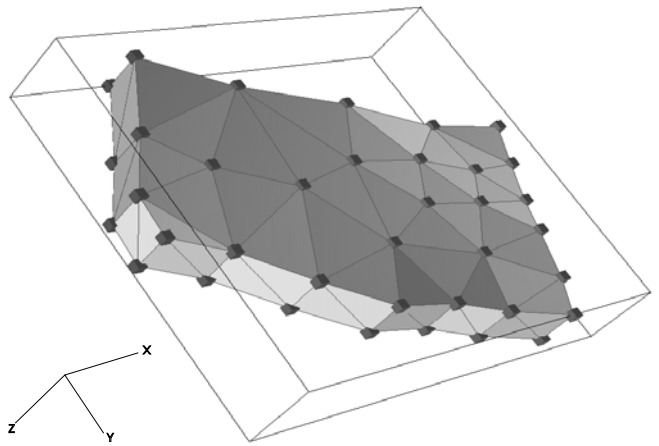


Abb. 5 3D-Körper (Solid) im GOCAD-Textformat

(„HEADER“ enthält den Namen und optische Merkmale des Volumenelementes. „PROPERTY..“ enthält u.a. den Bereich der Z-Werte aller Stützpunkte. TVOLUME bezeichnet den eigentlichen Körper. Dabei definiert „VRTX“ die x-y-z Koordinaten der einzelnen Stützpunkte. „TETRA“ gibt an welche Punkte (VRTX) zu den (Volumen-) Tetraedern verbunden werden.

Anlage 6

Digitale Daten

In den digitalen Anlagen ist die vorliegende Arbeit im pdf-Format enthalten.