

**Tracerversuch im gefluteten
Kalksteinbergwerk Felsendome
Rabenstein — Hydrochemische
Untersuchungen und Hydrodynamische
Modellierung mit ANSYS/FLOTRAN**

Diplomarbeit
im Fach Umwelt-, und Hydrogeologie
Studiengang Geoökologie
der
Technischen Universität Bergakademie Freiberg

Judith Hultsch

Erstbetreuer:	Prof. Dr. B. Merkel
Zweitbetreuer:	Dr. Ch. Wolkersdorfer

Freiberg, Februar 2006

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

Danken möchte ich für die Übergabe des interessanten Themas und Betreuung Dr. Christian Wolkersdorfer. Insbesondere gilt mein Dank Dipl. Geol. Andrea Berger, die mir jederzeit hilfreich zur Seite stand.

Ich danke meiner Familie für die Unterstützung während meiner Studienzeit. Auch meinen Korrekturlesern Lars Uhlig und Mandy Ungethüm gilt mein Dank.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	2
Danksagung.....	3
Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis	8
Anhangsverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Formelverzeichnis.....	10
1 Einleitung.....	12
2 Darstellung des Untersuchungsgebietes	13
2.1 Geographische Lage des Bergwerkes	13
2.2 Geschichte des Kalkabbaus der Felsendome Rabenstein	13
2.3 Geologische Verhältnisse	15
2.4 Hydrologische und hydrogeologische Verhältnisse	16
2.5 Beschreibung des Bergwerkes	17
3 Beschreibung des Tracerversuches und der hydrogeochemischen Untersuchungen	20
3.1 Die Wahl des Tracers	20
3.1.1 Überblick und Anforderungen an Tracer.....	20
3.1.2 Uranin	20
3.1.3 Unbedenklichkeit, Auswirkungen auf Gewässer.....	21
3.2 Transportprozesse im Wasser	22
3.3 Auswertungsmethoden für Tracerversuche	22
3.4 Versuchsdurchführung.....	23
3.4.1 Voruntersuchungen	24
3.4.2 Durchflussmessung im Bergwerk Rabenstein	24
3.4.3 Physiko–chemische Vor-Ort-Untersuchungen.....	25
3.4.3.1 Messgeräte für Vor-Ort-Analytik	26
3.4.3.2 Wassertemperatur	26
3.4.3.3 pH-Wert	26
3.4.3.4 Leitfähigkeit.....	27
3.4.3.5 Redoxpotential.....	27
3.4.3.6 Sauerstoff	28

3.4.3.7	Säure-Base-Gleichgewicht	28
3.4.3.8	Eisen	30
3.4.4	Wasseranalyse der Hauptionen	30
3.4.5	Tracereingabe und eingesetzte Tracermenge	30
3.4.5.1	Traceraufgabesonde LydiA	30
4	Ergebnisse des Tracerversuches	33
4.1	Durchflussmessungen	33
4.2	Teufenprofile	34
4.2.1	Temperaturmessungen	34
4.2.2	Elektrische Leitfähigkeitsmessung	35
4.2.3	Teufenprofil der Uraninkonzentration im Maschinenschacht	36
4.3	Ergebnisse des Tracerversuches	37
4.3.1	Tracerdurchgangskurven	37
4.3.2	Wiederfindungsrate	39
4.4	Interpretation der Ergebnisse	40
5	Ergebnisse der Hydrogeochemischen Untersuchungen	41
5.1	Statistische Auswertung	41
5.1.1	Ausreißerkontrolle	41
5.1.2	Mittelwert	42
5.1.3	Standardabweichung	42
5.1.4	Ionenbilanz	42
5.2	Vor-Ort-Parameter	43
5.2.1	Wassertemperatur	43
5.2.2	pH-Wert	44
5.2.3	Elektrische Leitfähigkeit	44
5.2.4	Redoxpotential	46
5.2.5	Sauerstoff	46
5.2.6	Säure-Base-Gleichgewicht	47
5.2.7	Eisen	49
5.3	Wasseranalyse der Hauptionen	50
5.4	Chemisch-thermodynamische Gleichgewichtsberechnung mittels PREEQC	52
5.4.1	Ergebnisse	53
5.5	Beurteilung der Wasserbeschaffenheit	54
5.6	Zusammenfassung	55
6	Theoretische Grundlagen für die Modellierung mit ANSYS/FLOTRAN	57
6.1	Einleitung	57
6.2	Möglichkeiten von ANSYS/FLOTRAN	57
6.3	Allgemeine Gesetzmäßigkeiten	58
6.3.1	Kontinuitätsgleichung (Massenbilanz)	58
6.3.2	Momentengleichung (Impulsbilanz)	59

6.3.3	Energiegleichung	59
6.3.4	Navier-Stokes Differentialgleichungen	60
6.3.5	Fluidgemischtransporte	60
6.3.6	Materialgesetze	61
6.3.7	Lösungsalgorithmen und Solver	61
6.3.8	Diskretisierung	62
6.3.9	Gütekriterien für Diskretisierungsverfahren (Stabilität und Konsistenz diskreter Näherungsverfahren)	63
6.3.10	Iterationen und Randbedingungen	64
7	Modellbildung und Randbedingungen der Simulation	65
7.1	Modellbildung und Diskretisierung	65
7.2	Hydrodynamische Verhältnisse und abgeleitete Randbedingungen	67
7.2.1	Einlassgeschwindigkeiten	67
7.2.2	Strömungsregime	68
7.3	Weitere Randbedingungen	69
8	Strömungsmodellierung mit ANSYS/FLOTRAN	70
8.1	Vorgehensweise	70
8.2	Berechnung des Strömungsfeldes	70
8.2.1	Stationäre Berechnungen	70
8.2.1.1	Lösungsparameter und Kalibrierung	70
8.2.1.2	Ergebnisse	72
8.2.2	Transiente Berechnungen	73
8.2.2.1	Lösungsparameter und Kalibrierung	73
8.2.2.2	Ergebnisse	75
8.3	Auswertung der stationären und der transienten Strömungsberechnung	76
9	Simulation der Uraninausbreitung	78
9.1	Vorgehensweise	78
9.2	Ergebnisse	80
9.2.1	Berechnungen mit Werten aus Set 2 (Tracerdaten)	80
9.2.2	Berechnung mit Werten aus Set 1	82
9.2.2.1	Ergebnisse der Tracereingabe im Maschinenschacht	82
9.2.2.2	Ergebnisse der Tracereingabe im Abbauholraum der 3. Sohle für das gesamte Bergwerk	83
9.2.3	Berechnung mit Werten aus Set 1 und mit neuem Eingabeknoten	84
9.3	Auswertung	87
	Zusammenfassung	90
	Literaturverzeichnis	92
	Anhang	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verwaltungsgebäude mit Maschinenschacht um die Jahrhundertwende, aus www.felsendome.de	14
Abbildung 2: Füllort im Maschinenschacht in 4. Sohle, aus GEISSLER & NHUAN (1982)	14
Abbildung 3 Übersichtskarte der Geologie des Sächsisch-Thüringischen Grundgebirges, verändert nach WALTER (1992).....	16
Abbildung 4: monatliche Mittelwerte für Niederschlag und Temperatur im Zeitraum September 2002 bis Februar 2005	17
Abbildung 5: Vereinfachter geologischer Grundriss der unteren Stollensohle (2. Sohle), aus GEISSLER & NHUAN (1982)	18
Abbildung 6: Geologischer Schnitt des Grubenbereiches, Legende siehe Abbildung 5, aus GEISSLER & NHUAN (1982).....	19
Abbildung 7 Strukturformel des Uranins	21
Abbildung 8: Schachtbefahrung mit der Multiparametersonde DL 512 LogIn GmbH im Maschinenschacht, Foto: WOLKERSDORFER	24
Abbildung 9 Dreieckswehr in MP 03 im Wasserstollen, Foto: Andrea Berger	24
Abbildung 10: Reaktionsverlauf im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht nach BÖGLI (1978).	29
Abbildung 11: Traceraufgabensonde LydiA, aus WOLKERSDORFER (2002).....	31
Abbildung 12: Durchfluss-Bohrloch-Fluorometers GGUN-FL 20 Ser. #13, aus SCHNEGG und COSTA (2002)	32
Abbildung 13: Niederschlag pro Monat und errechneter Abfluss während des Tracerversuches	33
Abbildung 14: teufenorientierte Temperaturmessung im Maschinenschacht mittels Kabellichtlot, September 2002	34
Abbildung 15: teufenorientierte Temperaturmessung im Maschinenschacht mittels Multiparametersonde Name DL 512 LogIn GmbH, Gommern.....	35
Abbildung 16: teufenorientierte elektrische Leitfähigkeitsmessung im Maschinenschacht mittels Multiparametersonde Name DL 512 LogIn GmbH, Gommern.....	36
Abbildung 17: Tracerdurchgangskurve	37
Abbildung 18: Summenkurve (blau) und normalisierte Tracerdurchgangskurve (c/c_{\max}) (rot) für Tracereingabe im Maschinenschacht	38
Abbildung 19: Summenkurve (blau) und normalisierte Tracerdurchgangskurve (c/c_{\max}) (rot) für Tracereingabe in Grüner Grotte.....	38
Abbildung 20: Wassertemperatur der Messpunkte im Untersuchungszeitraum	43
Abbildung 21: pH-Werte der Messpunkte im Untersuchungszeitraum	44
Abbildung 22: Elektrische Leitfähigkeiten der Messpunkte im Untersuchungszeitraum	45
Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit ...	45
Abbildung 24: Redoxpotentiale an den Messpunkten im Untersuchungszeitraum	46
Abbildung 25: prozentuale Sauerstoffsättigung der Messstellen im Untersuchungszeitraum	47
Abbildung 26: Gegenüberstellung des Hydrogencarbonat- und der Kohlensäuregehalt des Grubenwassers	48

Abbildung 27: Eisengehalte an den Messstellen im Untersuchungszeitraum.....	49
Abbildung 28: Sättigungsindex der Messstellen	53
Abbildung 29: Calcitablagerungen an der Firste im Wasserstollen (MP 03), Foto: WOLKERSDORFER.....	54
Abbildung 30: Darstellung der 3. Sohle (blau), der 4. Sohle (violettfarben) und des Maschinenschachtes (rot).....	66
Abbildung 31: Diskretisierung des Maschinenschachtes	66
Abbildung 32: Diskretisierung des Abbauholraumes der 3. Sohle	66
Abbildung 33: Massenbilanz der stationären Berechnung.....	71
Abbildung 34: Geschwindigkeitsverteilung am Ausgang Maschinenschacht mit Einlassgeschwindigkeiten aus Set 2.....	71
Abbildung 35: Geschwindigkeiten für die Kalibrierung für Set 1 und Set2.....	72
Abbildung 36: Strömungsbild der stationären Berechnung.....	73
Abbildung 37: Massenbilanz für die transiente Berechnung	74
Abbildung 38: Geschwindigkeiten für die Kalibrierung für Set 1 und Set 2.....	74
Abbildung 39: Verlauf der Tracerausbreitung im Maschinenschacht.....	81
Abbildung 40: Summenkurve und normalisierte Tracerdurchgangskurve für Eingabeknoten Maschinenschacht für Set 2.....	81
Abbildung 41: Summenkurve und normalisierte Tracerdurchgangskurve für Eingabeknoten Maschinenschacht für Set 1.....	82
Abbildung 42: Tracerdurchgangskurven für den Maschinenschacht und den Strecken der 3. und 4. Sohle, sowie die Restkonzentration Uranin im Eingabevolumen der 3. Sohle.....	83
Abbildung 43: Summenkurve und normalisierte Tracerdurchgangskurve für Eingabeknoten im Abbauholraum der 3. Sohle	84
Abbildung 44: Ausbreitung des Uranins im Abbauholraum der 3. Sohle; von links nach rechts: 1. Bild – Uraninfahne nach 50 Tagen, 2. Bild – Uraninfahne nach 80 Tagen, 3. Bild – Uraninfahne nach 110 Tagen und 4. Bild – Uraninfahne nach 140 Tagen	85
Abbildung 45: Tracerdurchgangskurven für den Maschinenschacht und den Strecken der 3. und 4. Sohle, sowie die Restkonzentration Uranin im Eingabevolumen der 3. Sohle.....	86
Abbildung 46: Summenkurve und normalisierte Tracerdurchgangskurve für Eingabeknoten im Abbauholraum der 3. Sohle	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Charakteristische Zeitpunkte mit den dazugehörigen Geschwindigkeiten, verändert	23
Tabelle 2: Einteilung der Härtestufen nach KLUT-OLSZEWSKI aus HÖLTING (2005)	29
Tabelle 3: Übersicht der Eingabeorte des Tracers und dazugehörige Eingabemenge und -tiefe.....	31
Tabelle 4: Ergebnisse aus den Tracerdurchgangskurven für Maschinenschacht und gesamtes	39
Tabelle 5: Probengröße und Prüfgröße	41
Tabelle 6: Gesamthärte und Karbonathärte der Messpunkte und Klassifizierung	47
Tabelle 7 Lösungsalgorithmen für die Terme der Transportgleichung.....	61

Tabelle 8 Solver mit ihrer bevorzugten Anwendung erläutert	62
Tabelle 9 Einlassgeschwindigkeiten für die 3. und 4. Sohle	67
Tabelle 10 Fluideigenschaften des Grubenwassers der Felsendome Rabenstein	68
Tabelle 11 berechnete Reynoldszahl und notwendige Parameter zur Berechnung der Reynoldszahl	69
Tabelle 12: Kalibrierungsgeschwindigkeiten für Set 1 und Set 2 und Gegenüberstellung mit Geschwindigkeiten aus dem Tracertest für stationäre Berechnung.....	72
Tabelle 13: Kalibrierungsgeschwindigkeiten für Set 1 und Set 2 und Gegenüberstellung mit Geschwindigkeiten aus dem Tracertest für die transiente Berechnung.....	75
Tabelle 14: berechnete Geschwindigkeiten der transienten und stationären Strömung	76
Tabelle 15: Parameter für die Tracersimulation	79
Tabelle 16: Berechnung der maximalen Zeitschritte in Bezug auf Courant- und Neumann-Kriterien.....	79
Tabelle 17: Gegenüberstellung der ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten aus Set 1 und Set 2 mit denen des praktischen Tracerversuchs für die Eingabe im Maschinenschacht	88
Tabelle 18: Gegenüberstellung der ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten aus Set 1 und Set 3 mit denen des praktischen Tracerversuchs für die Eingabe im Abbauholraum der 3. Sohle	88

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Übersicht über die 1. bis 4. Sohle.....	96
Anhang 2: Lage der Messpunkte in den Felsendomen Rabenstein	97
Anhang 3: Wasseranalyse der Hauptionen.....	98
Anhang 4: chemisch-thermodynamische Gleichgewichtsanalyse	99
Anhang 5: Übersichtskarte mit Tracereingabepunkte	100
Anhang 6: Probenahmezeitpunkte und die jeweils gemessenen Parameter.....	101
Anhang 8: Teufenprofil Uranin im Maschinenschacht am 16. März 2004.....	102
Anhang 9: Teufenprofil Uranin im Maschinenschacht am 8. Juli 2004	102
Anhang 10: Teufenprofil Uranin im Maschinenschacht am 31. August 2004	103
Anhang 11: Teufenprofil Uranin im Maschinenschacht am 3. Februar 2004	103
Anhang 12: Teufenprofil Uranin im Schrägschacht am 31. August 2004	104
Anhang 13: Gewässergüteklassifikation nach LAWA	104
Anhang 14: physiko-chemische Vor-Ort-Parameter (elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, TDS, Redoxpotential und ph-Wert	108
Anhang 15: physiko-chemische Vor-Ort-Parameter (HCO_3^- , CO_2 , Fe_{tot} und O_2)	109
Anhang 16: Hauptionenanalyse.....	110
Anhang 17: ältere Gesteinsanalysen, aus NHUAN & GEISSLER (1986).....	111
Anhang 18: Darstellung der Durchgangskurven von Maschinenschacht, Strecke der 3. Sohle, Restkonzentration im Eingabebereich und zusätzlich Tracerdurchgang durch Rampe und Schacht von 3. Sohle in 4. Sohle	112

Abkürzungsverzeichnis

CFD	Computational Fluid Dynamics
d.h.	das heißt
FEM	Finite Element Methode
K_B	Basenkapazität
K_S	Säurekapazität
MF	Mikrofilm
MP 01	Messpunkt 1, Seitenstollen
MP 02	Messpunkt 2, Ablauf Blauer Salon
MP 03	Messpunkt 3, Wasserstollen
MP 04	Messpunkt 4, Zulauf am Anfang des Wasserstollens
MP 05	Messpunkt 5, Grüne Grotte
MP 06	Messpunkt 6, Ablauf Marmorsaal
MP 07	Messpunkt 7, Maschinenschacht
MSU	Monotone Streamline Upwind Method
PCCR	Preconditioned Conjugate Residual Method
PCG	Preconditioned Conjugate Gradient Method
PGMR	Preconditioned Generalized Minimum Residual Method
SI	Sättigungsindex
SUPG	Streamline Upwind / Petrow-Galerkin Method
TDMA	Tri Diagonal Matrix Algorithm
TDS	Total Dissolved Solids

Formelverzeichnis

Zeichen	Dimension	Bedeutung
A	m^3	Querschnittsfläche des Maschinenschachts
C_p	J kg/kg K	Wärmekapazität
Cr		Courantzahl
d	m	Durchmesser
d_h	m	hydraulische Durchmesser

D_m	m^2/s	molekularer Diffusionskoeffizient
F_o		Neumannzahl
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
k	$W/m\ K$	Wärmeleitfähigkeit
K_x		zusätzliche Feldkräfte aus Multiphysik (z.B. Magnetfeldkraft auf ein magnetisierbares
Δl	m	charakteristische Elementlänge
M	g/mol	Molekulargewicht
ρ	bar	Druck
Δp	bar	Druckdifferenz
Re		Reynoldszahl
R_x		nutzereigene Widerstandsterme/Quellen
t	s	Zeit
Δt	t	Zeitschritt
T	$^{\circ}C, K$	Temperatur
U	m	hydraulischer Umfang
v	m/s	Fließgeschwindigkeit
V_x, V_y, V_z	m/s	Vektorkomponenten des Geschwindigkeitsvektors
V_{dom}	m/s	dominierende Fließgeschwindigkeit
V_{max}	m/s	maximale Fließgeschwindigkeit
V_{50}	m/s	mediane Fließgeschwindigkeit
V_m	$m^3/kmol$	molares Volumen
Q	m^3/s	Volumenstrom
η	$kg/(m \cdot s)$	dynamische Viskosität
Φ		Verbindungsfaktor für das Lösungsmittel
μ	$kg/(m \cdot s)$	effektive Viskosität
ν	m^2/s	kinematische Viskosität

1 Einleitung

Die Betrachtung und Untersuchung der Wegsamkeiten sowie des Chemismus von unterirdischen Wässern und insbesondere von Grubenwässern erlangt aufgrund rechtlicher und ökologischer Aspekte immer mehr an Bedeutung. Es wurden bereits umfangreiche wissenschaftliche Arbeiten auf diesem Themengebiet an der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt. Diese Arbeit beschäftigt sich mit den hydrodynamischen und hydrochemischen Verhältnissen in dem gefluteten Kalksteinbergwerk Felsendome Rabenstein. Das ehemalige Bergwerk befindet sich westlich der Stadt Chemnitz im Freistaat Sachsen. Schon seit dem 14. Jh. wurde hier Kalk abgebaut. Anfang des 20. Jh. wurde der Abbau eingestellt und ein Besucherbergwerk eingerichtet. Die beiden unteren der vier vorhandenen Sohlen sind seit 1902 geflutet. Zur Untersuchung der Strömungsverhältnisse in den gefluteten Bereichen wurde 2003 bis 2005 ein Tracertest durchgeführt. Ergänzend wurden physiko-chemische Parameter der Grubenwässer bestimmt, um den Schadstoffaustrag in den Vorfluter abzuschätzen.

Die ermittelten Parameter dienen als Grundlage zur Erstellung von Strömungsmodellen. In dieser Arbeit wird hierfür das numerische Programm ANSYS/FLOTRAN genutzt. Dieses Modell unterstützt die Prognose einer Schadstoffausbreitung sowie einer Gefährdungsabschätzung. Außerdem können eventuelle Sanierungsmaßnahmen anhand der Modelle geplant und beurteilt werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Kenntnisstand auf dem Gebiet der hydraulischen und chemischen Verhältnisse in Grubengebäuden zu erweitern. Es soll gezeigt werden, dass hydrodynamische Modellierungen ergänzend zur Tracertests sehr hilfreich bei diesen Untersuchungen sein können.

2 Darstellung des Untersuchungsgebietes

2.1 Geographische Lage des Bergwerkes

Das Kalksteinbergwerk Felsendome Rabenstein befindet sich im Freistaat Sachsen westlich von Chemnitz im Ortsteil Niederrabenstein mit einer Höhenlage von ungefähr 300 m über NN. Östlich der Felsendome befindet sich die Autobahn A72. Unmittelbar über dem Abbaugelände liegen eine Erholungsgaststätte und eine Kleingartensparte. Die Oberfläche ist geprägt von mehreren Restlöchern älterer Kalkaufschlüsse, die größtenteils verfüllt wurden (ILSCHER 1986).

2.2 Geschichte des Kalkabbaus der Felsendome Rabenstein

Schon im 14. Jh. war das Vorhandensein von Kalkstein bekannt, der zu dieser Zeit höchstwahrscheinlich an einigen Stellen zutage, ansonsten nahe an der Oberfläche anzutreffen war. Da die Kalkvorkommen verkehrsgünstig nahe der Stadt Chemnitz lagen, wurde damit der dortige Bedarf an Baukalk gedeckt. In der nachfolgenden Zeittafel sind die wichtigsten Etappen des Rabensteiner Kalkabbaus aufgeführt.

Zeittafel verändert nach R. Strauß aus GEISSLER & NHUAN 1982

- 1375 erste Erwähnung von Kalkvorkommen in der Herrschaft Rabenstein.
- 1540 Ein Kalkbruch des Benediktinerklosters Chemnitz wird in Stein, so hieß damals Niederrabenstein, urkundlich belegt.
- 1546 Dr. Georg Agricola erwähnt den Rabensteiner Kalkstein in seinem Werk: De natura fossilium.
- 1571 Kurfürst August befiehlt dem Amtmann von Chemnitz, dem nunmehr die Verwaltung des Kalksteinbruches untersteht, Kalk zur Renovierung der Jakobikirche in Chemnitz brechen zu lassen.
- 1609 Die Verfügungsgewalt über das Rabensteiner Kalkvorkommen geht an die Rittergutsherrschaft von Niederrabenstein, an Georg von Carlowitz, über.
- 1672 Der Rat der Stadt Chemnitz bezieht Kalkstein aus Rabenstein, den er durch eigene Leute brechen lässt.
- 1752 Der Rittergutsbesitzer C.A. von Schönberg übernimmt mittels eines Tauschvertrages von dem Kleinbauern S. Quinger kalkfühndiges Land.

1778 Die Petrographische Karte Sachsen von Charpentier, ein Freiburger Professor, verzeichnet Rabenstein als Fundort für Kalk.

Um die Wende zum 19. Jahrhundert

Es erscheint das Quadratmeilenblatt Nr. 153, wo der damalige Kalkbruch sowie der Kalkofen der Herrschaft eingetragen sind.

1800 Es bestehen neben dem herrschaftlichen Kalkbruch auch solche von Bauern.

1819/1832 Der Brennofen des Rittergutes liegt still, der Kalkbruch verfällt.

1833 Der bürgerliche Rittergutsbesitzer R. Esche bringt den Kalkabbau wieder in Gang und erwirbt nach und nach angrenzende Bauernbrüche.

1834 Erstmals Kalkabbau unter Tage bezeugt.

1855 Ein Entwässerungstollen zum Pleißbach wird angelegt.

1856 Das Kalkwerk versichert zwei Schachtgebäude.

1863 Das Kalkwerk versichert bereits drei Schachtgebäude. Ein unterirdischer Teil des Werkes kann besichtigt werden. Vermutlich handelt es sich um den heutigen Marmorsaal und die ihm vorgelagerten Weitungen auf der zweiten Sohle. In einem Artikel des „Chemnitzer Tageblatt“ steht geschrieben, „dass der unterirdische Teil des Kalkbruches 400 Fuß lang und 40 bis 50 Fuß hoch sei und von neun kolossalen Pfeilern getragen werde“.

1874 der Maschinen- und Förderschacht wird abgeteuft.

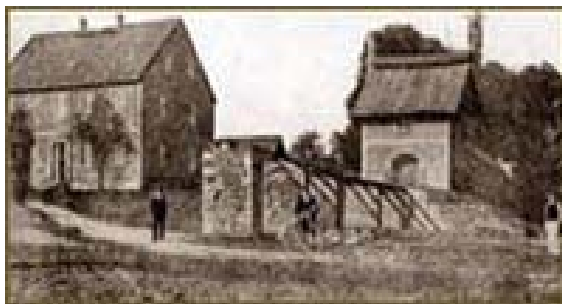


Abbildung 1: Verwaltungsgebäude mit Maschinenschacht um die Jahrhundertwende, aus www.felsendome.de

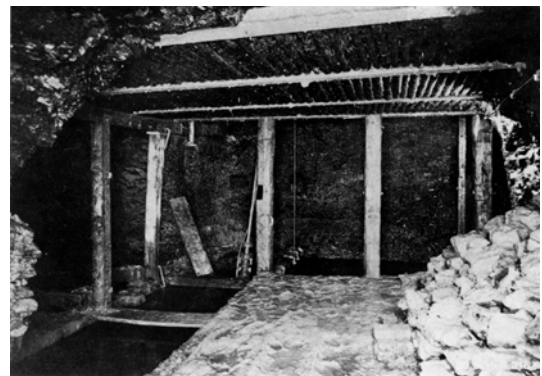


Abbildung 2: Füllort im Maschinenschacht in 4. Sohle, aus GEISSLER & NHUAN (1982)

1887 Der Kalkstein wird unterirdisch auf 3 Sohlen abgebaut.

1902 Die beiden unteren Sohlen sind ersoffen.

1908 Endgültige Stilllegung des unrentabel gewordenen Kalkwerkes.

1914 Zum Heimatfest darf ein Stollenstück besichtigt werden.

1919/1922 Auf dem Kalkwerksgelände ist ein Naturtheater errichtet.

- 1936 Die beiden oberen Sohlen und deren Weitungen werden als Schaubergwerk "Rabensteiner unterirdische Felsendome" freigegeben.
- 1944 Beginn mit dem Einbau einer Rüstungswerkstätte.
- 1954 Wiedereröffnung des Schaubergwerks.

2.3 Geologische Verhältnisse

Große Teile Mitteleuropas, darunter auch Chemnitz, waren während des Altpaläozoikums vom Meer überdeckt. Im Untersuchungsgebiet herrschte höchstwahrscheinlich ein Flachmeer mit zeitweise ruhigen Sedimentationsbedingungen vor. Durch vulkanische Aktivität kam es zur Herausbildung von Schwellen- und Beckenbereichen. Dabei wurden diabasähnliche Gesteine und Tuffe abgelagert, die heute als Amphibolschiefer vorliegen. In Zeiten geringer vulkanischer Aktivität wurden Kalkschwammsedimente abgelagert. Die heutigen Phyllite entstanden aus Tonen, die durch Änderung der Sedimentationsbedingungen abgelagert wurden. Mit der Zeit erfolgte ein Diageneseprozess. Durch die Senkung des Meeresbodens gelangten die Sedimente in tiefere Bereiche und verfestigten sich. Die erhöhten Temperaturen und der höhere Druck bewirkten eine Gesteinsmetamorphose. Der Kalkschlamm marmorisierte und die Tone und Tuffe wurden zu Phyllit und Amphibolschiefer umgewandelt. Durch eine seitliche Einengung der Gesteine wurde eine Faltung bewirkt, zu dieser Störungen und Klüfte parallel auftraten. Seit dem Paläozoikum ist das Untersuchungsgebiet durch Heraushebung ohne Wasserüberdeckung. Anschließend wurde das Gebiet wieder langsam abgetragen und liegt nun seit dem Quartär nahe der Erdoberfläche (GEISSLER & NHUAN 1982).

Fossile Funde deuten auf eine Entstehungszeit im Altpaläozoikum hin, welches dem Kambrium bis Silur vor 570 bis 400 Mio. Jahren entspricht.

Südöstlich des Granulitgebirges liegen in einem Schiefergesteinskomplex die Kalksteinlager der Felsendome Rabenstein. Dieser Komplex besteht aus altpaläozoischen Amphibolschiefen und Phylliten. Die Schiefergesteine werden südlich der Felsendome von Permokarbonsedimenten der Werdau-Hainichener Senke überlagert (GEISSLER & NHUAN 1982). In Abbildung 3 ist ein Ausschnitt der geologischen Karte von Sachsen mit einer Kennzeichnung der Lage von Chemnitz dargestellt.

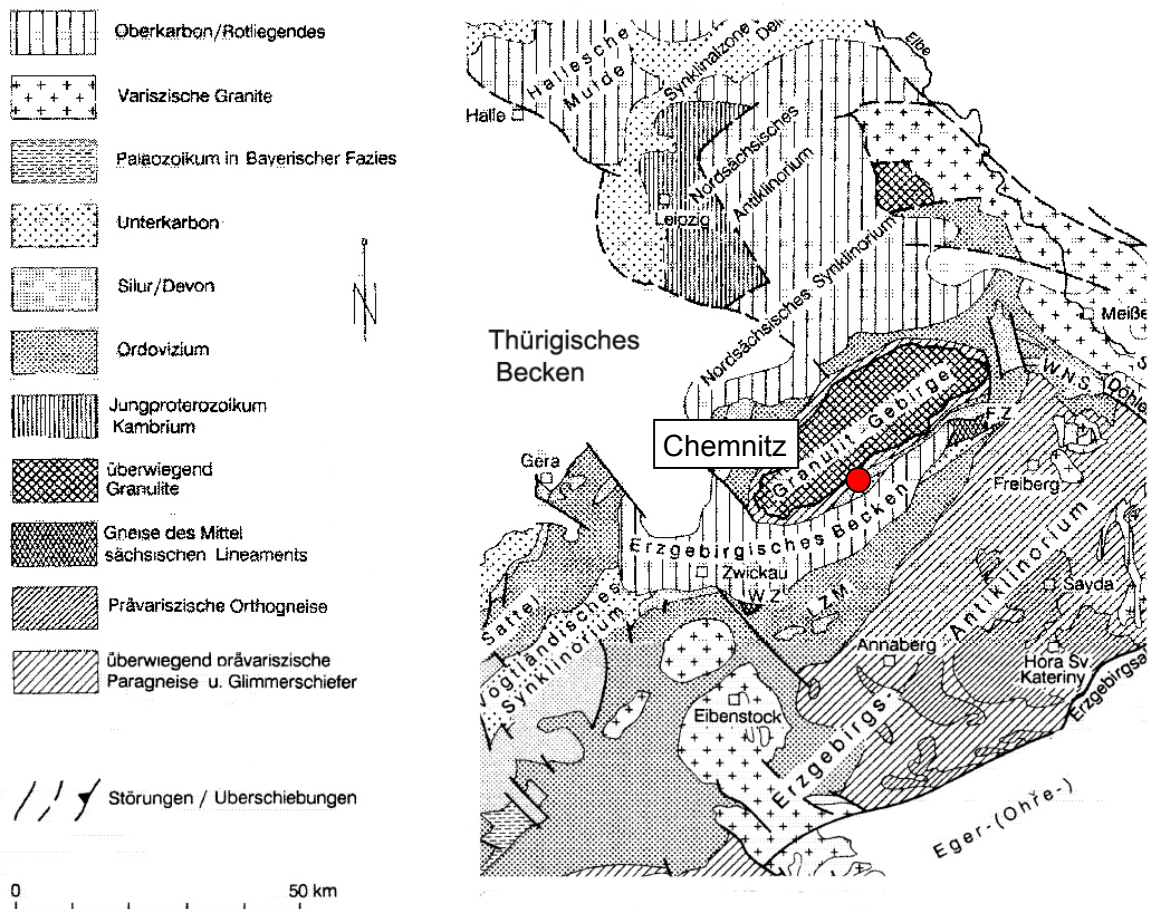


Abbildung 3 Übersichtskarte der Geologie des Sächsisch-Thüringischen Grundgebirges, verändert nach WALTER (1992)

2.4 Hydrologische und hydrogeologische Verhältnisse

Zur Beschreibung der hydrologischen Verhältnisse wurden die Niederschlags- und Temperaturdaten vom Deutschen Wetterdienst für den Raum Chemnitz herangezogen. In Abbildung 4 sind die Daten vom Beginn der Voruntersuchungen am 04.09.2002 bis zum Ende des Tracertest am 28.02.2005 dargestellt. Während des Tracertests fielen circa 1400 mm Niederschlag mit der kleinsten Monatsniederschlagsmenge im November 2003 von 24 mm. Der niederschlagsreichste Monat war der Mai 2004 mit 176 mm Niederschlag.

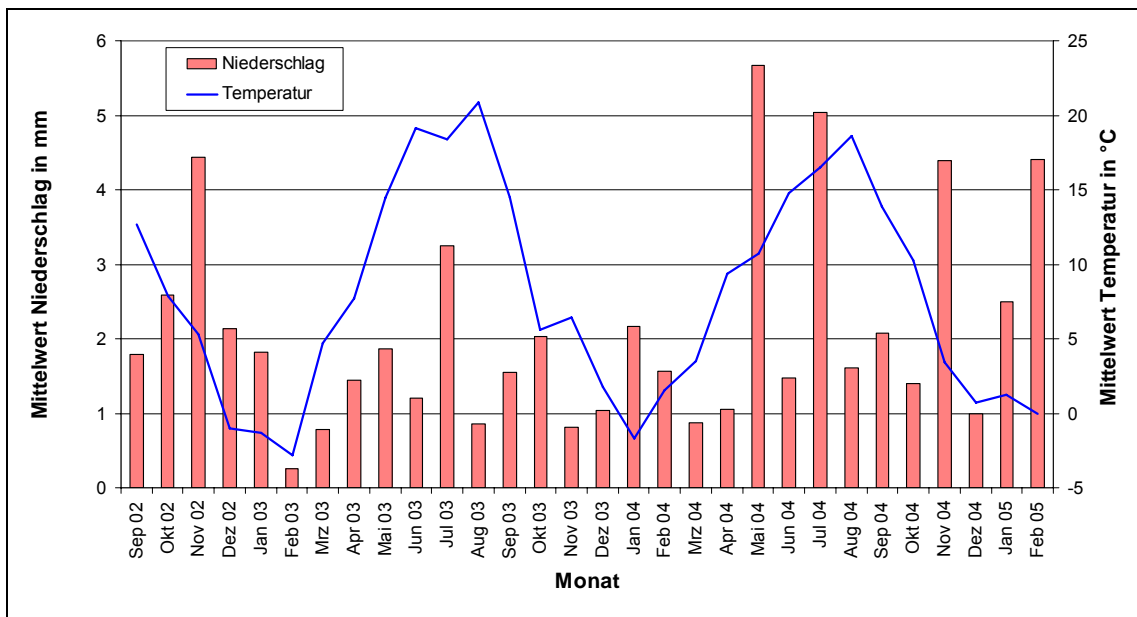


Abbildung 4: monatliche Mittelwerte für Niederschlag und Temperatur im Zeitraum September 2002 bis Februar 2005

Durch Klüfte und Störungsflächen wird dem Oberflächenwasser Zutritt zu dem Lagerstättenkörper gewährt. Dabei kommt es zur Lösung des Kalksteins auf und es können sich Hohlräumen bilden. Die flachen Teiche im Marmorsaal und in der Blauen Grotte resultieren aus der Heftigkeit und Häufigkeit der Niederschläge, die der Lagerstätte mit ein paar Tagen Verzug zufließen. Des Weiteren steht Wasser in der Grünen Grotte sowie im Maschinenschacht an. Die anfallenden Grubenwässer werden über die von 1855 erbaute Rösche in den Pleißbach abgeleitet. Die Rösche befindet sich auf der 2. Sohle und wird in der vorliegenden Arbeit auch Wasserstollen genannt, bei dem Messpunkt MP 03 lokalisiert ist (Anhang 2). Nach ILSCHER (1985) erfolgt kein messbarer Wasserzufluss aus der Tiefe.

2.5 Beschreibung des Bergwerkes

In den Felsendomen von Rabenstein wurde auf vier Sohlen Kalk abgebaut (obere und untere Stollensohle sowie die erste und zweite Tiefbausohle), wobei nur noch die beiden oberen Sohlen heute zugänglich sind. Die erste Sohle, auch Bierkellersohle genannt, liegt etwa 18 m unter der Rasenkante. Noch 9 m tiefer liegt die zweite Sohle mit der größten Ausdehnung von etwa 240 m Länge. In 33 m Tiefe liegt die 3. Sohle und nach weiteren 6 m, in 39 m Tiefe, befindet sich die vierte Sohle (NHUAN 1975). Die unübersichtliche Anlage der Grubenräume resultiert aus den unregelmäßig ausgebildeten Gesteinlagern, denen der Bergmann nachging. Die zwei unteren Tiefbausohlen sind 1902 innerhalb von 12 Wochen komplett geflutet worden (aus DIETRICH 1965 in HASCHKE 2003). Außerdem verlaufen sie nicht unter der zweiten Sohle, sondern erstrecken sich südwestlich der Grube nahezu unter dem Gebiet der Grünen Grotte. Im Bergwerk befinden sich Zwischensohlen, Mundlöcher, Tagesschächte, Blindschächte

und Wetterlöcher. Von besonderer Bedeutung für diese Diplomarbeit ist der mit allen 4 Sohlen verbundene 35 m tiefe Maschinenschacht. Er repräsentiert ein Ein-Schacht-System. Durch seine geringe Größe und Übersichtlichkeit können die hydrodynamischen Verhältnisse gut nachvollzogen werden. Die Grüne Grotte, die Aufgabestelle des Tracermittels ins Wasser, ist über eine 174 m lange Strecke mit dem Maschinenschacht verbunden. Zu den Blindschächten zählt der Wetterschacht I, der eine Verbindung zwischen zweiter und dritter Sohle darstellt, jedoch nicht mehr zugänglich ist. Der Wetterschacht II ist eine unter Wasser stehende Verbindung von der dritten zur vierten Sohle (ILSCHER 1986).

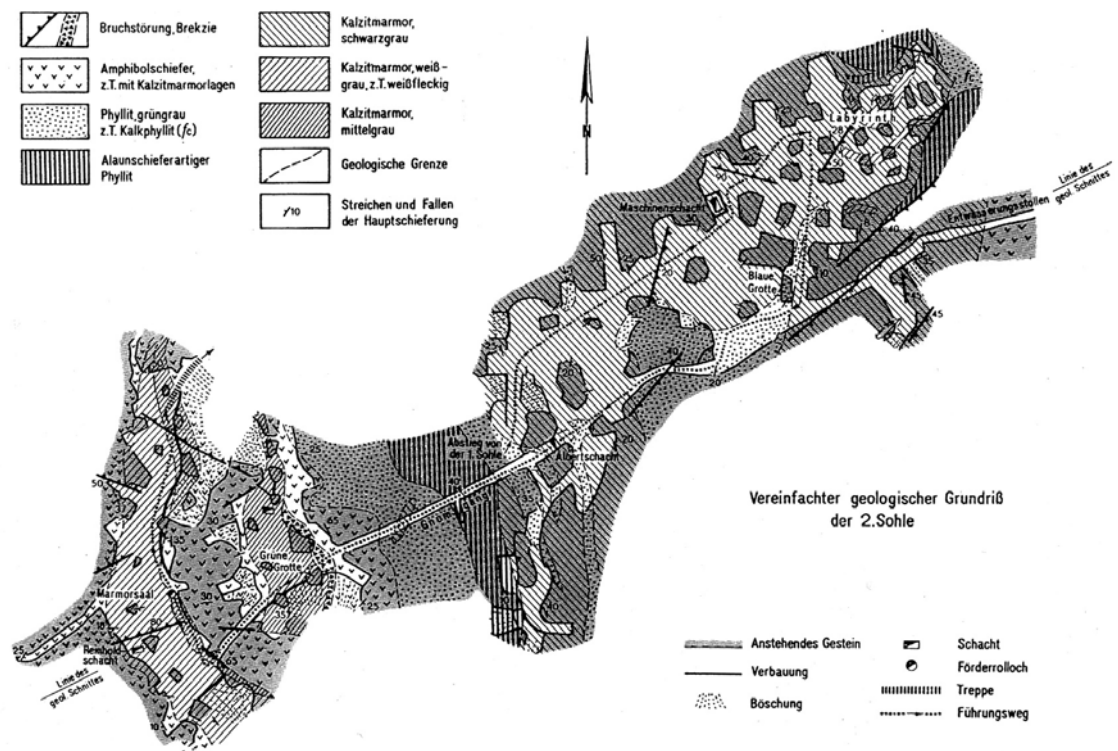


Abbildung 5: Vereinfachter geologischer Grundriß der unteren Stollensohle (2. Sohle), aus GEISSLER & NHUAN (1982)

In Abbildung 5 ist der geologische Grundriß der zweiten Sohle dargestellt. Diese erstreckt sich ausgehend vom Marmorsaal im Westen über die Grüne Grotte und dem Gnomengang bis hin zur Blauen Grotte und den Maschinenschacht im Osten.

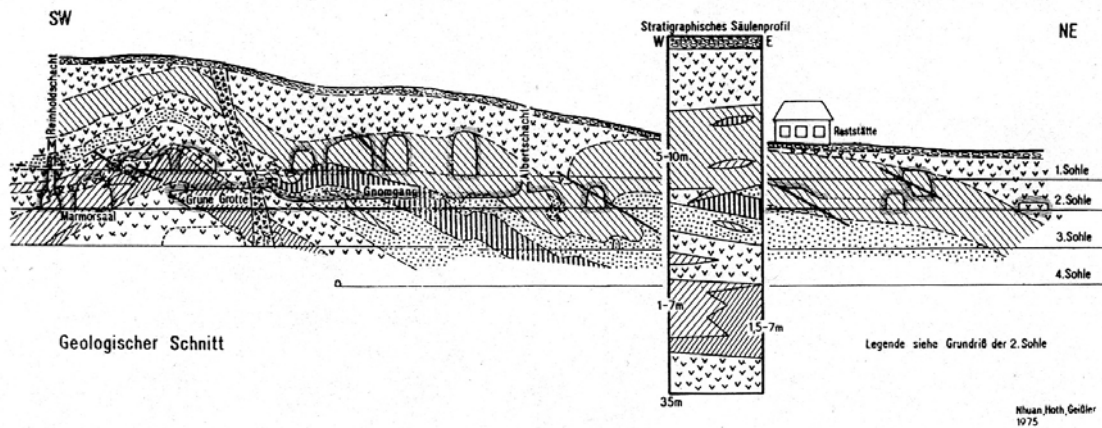


Abbildung 6: Geologischer Schnitt des Grubenbereiches, Legende siehe Abbildung 5, aus GEISLER & NHUAN (1982)

Es gibt insgesamt 3 Kalksteinvarietäten, den schwarzgrauen, den weißgrauen und den mittelgrauen Calcitmarmor. In Abbildung 6 ist im stratigraphischen Säulenprofil ein circa 30 bis 35 m mächtiger Lagerkomplex zu erkennen. Er besteht aus einem etwa 10 m mächtigen hangenden Lager kohlenstoffreichen, schwarzgrauen Calcitmarmors und einem 8 – 10 m mächtigen liegenden Lager weißen und mittelgrauen Calcitmarmor. Wie aus Abbildung 5 als auch in Abbildung 6 ersichtlich ist der schwarzgraue Calcitmarmor überwiegend in der 1. und 2. Sohle, der weißgraue überwiegend im Marmorsaal bzw. im SW-Teil am Ausgang der 1. Sohle und der mittelgraue Calcitmarmor in der Grünen Grotte und im östlichen Teil des Marmorsaals verbreitet. Nach GEISLER & NHUAN (1982) stehen zwischen dem hangenden und dem liegenden Calcitmarmorkomplex verschiedenartige Phyllite und Amphibolschiefer an. Dagegen befinden sich im Nebengestein der Lagerstätte nur Amphibolschiefer. Durch die variszische Tektonogenese vor 300 Mio. Jahren weisen die Gesteinstypen Merkmale einer starken tektonischen Beanspruchung auf. Faltungen und Störungen sind deutlich erkennbar. Die tektonischen Bewegungen lösten gewaltige Druckwirkungen aus, die den Gesteinsverbund pressten und an mehreren Stellen zu einer s-förmigen Faltung führten. Daraus entstanden zwei Sättel, wobei einer im Bereich der Grünen Grotte und dem Marmorsaal liegt. Der kleinere und wesentlich flachere Sattel erhebt sich südlich des Maschinenschachts (GEISLER & NHUAN 1982).

3 Beschreibung des Tracerversuches und der hydrogeochemischen Untersuchungen

3.1 Die Wahl des Tracers

3.1.1 Überblick und Anforderungen an Tracer

Uranin zählt zu den künstlichen Tracern und gehört zu den organischen Stoffen mit fluoreszierenden Eigenschaften. Als Tracer wurde es erstmals im Jahre 1877 zur Markierung der Donauversickerung eingesetzt und ist seit dem einer der meist genutzten Fluoreszenzstoffe (KÄSS 2004).

Markierstoffe müssen verschiedenste Anforderungen erfüllen. Der ideale Tracer repräsentiert die Wasserbewegung, d.h. er zeigt annähernd das gleiche Fließverhalten wie das Transportmedium Wasser. Aus diesem Grund sind die folgenden Eigenschaften gefordert:

- Stabilität gegenüber chemischen, physikalischen und biologischen Einflüssen
- möglichst geringe Sorptionstendenz
- gute Wasserlöslichkeit

Dazu kommen wichtige praktische Anforderungen:

- Unbedenklichkeit für Mensch, Tier und Pflanzen
- gute quantitative Erfassbarkeit
- keine oder nur geringe Grundlast im Wasser
- tiefe Nachweisgrenze
- kostengünstig (Markierstoff und Analytik)

Der Lehrstuhl für Hydrogeologie der TU Bergakademie Freiberg hat verschiedenste Erfahrungen mit Tracertests in gefluteten Bergwerken gesammelt unter anderem in Niederschlema/Alberoda 1996, Straßberg/Harz 2000, Brixlegg/Tirol 2001. Resultierend daraus wurde Uranin als geeigneter Tracer für die Untersuchung der Strömungsverhältnisse der Felsendome Rabenstein empfunden.

3.1.2 Uranin

Uranin ist das Natriumsalz des Fluoreszeins. Es hat den Colour Index C.I. 45 350, Acid yellow 73. Als Synonyme werden Natriumfluoreszeins und Fluoreszeinnatrium verwendet. Die Strukturformel lautet: $C_{20}H_{10}O_5Na_2$.

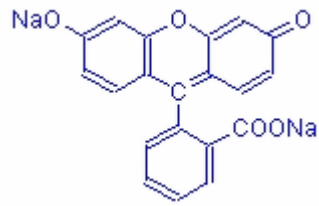


Abbildung 7 Strukturformel des Uranins

Nach KÄSS (2004) bildet Uranin dunkelrote längliche Kristalle und ist wie auch die dunkelrot erscheinende konzentrierte Uraninlösung nicht fluoreszierend. Schon mit zunehmender Verdünnung beginnt das Uranin zu fluoreszieren, wobei die Fluoreszenz von der Farbe rotgrün (Verdünnung um $10^{-2} = 10$ g/L) über gelbgrün (Verdünnung um $10^{-3} = 1$ g/L) bis grün (Verdünnung um $10^{-4} = 100$ mg/L) zunimmt. Bei noch größeren Verdünnungsstufen nimmt die Fluoreszenz jedoch wieder ab. Die Grenze der Sichtbarkeit erreicht es bei einer Verdünnung um die $10^{-8} = 10$ µg/L wobei das Uranin spektralfluorometrisch bis zu einer Verdünnung von $2 \cdot 10^{-12}$, d.h. bis zu einer Konzentration von 0,002 µg/L, nachweisbar ist. Natriumfluoreszenz ist die am stärksten fluoreszierende Substanz aller bekannten Stoffe. In Verbindung mit Wasser findet eine Dissoziation in Natriumkationen und Uraninanionen statt.

Die Fluoreszenzintensität ist abhängig von der Wasserstoffionenkonzentration und erreicht bei pH-Werten über 8.5 das Intensitätsmaximum. Im neutralen Bereich (pH 7) beträgt die Fluoreszenzintensität nur noch 80 % des Maximalwertes und sinkt bei noch niedrigeren pH-Werten weiter ab. In diesem Bereich steigt der Anteil des nur noch schwach fluoreszierenden blaugrünen Uranin-Kations an.

Starke Oxidationsmittel wie Chlor, Chloridoxid und Ozon zerstören das Uranin ebenso wie Lichteinfluss.

Gegenüber anderen Markierungsmitteln sind die Vorteile des Uranins in der niedrigen Nachweisgrenze von 0,002 µg/L, den geringen Wechselwirkungen, gute Stabilität sowie im kostengünstigen Preis zu sehen.

3.1.3 Unbedenklichkeit, Auswirkungen auf Gewässer

Der Arbeitskreis des Umweltbundesamtes „Human- und ökotoxikologische Bewertung von Markierungsmitteln in Gewässern“ (1997) stuft Na-Fluorescein (0,09...1,7 mg/L) nach Untersuchungen über genotoxische und ökotoxische Eigenschaften als toxikologisch unbedenklich ein. Uranin findet in der Medizin Anwendung und ist ein zugelassenes Färbemittel für zahlreiche Kosmetika und Reinigungsmittel. Nach KÄSS (2004) bestätigen auch andere Institute die völlige Unbedenklichkeit des Uranins bei hydrologischen Markierungsversuchen, z.B. Farbstoffkommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft (SCHMÄHL 1981), Bundesgesundheitsamt Berlin (AURAND 1979), Hygiene-Institut des Ruhrgebietes, Gelsenkirchen (JUNG 1977).

3.2 Transportprozesse im Wasser

Die grundlegenden physikalischen Transportprozesse im Wasser sind Advektion, Diffusion, Dispersion sowie Konvektion.

Die Advektion ist die Bewegung von Wasserinhaltsstoffen in Richtung der Grundwasserströmung mit der Größe der Abstandsgeschwindigkeit. Die molekulare Diffusion ist ein physikalischer Ausgleichsprozess, in dessen Verlauf Teilchen infolge der BROWN'schen Molekularbewegung von Orten höherer Konzentration zu solchen niedriger Konzentration gelangen, so dass allmählich ein Konzentrationsausgleich erfolgt. Die in alle Richtungen wirkende Ausbreitung führt zu einer Vermischung. Laut WITT (2004) kann die molekulare Diffusion bei Abstandsgeschwindigkeiten größer als 0,1 m/d im Allgemeinen vernachlässigt werden.

Ein weiterer Vermischungsprozess neben der molekularen Diffusion ist die Dispersion. Sie beschreibt eine Konzentrationsabnahme durch Geschwindigkeitsvariationen nach Betrag und Richtung und bewirkt ebenso wie die molekulare Diffusion ein Auseinanderziehen der Stofftransportfahne. Die Dispersion ist im Unterschied zur molekularen Diffusion richtungsabhängig und damit an das Vorhandensein einer Wasserbewegung gebunden. Je nach Fließrichtung wird zwischen der transversalen (senkrecht zur Fließrichtung) und der longitudinalen (in Fließrichtung) Dispersion unterschieden. Laut KLOTZ und SEILER (1980) ist in der Regel die transversale Dispersivität um den Faktor 10 bis 20 kleiner als die longitudinalen Dispersivität. Aus Tracerversuchen kann der longitudinale Dispersionskoeffizient ermittelt werden (Kapitel 3.3). Mit zunehmender Fließstrecke wächst der Einfluss größerer Inhomogenitäten, d.h. bei großräumiger Betrachtung ist die Dispersion größer als bei kurzen Fließstrecken.

Unter hydrodynamischer Dispersion versteht man das Zusammenwirken von molekularer Diffusion und mechanischer Dispersion. Sie zeigt sich in einer Abnahme des Konzentrationsgradienten während des Transportes.

Durch Dichteunterschiede in der Lösung wird die Konvektion hervorgerufen. Sie entsteht im engeren Sinne durch die differentielle Dichteänderung eines Fluids, die durch veränderte Temperatur oder Lösungsgehalt hervorgerufen wird.

Ein weiterer Zustand, der Lösungsbewegungen hervorruft, sind Druckdifferenzen. Auf verschiedenen Teufen gibt es verschiedene Fluiddrücke, zum einen durch die hydrostatischen Verhältnisse, wie das Prinzip der kommunizierenden Röhren zeigt. Ebenso können unterschiedliche Strömungswiderstände Druckdifferenzen bewirken (FÖRSTER 2004).

3.3 Auswertungsmethoden für Tracerversuche

Aufgrund der hydrodynamischen Dispersion unterscheidet KÄSS (2004) mehrere Zeitpunkte bei der Auswertung des Tracerversuches. Das erste Auftreten des Markierungsstoffes an der Entnahmestelle (t_1 oder t_{\max}) kennzeichnet den kürzesten Weg. Anhand dieses Zeitpunktes kann die maximale Fließgeschwindigkeit berechnet werden. Darauf folgt auffällig der Zeitpunkt der höchsten Konzentration (t_2 und t_{dom}), die

sich aus dem Maximum der Durchgangskurve ermitteln lässt. Mehrere Konzentrationsmaxima können durch wechselnde hydraulische Bedingungen oder verschiedene unterirdische Fließwege auftreten. An diesem Zeitpunkt hat die Summenkurve ihren Wendepunkt. Die Halbwertszeit (t_3 oder t_{50}) ist der Zeitpunkt an dem 50 % der insgesamt an der Entnahmestelle ankommenden Tracermenge wieder gefunden wurde. Die Halbwertszeit, aus der sich die mediane Abstandsgeschwindigkeit berechnet, wird anhand der Summenkurve aus dem Zeitpunkt t_{50} ermittelt. Den Zeitpunkt des letzten Nachweises kennzeichnet t_4 und ist wie t_0 von der Nachweisgrenze des Gerätes bzw. der Analysemethode abhängig. Abschließend sind noch 2 Werte für die Ermittlung des Dispersionskoeffizienten von Bedeutung, t_{16} bzw. v_{16} und t_{84} bzw. v_{84} . Nach ATAKAN et al. (1974) und FRIED (1975) in SCHREINER (1998) kann der longitudinale Dispersionskoeffizient D_L und Dispersivität α_L (Dispersionslänge) anhand der Summenkurve näherungsweise nach folgender Formel abgeschätzt werden:

$$D_L = \frac{v_{med}^2 \cdot (t_{84} - t_{16})^2}{8 \cdot t_{50}} \quad \text{Gl. 1}$$

D_L Dispersionskoeffizient in [m^2/s]
 v_{med} mediane Abstandsgeschwindigkeit in [m/s]
 t_{16} , t_{50} und t_{84} sind die aus der Summenkurve ermittelten Zeiten, zu denen 16 %, 50 % bzw. 84 % der eingesetzten Tracermenge durchgegangen sind in [s]

$$\alpha_L = \frac{D_L}{v_a} \quad \text{Gl. 2}$$

α_L Dispersivität oder auch Dispersionslänge in [m]

In einer Übersicht sind in der nachfolgenden Tabelle 1 die einzelnen Zeitpunkte mit ihren dazugehörigen Konzentrationen und Geschwindigkeiten zusammengefasst.

Tabelle 1: Charakteristische Zeitpunkte mit den dazugehörigen Geschwindigkeiten, verändert nach KÄSS (2004)

Zeitpunkt		Konzentration	Abstandsgeschwindigkeit	
t_0	Eingabe			
t_1 (t_{max})	erstes Auftreten	Erfassungsgrenze	v_{max}	schnellste Abstandsgeschwindigkeit
t_2 (t_{dom})	höchste Konzentration	Maximalkonzentration (c_m)	v_{dom}	dominierende (modale bzw. wirkungsvolle) Abstandsgeschwindigkeit
t_3 (t_{50})	Halbwertszeit	Halbfracht	v_{50}	mediane Abstandsgeschwindigkeit
t_4	letztes Auftreten	Erfassungsgrenze		
t_{16}	Zeit bei 16 % Tracerdurchgang	Konzentration bei 16% Tracerdurchgang	v_{16}	Abstandsgeschwindigkeit bei 16%
t_{84}	Zeit bei 84 % Tracerdurchgang	Konzentration bei 84% Tracerdurchgang	v_{84}	Abstandsgeschwindigkeit bei 84 %

3.4 Versuchsdurchführung

Zur praktischen Versuchsdurchführung zählen die vorgenommenen Voruntersuchungen, die Erfassung der hydrogeochemischen Parameter als Vor-Ort-Untersuchungen,

die Freisetzung des Tracers Uranin und die Uraninmessung. Zur Einschätzung der Verhältnisse im Maschinenschacht wurden Teufenprofile aufgenommen.

3.4.1 Voruntersuchungen

Im Vorfeld, am 4.09.2002, wurden einzelne Untersuchungen bezüglich der physikochemischen Charakterisierung der Grubenwässer und der hydrodynamischen Verhältnisse im gefluteten Bergwerksbereich vorgenommen. Wasserproben aus dem Maschinenschacht (MP 07) und von anderen Messstellen im Grubengebäude wurden nach den Parametern Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert, Sauerstoffgehalt, Redoxpotential, Fe^{2+} , $\text{Fe}_{\text{gesamt}}$ und Hauptanionen und -kationen analysiert.

Des Weiteren wurde eine Schachtbefahrung mit einem Kabellichtlot der Fa. Spohr/Frankfurt am Main durchgeführt und die Wassertemperatur kontinuierlich über das Teufenprofil aufgezeichnet. Aus den erhaltenen Werten soll ein erster Eindruck von den Verhältnissen im gefluteten Maschinenschacht gewonnen werden.



Abbildung 8: Schachtbefahrung mit der Multiparametersonde DL 512 LogIn GmbH im Maschinenschacht, Foto: WOLKERSDORFER

Des Weiteren wurde mit einer Multiparametersonde (DL 512 LogIn GmbH, Gommern) teufenorientiert die Parameter Temperatur, Leitfähigkeit und Druck, pH-Wert, Sauerstoffgehalt und Redoxpotential kontinuierlich über das Teufenprofil aufgezeichnet.

3.4.2 Durchflussmessung im Bergwerk Rabenstein

Das gesamte Wasser, das sich im Bergwerk ansammelt, verlässt es über die 2. Sohle durch den Entwässerungstollen (MP 03), auch Rösche genannt (Anhang 2). Um die Menge des abfließenden Grubenwassers zu bestimmen, wurde am Ende des Wasserstollens, circa 34 m vom Stolleneingang entfernt, ein Dreieckswehr installiert (Abbildung 9). Der Wasserdurchfluss wurde über die empirische Gleichung 3 aus dem Wasserstand vor dem Wehr ermittelt (DUNGER 1998).



Abbildung 9 Dreieckswehr in MP 03 im Wasserstollen, Foto: Andrea Berger

$$Q = \frac{8}{15} \mu \sqrt{2g} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot h^{\frac{5}{2}} \quad \text{Gl. 3}$$

- μ Überfallbeiwert (Herstellerangabe: $\mu = 0,578$ für $\alpha = 90^\circ$)
 α Ausschnittwinkel [°]
 h Überfallhöhe [m] Messung im Abstand $L \geq 4h$ vor dem Wehr = 16cm
 g Gravitationskonstante [m/s²] ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$):

Die Durchflussmessungen wurden vor und während des Tracerversuches an neun Probenahmetagen durchgeführt.

3.4.3 Physiko–chemische Vor-Ort-Untersuchungen

Zur Beurteilung der Wasserbeschaffenheit im Bergwerk erfolgte neben der Aufnahme von chemisch-physikalischen Vor-Ort-Parametern eine chemische Analyse der im Wasser enthaltenen Haptionen.

Durch biochemische und chemische Reaktionen kann es zur Verfälschung bzw. Veränderung der Ionen-Konzentrationen kommen, weshalb die Bestimmung der aufgeführten Parameter vor Ort erfolgte. Relevante verändernde Einflüsse sind die Reaktionen mit dem Tageslicht bzw. mit Sauerstoff und Kohlendioxid aus der Umgebungsluft.

Um Aussagen über die Wasserbeschaffenheit zu treffen und den zu untersuchenden Wasserkörper eventuell differenzieren zu können, wurde ein Messstellennetz für die zugänglichen Stellen zum Wasserkörper eingereicht. Die Vor-Ort-Untersuchungen wurden an 7 Messpunkten durchgeführt, die auf der Karte in Anhang 2 eingezeichnet sind.

- MP 07 im Maschinenschacht (ca. 5 cm unter Wasseroberfläche)
- MP 05 in der Grüne Grotte
- MP 06 im Ablauf des Marmorsaals
- MP 02 im Ablauf des Blauen Salons
- MP 04 im Zulauf des kleinen Rohres am Anfang des Wasserstollens
- MP 03 im Wasserstollen, nach Tunnelausbau, 34 m vom Stolleneingang
- MP 01 im Seitenstollen, Zulauf zum Wasserstollen, 13 m vom Wasserstolleneingang

An jedem dieser Messpunkte wurden folgende Parameter gemessen.

- pH-Wert
- Temperatur [C°]
- Leitfähigkeit [$\mu\text{S/cm}$]
- Redoxpotential [mV]
- Trübung (TDS)
- Säuren- und Basenkapazität [mol/L]

- Eisengehalt ($\text{Fe}_{(\text{gesamt})}$, Fe^{2+}) [mg/L]
- Sauerstoffgehalt [%] und [mg/L]

Die Messpunktauswahl orientierte sich an den räumlichen Gegebenheiten und wurde weiträumig angeordnet, um eine gesamtheitliche Erfassung der hydrochemischen Situation zu gewährleisten.

Der Probenahmezeitraum erstreckte sich über fast zwei Jahre, in denen an 16 Tagen die physiko-chemischen Parameter aufgenommen wurden. In Anhang 6 sind die Probenahmetage mit den gemessenen Parametern zusammengefasst.

3.4.3.1 Messgeräte für Vor-Ort-Analytik

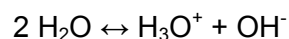
Die hydrogeochemischen Vor-Ort-Parameter wurden mit verschiedenen Geräten aufgenommen. Unter Verwendung des Feld-Photometers DR 890 der Firma HACH wurde die Bestimmung des Eisengehaltes photometrisch durchgeführt. Mit einem weiteren Produkt der Firma HACH, einem Digitaltitrator, wurde die Basen- und Säurenkapazität bestimmt. Unter Einsatz des Ultrameters 6P von der MYRON L Company/Carlsbad, CA wurden die Leitfähigkeit, Temperatur, das Redoxpotential, der pH-Wert und TDS (Total Dissolved Solids) gemessen. Die Bestimmung des Sauerstoffgehaltes erfolgte mit Hilfe des Oximeters WTW OXI 320 der Firma WTW aus Weilheim.

3.4.3.2 Wassertemperatur

Die Temperatur beeinflusst nicht nur verschiedene physikalische Eigenschaften und Vorgänge, sondern auch chemische und biochemische Reaktionen werden durch die Wassertemperatur bestimmt. Für die Calcitsättigung und die prozentualen Sauerstoffsättigung ist die Angabe der Temperatur wichtig.

3.4.3.3 pH-Wert

Chemisch reines Wasser ist zu einem geringen Teil dissoziiert:



Der pH-Wert wird definiert als der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionenaktivität (HÖLTING 2005):

$$\text{pH} = -\log \{ \text{H}^+ \}$$

Die Konzentration an $[\text{H}^+]$ und $[\text{OH}^-]$ Ionen ist in neutralen Lösungen (pH 7) gleich. Mit Zunahme der $[\text{H}^+]$ – Ionenaktivität sinkt der pH-Wert unter 7 und zeigt eine saure Lösung an. Dagegen nimmt in einer basischen Lösung die $[\text{H}^+]$ –Ionenaktivität ab und der pH-Wert steigt über einen pH-Wert von 7.

Vom pH-Wert sind die Löslichkeit vieler Stoffe und deren Ionenkonzentrationen im Wasser abhängig. Durch unterschiedliche Kohlensäuregehalte kann eine Änderung des pH-Wertes in natürlichen Gewässern bewirkt werden. Ausnahmen bilden die Ionen Na^+ , K^+ , NO_3^- und Cl^- , die über fast allen pH-Stufen gleich löslich bleiben. Eine Abhängigkeit vom pH-Wert weist auch die Löslichkeit der meisten Metallionen auf. Sie gehen im sauren Milieu leicht als Kationen in Lösung, fallen bei steigendem pH-Wert als

Hydroxide oder Salze aus (HÖLTING 2005). Einen Einfluss auf den pH-Wert übt das Hydrogencarbonat aus. Es ist in der Lage in natürlichen Gewässern die Kohlensäure abzupuffern und bewirkt ein angenähertes Säure-Base-Gleichgewicht in einem verhältnismäßig kleinen Schwankungsbereich zwischen pH 5,5 und 8 (HÖLTING 2005).

Anhand des pH-Wertes kann eine erste Aussage über die Wasserbeschaffenheit getroffen werden. Des Weiteren kann dieser Parameter zur Beurteilung der Wassergüte herangezogen werden und gibt Hinweise auf die Wirkung auf Flora und Fauna. Ferner ist der pH-Wert ein Maß für die Aggressivität des Wassers (SCHWEDT 1995).

3.4.3.4 Leitfähigkeit

Durch die im Wasser dissoziierten Ionen wird die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Die elektrische Leitfähigkeit ist abhängig von:

- der Temperatur des Wassers
- der Konzentration der gelösten Stoffe, der Art der Dissoziation und dem Dissoziationsgrad, sowie
- der Wertigkeit und der Wanderungsgeschwindigkeit der gebildeten Anionen bzw. Kationen.

Die Leitfähigkeit kann bei konstanter Temperatur auch als Funktion der Ionenaktivität angesehen werden, da die Wertigkeit der Ionen und ihre Wanderungsgeschwindigkeit in natürlichen Wässern, die verdünnte Elektrolytlösungen darstellen, konstant sind (MERKEL et al. 2002). Jedoch ist der chemische Informationsgehalt der Leitfähigkeitsmessungen gering, der Vorteil besteht aber darin, dass mit einfachen Mitteln Kontrollmessungen möglich sind (KÖLLE 2003). Mit Hilfe dieses Parameters kann empirisch eine Beziehung zwischen Gesamtmineralisation und Leitfähigkeit abgeleitet werden. Als Faustregel gilt: $1 \mu\text{S}/\text{cm} \approx 0,65 \text{ mg/L}$. Der TDS-Wert (Total Dissolved Solids) gibt die Konzentration aller gelösten Feststoffe an.

3.4.3.5 Redoxpotential

Die meisten chemischen und biochemischen Umsetzungen im Wasser sind Redoxreaktionen. Die Redoxreaktion besteht aus den Teilreaktionen Oxidation und Reduktion und wird durch einen Elektronentransfer charakterisiert. Oxidationsreaktionen sind stets mit Reduktionsreaktionen gekoppelt. Bei Redoxreaktionen stellt sich ein elektrisches Potential ein, dessen Betrag vom jeweiligen Redoxpartner abhängig ist. Von der Menge der frei werdenden Energie ist die Schnelligkeit und die Richtung des Prozesses abhängig (HÖLTING 2005). Je mehr das Gleichgewicht $\text{Reduktion} \leftrightarrow \text{Oxidation} + e^-$ auf der oxidierenden Seite liegt, umso mehr elektronegativer ist das Potential d.h. desto stärker ist die reduzierende Wirkung. Umgekehrt bedeutet es, je positiver das Potential ist, desto stärker ist die oxidierende Wirkung.

Redoxreaktionen dienen als Anhaltspunkt für das Vorhandensein aerober oder anaerober Prozesse. Einen Hinweis auf aerobe Vorgänge liefern positive mV Werte, während Werte zwischen 0 mV und -200 mV Übergangsverhältnisse anzeigen. Auf anaerobe Verhältnisse weisen Werte unter -200 mV hin. Es ist zu beachten, dass aus einem Messwert nicht auf eine Konzentration einzelner Redoxpaare oder auf Konzentrationen von Einzelkomponenten geschlossen werden kann (MERKEL et al. 2002).

Der gemessene Potentialwert bezieht sich auf die Wasserstoffelektrode und lässt sich allgemein nach der NERNSTschen Gleichung beschreiben:

$$E_h = E_0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln \frac{[ox]}{[red]} \quad \text{Gl. 4}$$

E_h : Redoxpotential der Lösung (Volt, V)

E_0 : Standardpotential in V (bei 298 K; 10^2 Pa, wenn $[ox] = [red] = 1$ mol/l Aktivität)

R : Gaskonstante ($8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) F : Faraday-Konstante ($96,484 \cdot 10^3 \text{ V}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$)

T : Temperatur in K Ox : Aktivität der oxidierten Form des Stoffes ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)

n : Zahl der umgesetzten Elektronen Red : Aktivität der reduzierten Form des Stoffes ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)

Da das Redoxpotential der Lösung temperaturabhängig ist, muss eine Korrektur des Wertes vorgenommen werden. Auch bei Verwendung einer Bezugselektrode 2. Art, eine Silberchlorid-Elektrode, wird eine Korrektur notwendig. Die für eine Korrektur erforderlichen Tabellen sind aus der Fachliteratur z.B. in HÖLTING (2005) zu entnehmen.

3.4.3.6 Sauerstoff

Sauerstoff nimmt bei der Beurteilung der Gewässergüte eine zentrale Stellung ein. In natürlichen Gewässern ist sein Gehalt entscheidend für biochemische Vorgänge. Er kann in mg/L oder in % der Sättigungskonzentration angegeben werden. Die Sättigungskonzentration (in mg/L) ist insbesondere von der Wassertemperatur, aber auch vom Luftdruck und vom Salzgehalt des Wassers abhängig. Mit steigender Temperatur (wobei die Gaslöslichkeit sinkt) und steigendem Salzgehalt des Wassers erniedrigt sich der Sättigungswert. Er erhöht sich aber mit steigendem Luftdruck (MERKEL et al. 2002).

3.4.3.7 Säure-Base-Gleichgewicht

Mit dem Säuren-Basen-Gleichgewicht ist die titrimetrische Bestimmung der Kohlensäurespezies mittels Säurekapazität (Acidität) und Basenkapazität (Alkalität) gemeint. Dieser Wert wird auch als Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht bezeichnet. In natürlichen Wässern spielt das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht eine große Rolle, insbesondere seine guten Puffereigenschaften. In Abbildung 10 sind die Schritte von Aufnahme des CO_2 aus der Luft bis zur Dissoziation zu CO_3^{2-} gezeigt.

Demnach können im Wasser folgende Kohlensäurespezies auftreten:

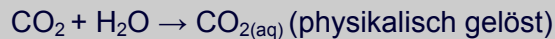
- gelöstes CO_2 bzw. H_2CO_3
- HCO_3^- (Hydrogencarbonat)
- CO_3^{2-} (Carbonat)

Der Anteil von H_2CO_3 beträgt circa 0,01 % des CO_2 und kann deshalb vernachlässigt werden. Folglich setzt sich der gesamte Anteil der im Wasser befindlichen Kohlensäurespezies aus den Konzentrationen von CO_2 , HCO_3^- und CO_3^{2-} zusammen.

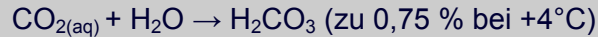
In welchem Verhältnis die einzelnen Kohlensäurespezies auftreten, hängt im Wesentlichen vom pH-Wert ab:

- bei pH-Wert < 4 ist nur CO_2 vorhanden
- pH-Wert zwischen 7 und 10 fast nur HCO_3^-
- bei pH-Wert > 11 überwiegend CO_3^{2-}

1. Schritt: Aufnahme von CO_2 aus der Luft und dem Boden



2. Schritt: Hydratisierung des physikalisch gelösten CO_2 mit H_2O

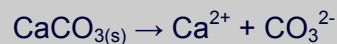


Zwischenschritte:

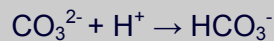
a. Vollständige Dissoziation der Kohlensäure



b. Lösung von Ca^{2+} -Ionen aus dem carbonatischen Gestein



3. Schritt: Assoziation von CO_3^{2-} mit H^+ (aus Zwischenschritt a)



Die Kalk-Kohlensäure-Gleichung:

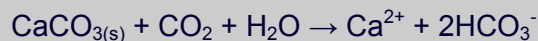


Abbildung 10: Reaktionsverlauf im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht nach BÖGLI (1978).

Die titrimetrische Bestimmung der Säurekapazität (Acidität) erfolgt mit 0,1 molarer Salzsäure bzw. der Basenkapazität (Alkalität) mit 0,1 molarer Natronlauge. Mit Hilfe der verbrauchten Titrereinheiten Säure bzw. Base wird jeweils die Äquivalenzkonzentration berechnet.

Anhand der bestimmten Säure- und Basenkapazität kann die Gesamt- und Carbonathärte des Wassers angegeben werden. Dabei umfasst die Gesamthärte den Gehalt an Erdalkalien ($\text{CaO} + \text{MgO}$), da deren Verbindungen schwer wasserlöslich sind und beim Erwärmen meist als Carbonate ausfallen. Die Carbonathärte spiegelt den Gehalt an Hydrogencarbonaten, sofern vorhanden auch Carbonat, alle Kationen, insbesondere der Erdalkalien und Alkalien, wider (HÖLTING 2005). In nachfolgender Tabelle sind die Bezeichnungen für die Härtestufen mit den dazugehörigen Äquivalenteinheiten in $\text{mmol}(\text{eq})/\text{L}$ aufgelistet.

Tabelle 2: Einteilung der Härtestufen nach KLUT-OLSZEWSKI aus HÖLTING (2005)

Härtestufe	Gesamthärte in $\text{mmol}(\text{eq})/\text{L}$
sehr weich	< 1,43
weich	1,43 ... 2,86
mittelhart	2,86 ... 4,28
ziemlich hart	4,28 ... 6,43
hart	6,43 ... 10,71
sehr hart	> 10,71

3.4.3.8 Eisen

Für die physiologischen Prozesse in Flora und Fauna ist Eisen ein wichtiger Bestandteil. Eisen liegt unter anaeroben Verhältnissen als Eisen(II) und unter aeroben Bedingungen als Eisen(III) vor. Es ist ein redoxsensitives Element und demzufolge ist seine Speziesverteilung von den vorherrschenden pH-Eh-Bedingungen abhängig. Die Löslichkeit des Eisens ist nicht nur vom vorherrschenden pH-Wert und Redoxpotential abhängig, sondern auch von den Carbonat- und Sulfatgehalten im Wasser. In Gegenwart von CO_2 und stabilen Schwefelspezies treten als Festkörper noch Eisenkarbonat und Eisensulfid auf und die Löslichkeit des Eisens ist vermindert (MATTHESS 1994).

3.4.4 Wasseranalyse der Haptionen

Zu den Hauptbestandteilen der anorganischen Inhaltsstoffe zählen die Elemente, die eine Konzentration größer als 5 mg/L aufweisen. Die untersuchten Vor-Ort-Parameter blieben über den gesamten Untersuchungszeitraum relativ konstant, so dass für die weiteren Untersuchungen des Grubenwassers lediglich die Wasseranalyse vom 20.01.04 herangezogen wurde. Für die Haptionenanalyse wurden die nachstehenden fünf Messpunkte beprobt:

- MP 05 Grüne Grotte
- MP 07 Maschinenschacht
- MP 06 Ablauf Marmorsaal
- MP 02 Ablauf Blauer Salon
- MP 01 Seitenstollen, Zulauf zum Wasserstollen

Dabei wurden nachstehende Ionen bestimmt:

- Anionen: F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}
- Kationen: Li^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}

Die Analyse der Haptionen Li, Na, K, Ca, Mg, F, Cl, NO_3 und SO_4 des Bergwerkwassers wurden mittels Ionenchromatographie, einer Hochdruck-Flüssigkeits-Chromatographie (HPLC)- Anlage in Freiberg bestimmt.

3.4.5 Tracereingabe und eingesetzte Tracermenge

3.4.5.1 Traceraufgabesonde LydiA

Die Wahl der Injektionstechnik besitzt einen maßgeblichen Einfluss auf das Tracertestergebnis. Um die Bestimmbarkeit des Freisetzungzeitpunktes, eine ortsgenaue Einspeisung, eine Vermeidung von Tracerverlusten und Verhinderung von Kontamination des durchfahrenen Wasserkörpers mit unkontrolliert freiwerdenden Tracern gewährleisten zu können, wurde die Aufgabesonde LydiA entwickelt.

Die Traceraufgabesonde LydiA besteht aus 2 Komponenten, dem Lycopodium Apparat, der den Tracer einschließt und einem Filtersystem. Mit dieser Sonde kann der Tracer teufenorientiert freigegeben werden. Die Öffnung des Gerätes, die mit dem wasserlöslichen Polyvinylalkohol (PVA) verklebt ist, erfolgt über eine temperaturabhängige chemische Reaktion, also beim Kontakt der Sonde mit dem Grubenwasser. Durch einen elektronischen Betriebsstundenzähler wird das Öffnen der

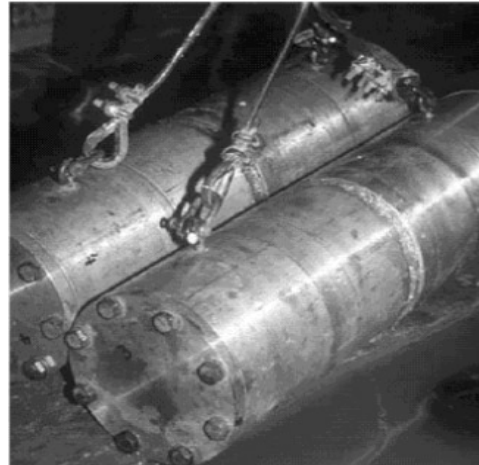


Abbildung 11: Traceraufgabesonde LydiA, aus WOLKERSDORFER (2002)

Sonde und damit der Freisetzungszeitpunkt des Tracers automatisch registriert. Diese Funktion ist wichtig für die späteren Berechnungen der Fließgeschwindigkeiten des Wassers (WOLKERSDORFER & FELDTNER & TREBUSAK 1997).

Der Markierungsstoff Uranin wurde am 21.03.2003 mittels der Traceraufgabesonde LydiA im Maschinenschacht in 14 m Teufe und im Schrägschacht der Grünen Grotte in 3,4 m Teufe in das Grubenwasser gegeben. Die eingegebene Menge Uranin betrug im Maschinenschacht 15 g und im Schrägschacht der Grünen Grotte zur 3. Sohle 250 g. Daraus errechnet sich für den Maschinenschacht bei 125 m³ eine durchschnittliche Uranin-Konzentration von 120 µg/L und für das restliche Grubengebäude bei geschätzten 2344 m³ eine Konzentration von 106 µg/L. Beide Konzentrationen liegen geringfügig unter der Sichtbarkeitsgrenze des Na-Fluoresceins (50 bis 500 µg/L). Der Markierungsstoff wurde nicht kontinuierlich sondern als einmalige Injektion ins Grubenwasser gegeben.

Tabelle 3: Übersicht der Eingabeorte des Tracers und dazugehörige Eingabemenge und -tiefe

Eingabeort	Teufe	Aufgabemenge
Maschinenschacht MP 07	14 m	15 g
Grüne Grotte MP 05	3,4 m	250 g

Nach der Eingabe des Markierungsstoffes wurde ein Auslaufen von Natriumfluorezeim im Maschinenschacht beobachtet.

Der Uraninnachweis erfolgte mittels eines Durchfluss-Bohrloch-Fluorometers GGUN-FL 20 Ser. #13, entwickelt von der Groupe de Géomagnétisme der Université de Neuchâtel. Dabei fand alle 4 Minuten die Aufzeichnung eines Signals statt, das mit Hilfe eines Datenloggers auf einer PCMCIA-Datenkarte abgespeichert wurde. Neben dem Uraninwert wurde mit dem Fluorometer auch die Trübung gemessen. Die ermittelte Tracermenge wurde in $\mu\text{g/L}$ angegeben.



Abbildung 12: Durchfluss-Bohrloch-Fluorometers GGUN-FL 20 Ser. #13, aus SCHNEGG und COSTA (2002)

Die notwendige Kalibrierung des Onlinefluormeters GGUN-FL20 wurde vom Tracerversuch in Großkogel in Tirol Februar 2002 übernommen (WACKWITZ 2002). Dabei ergab sich eine Nachweisgrenze von $7 \mu\text{g/L}$ und eine Bestimmungsgrenze von $10,6 \mu\text{g/L}$. Weitere Daten zur Durchführung und statistischen Auswertung der Kalibrierung befinden sich in der Diplomarbeit von WACKWITZ (2002).

4 Ergebnisse des Tracerversuches

4.1 Durchflussmessungen

Das dem Bergwerk zuströmende Wasser verlässt dieses wieder durch die auf der 2. Sohle angelegte Rösche. Es ergaben sich beim Dreieckswehr Durchflussmengen zwischen 2 und 70 L/min, was einem Abfluss von 3 bis 104 m³/d entspricht. Da der gemessene Abflusswert vom 3.02.2003 einen sehr hohen Durchfluss darstellt und dies nicht die sonstigen Bedingungen widerspiegelt, wurde er aus den Mittelwertsberechnungen herausgenommen. Somit ergab sich ein durchschnittlicher Abfluss von 11,4 bis 13,4 L/min bzw. 15 bis 19 m³/d bei einem Messfehler von 12 %. Die genauen Messdaten können im Anhang 7 nachgeschlagen werden.

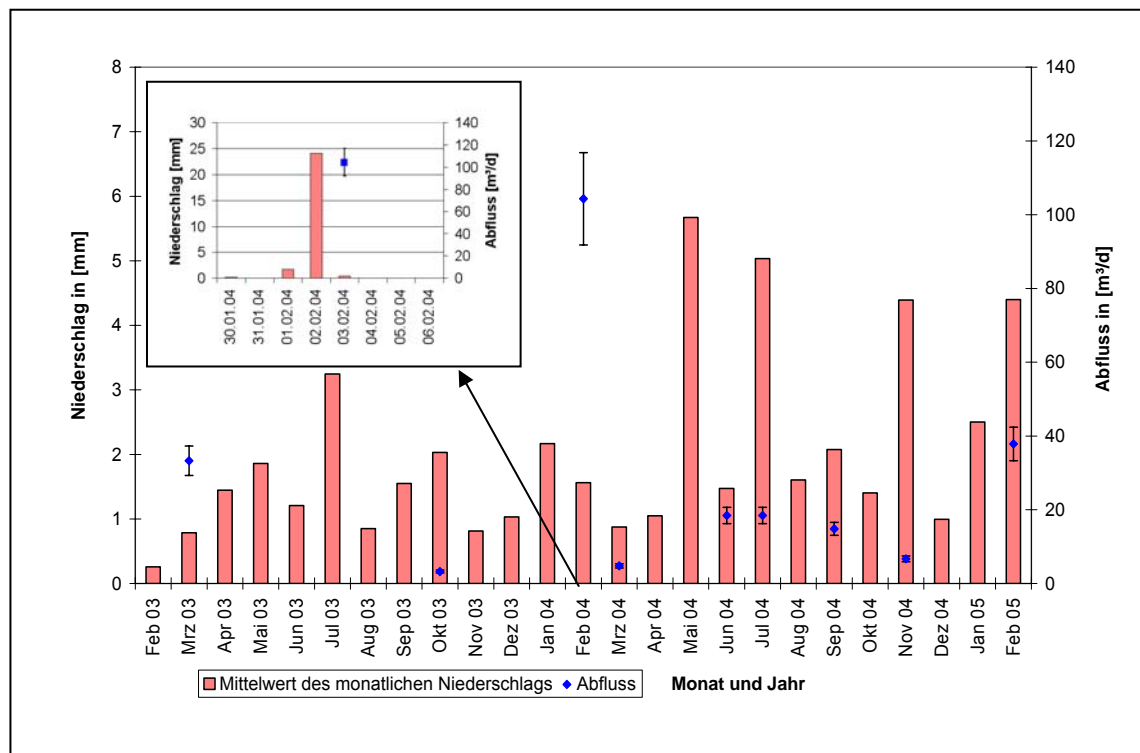


Abbildung 13: Niederschlag pro Monat und errechneter Abfluss während des Tracerversuches

Nach Aussage des Betreibers der Felsendome Rabenstein kommt es nach Regenfällen zur Erhöhung der Tropfwassermenge im Marmorsaal. In Abbildung 13 ist kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem Niederschlag und dem gemessenen Abfluss im Wasserstollen (MP 03) erkennbar. Erst bei genauer Betrachtung der einzelnen Tage ist eine Korrelation zwischen Niederschlag und Abfluss ersichtlich. Der hohe Abflusswert vom 3.02.2004 mit 100 m³/d resultiert aus dem Regenereignis vom Vortag mit 24 mm. Die Monate Oktober 2003 und November 2004 waren reich an Niederschlag und nur eine geringe Abflussmenge wurde gemessen. Jedoch am jeweiligen Messtag und dem vorhergehenden Tag fiel kein Regen. An der Messstelle MP 03 sind

die Schwankungen in der Abflusskurve deshalb mit den Niederschlagsereignissen gekoppelt. Die gemessenen Abflussmengen geben nur bedingt die tatsächlichen Grubenwasserabflüsse wieder, da die Abflussmengen nicht kontinuierlich durchgeführt werden konnten. Es kann anhand der Daten geschlossen werden, dass das Niederschlagswasser einen schnellen Weg durch das Deckgebirge findet.

Da sich seit der Flutung der unteren beiden Tiefbausohlen stationäre Verhältnisse einstellen konnten, entspricht der Abfluss aus dem Maschinenschacht im Wesentlichen dem Zufluss in die 3. und 4. Tiefbausohlen unter Vernachlässigung der Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit.

4.2 Teufenprofile

Es wurde die Temperatur, die elektrische Leitfähigkeit und die Uraninkonzentration im Maschinenschacht teufenabhängig gemessen. Anhand des Temperatur- und elektrischen Leitfähigkeitsprofils ist es möglich, eventuelle Schichtungen im Grubenwasserkörper zu erkennen. Die Uraninmessung zeigt den Verlauf des Tracertests.

4.2.1 Temperaturmessungen

Am 4.09.2002 wurde im Rahmen der Voruntersuchungen mittels Kabellichtlot der Firma Spohr/Frankfurt am Main ein Temperaturprofil für den Maschinenschacht aufgenommen. Dabei ergaben sich Temperaturen von 7,65 °C bis 8,0 °C, was einer Temperaturschwankung von 0,35 K entspricht. In Abbildung 14 ist deutlich zu erkennen, dass sich die Wassertemperatur ab 1,5 m Teufe bis zum Maschinenschachtgrund nur um 0,05 K schwankt. Schwankungen um 0,1 K werden als elektrisches Rauschen bezeichnet. Ab einer Teufe von 1,5 m erwärmt sich die Wassertemperatur bis zur Wasseroberfläche auf 8,0 °C.

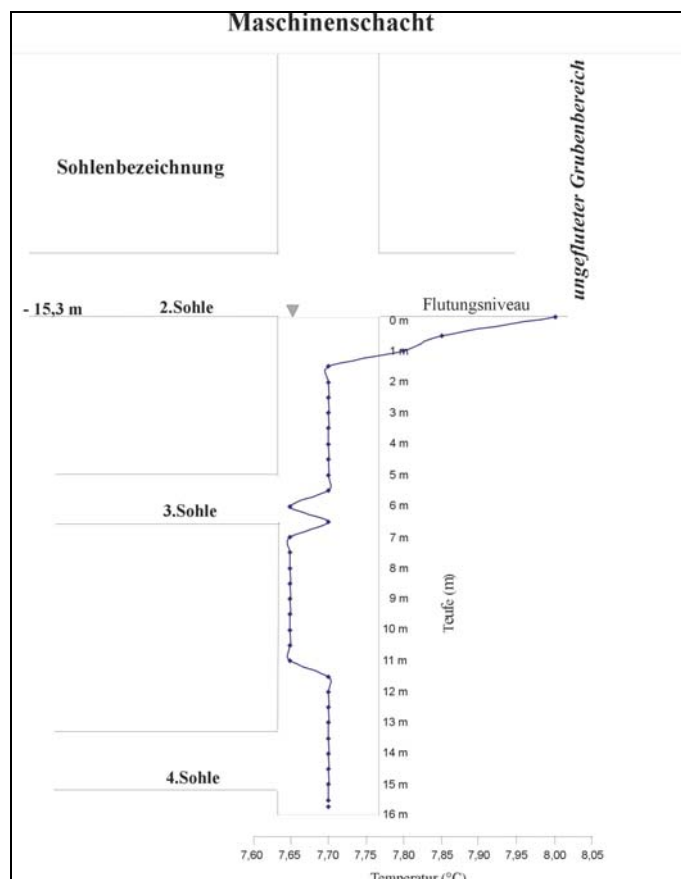


Abbildung 14. teufenorientierte Temperaturmessung im Maschinenschacht mittels Kabellichtlot, September 2002

Aufgrund dieser geringen Temperaturschwankungen kann angenommen werden, dass sich das Wasser kaum durch Konvektion bewegt. Durch die konstante Temperatur im Maschinenschacht kann nicht auf eine thermische Stratifikation des Wassers geschlossen werden. Nach HASCHE (2002) ist das Auftreten solcher sozusagen stagnierender Verhältnisse typisch für ein Ein-Schacht-System, wo auf Grund eines zu geringen geothermischen Gradienten weder eine freie noch eine erzwungene Konvektion stattfinden kann.

Zur Überprüfung dieses Ergebnisses wurden zwei weitere Schachtbefahrungen mittels der Multiparametersonde DL 512 LogIn GmbH, Gommern am 13.01.2003 und am 3.02.2005 durchgeführt. Gegenüber den Messungen am 4.09.2002 mit dem Kabellichtlot ist in Abbildung 15 eine geringe thermische Stratifikation im Maschinenschacht erkennbar. Das Wasser, welches aus der Strecke der 3. Sohle in den Maschinenschacht fließt, ist durchschnittlich 0,05 K wärmer als das Wasser, welches von der Strecke der 4. Sohle in den Maschinenschacht strömt. Das geringfügig kühlere Wasser befindet sich demnach in der unteren Tiefbausohle. Der geothermischen Gradienten hat in der geringen Wassertiefe von 16 m noch keinen spürbaren Einfluss.

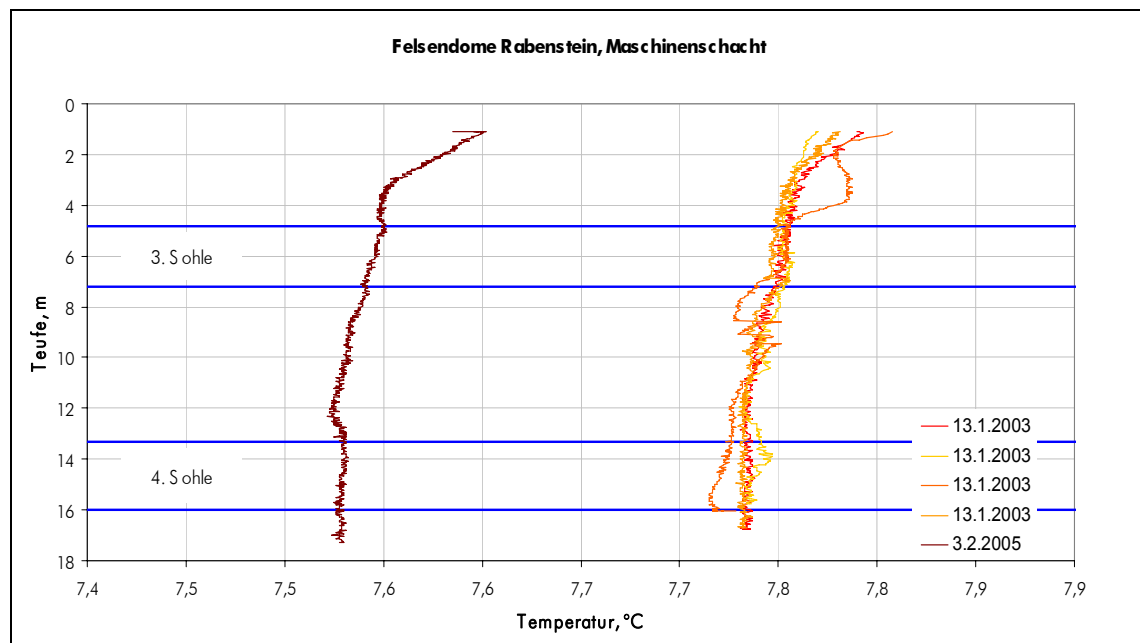


Abbildung 15: teufenorientierte Temperaturmessung im Maschinenschacht mittels Multiparametersonde Name DL 512 LogIn GmbH, Gommern

4.2.2 Elektrische Leitfähigkeitsmessung

Das Teufenprofil der elektrischen Leitfähigkeit wurde im Maschinenschacht an 2 Tagen, am 13.01.2003 und am 3.02.2005, aufgenommen. Die gemessenen Werte variieren von 1,15 mS/cm am 3.02.2005 an der Wasseroberfläche und 1,32 mS/cm am 13.01.2003 im Schachttiefsten. Tendenziell nimmt die elektrische Leitfähigkeit mit der Wassertiefe zu. Mit einer Abweichung von 0,05 mS/cm von der Wasseroberfläche zum Schachttiefsten ist die Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit jedoch sehr gering. Die

Abweichungen der Kurven untereinander aus den verschiedenen Schachtbefahrungen sind aufgrund der geringen Unterschiede kaum relevant.

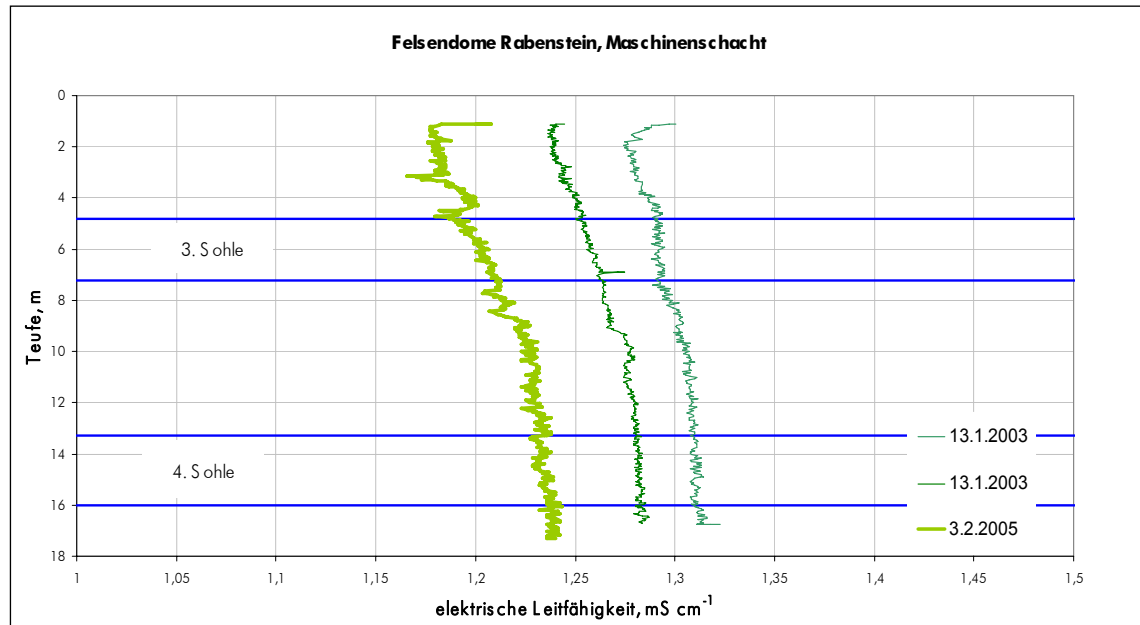


Abbildung 16: teufenorientierte elektrische Leitfähigkeitsmessung im Maschinenschacht mittels Multiparametersonde Name DL 512 LogIn GmbH, Gommern

4.2.3 Teufenprofil der Uraninkonzentration im Maschinenschacht

Die Teufenprofile der Uraninkonzentration im Maschinenschacht wurden an vier verschiedenen Tagen aufgenommen, am 16.03.2004, 8.07.2004, 31.08.2004 und am 3.02.2005. Für den Schrägschacht, der von der Grünen Grotte zur 3. Sohle führt wurde am 31.08.2004 ebenso ein Teufenprofil erstellt. Die angefertigten Teufenprofile befinden sich im Anhang 8 bis Anhang 12.

Im Maschinenschacht wurde am 16.03.2004 Uranin in einer Konzentration von 17 bis 27 ppb (17 bis 27 µg/L) nachgewiesen. In 5 bis 7 m Teufe, wo die Strecke der 3. Sohle im Maschinenschacht angeschlagen ist, steigt die Konzentration deutlich von 17 ppb bis auf 27 ppb an. Des Weiteren konnte in diesem Teufenprofil im Bereich der 4. Sohle ein geringer Anstieg der Uraninkonzentration von 17 ppb bis auf 20 ppb registriert werden. An den anderen 3 Messtagen ist allerdings keine teufenabhängige Uraninverteilung im Maschinenschacht zu verzeichnen. So liegen die Uraninkonzentrationen im Mittel für den 8.07.2004 bei 9 ppb, am 31.08.2003 bei 4 ppb und am 3.02.2005 konnte Uranin nur noch in einer geringen Konzentration von 0,2 ppb nachgewiesen werden.

Im Teufenprofil des Schrägschachtes, (Anhang 12) konnte am 31.08.2004 noch eine maximale Uraninkonzentration von 2,5 ppb nachgewiesen werden. Diese maximale Uraninkonzentration befindet sich im unteren Bereich des Schrägschachtes in einer Tiefe von 2,6 bis 3,2 m.

4.3 Ergebnisse des Tracerversuches

4.3.1 Tracerdurchgangskurven

Am 21.03.2003 wurde das Uranin für den Tracerversuch in den Maschinenschacht und in der Grünen Grotte injiziert. Die erste Registrierung von Uranin mit einem kleinen Peak nach rund 3,4 h ist auf ein Auslaufen des Tracers aus der LydiA beim Aufgeben im Maschinenschacht zurückzuführen. Die in 14 m Tiefe eingebrachte Tracermenge im Maschinenschacht erreichte nach 2 Tagen, am 23.03.2003, um 19.39 Uhr die Messstelle MP 07. Nach 65 Tagen wurde die höchste Konzentration von 57,95 µg/L Uranin gemessen (Abbildung 17). 352 Tagen nach Eingabe des Tracers ist ein zweiter Peak zu verzeichnen (Abbildung 17). Er resultiert aus der Tracereingabe aus der in 174 m Entfernung liegenden Grünen Grotte (MP 05). Nach dem 2. Peak ist ein weiterer 3. Peak, der sehr abgeflacht ist, nach 315 Tagen wahrzunehmen. Leider fiel von Anfang Mai bis Ende Juni das Fluorometer aus, so dass keine nähere Betrachtung möglich ist.

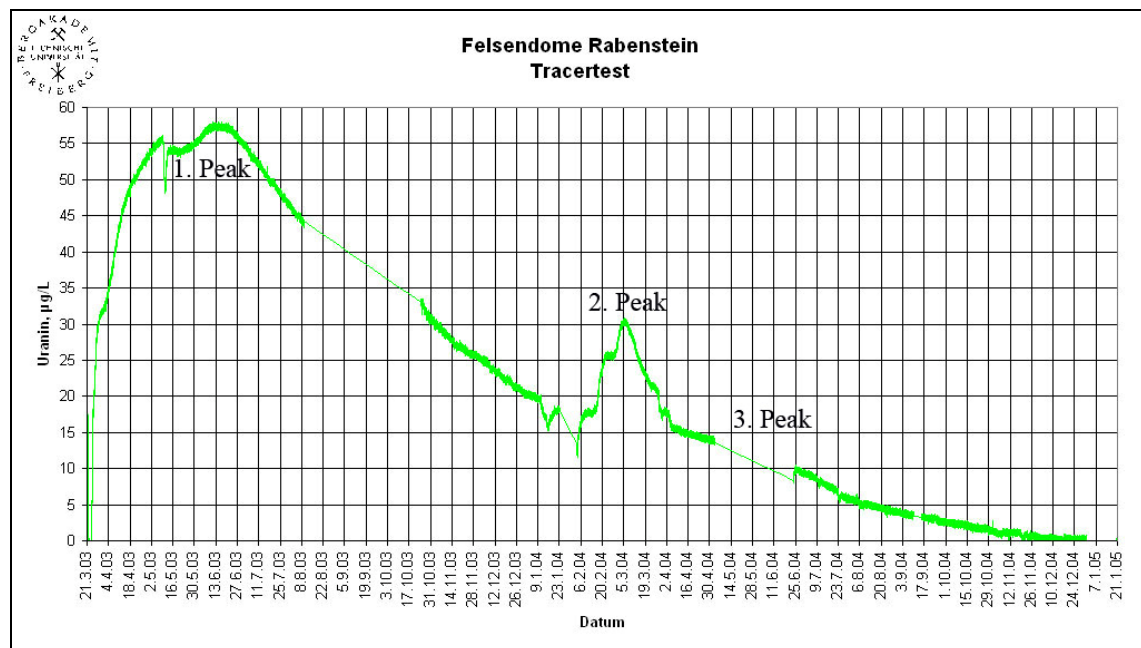


Abbildung 17. Tracerdurchgangskurve

Mit Hilfe der normalisierten Durchgangskurven aus Abbildung 18 und Abbildung 19 wurden die Durchgangszeiten ermittelt und daraus die jeweilige Geschwindigkeit berechnet.

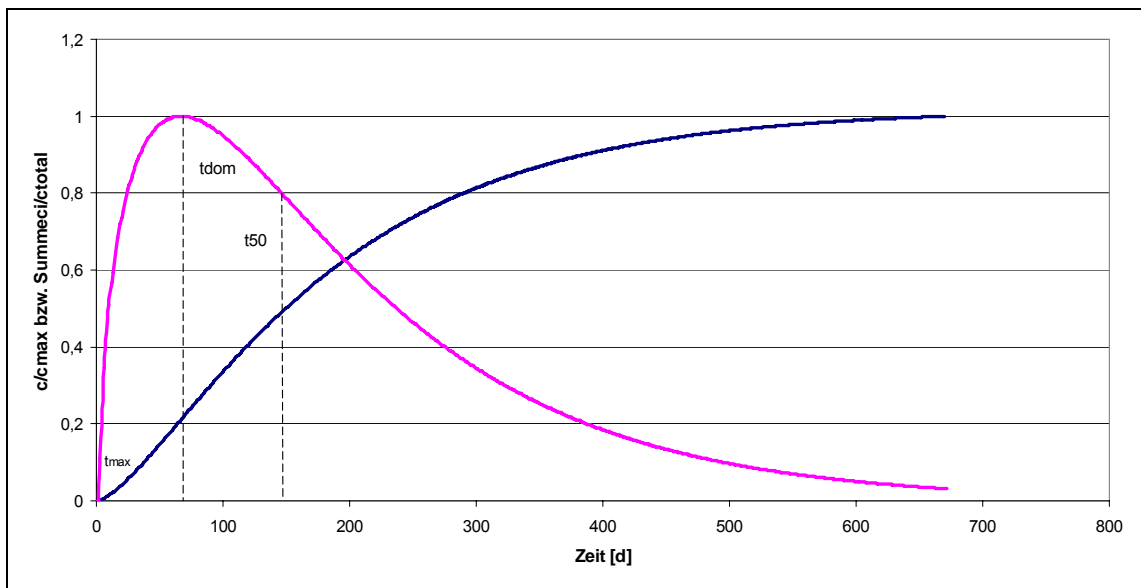


Abbildung 18: Summenkurve (blau) und normalisierte Tracerdurchgangskurve (c/c_{\max}) (rot) für Tracereingabe im Maschinenschacht

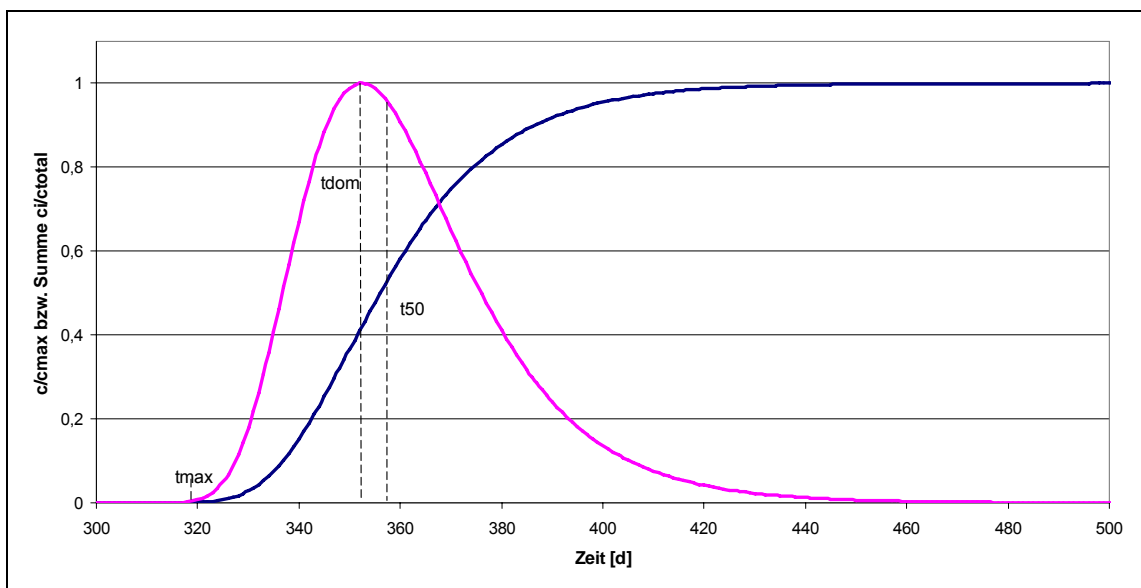


Abbildung 19: Summenkurve (blau) und normalisierte Tracerdurchgangskurve (c/c_{\max}) (rot) für Tracereingabe in Grüner Grotte

In nachfolgender Tabelle 4 sind für die Tracereingabestelle Grüne Grotte und Maschinenschacht jeweils die aus den ermittelten Tracerdurchgangskurven berechneten Geschwindigkeiten aufgelistet. Die für die Berechnung benötigte Fließstrecke beträgt im Maschinenschacht 14 m und vom Eingabeort Grüne Grotte bis zum Ausgang Maschinenschacht muss der Tracer eine Strecke von mindestens 174 m zurücklegen. Die maximale Abstandsgeschwindigkeit für den 2. Peak, der die Tracereingabe in der Grünen Grotte widerspiegelt, konnte mit 58 cm/d nur abgeschätzt werden, da sich die Anfangskonzentration mit der Endkonzentration aus der Tracereingabe im Maschinen-

schacht in der Tracerdurchgangskurve überschneidet. Der Dispersionskoeffizient und die longitudinale Dispersivität wurden nach Gleichung 1 und 2 berechnet.

Tabelle 4: Ergebnisse aus den Tracerdurchgangskurven für Maschinenschacht und gesamtes Bergwerk

Bergwerk			
Parameter	Einheit	Eingabe Maschinenschacht	Eingabe Grüne Grotte Gesamtes Bergwerk
t_{\max}	[h]	23. März 03, 19.39 Uhr 55,32 h	15.01.2004 300 Tage
t_{dom}	[d]	82 Tage	352 Tagen
t_{50}	[d]	149 Tage	356 Tage
t_{16}	[d]	54 Tage	340 Tage
t_{84}	[d]	322 Tage	379 Tage
v_{\max}	[m/s]	$7,1 \cdot 10^{-5}$ m/s	$6,7 \cdot 10^{-6}$ m/s
	[m/d]	6 m/d	58 cm/d
v_{dom}	[m/s]	$2,7 \cdot 10^{-6}$ m/s	$5,7 \cdot 10^{-6}$ m/s
	[cm/d]	23 cm/d	49 cm/d
v_{50}	[m/s]	$1,09 \cdot 10^{-6}$ m/s	$5,6 \cdot 10^{-6}$ m/s
	[cm/d]	9,4 cm/d	48 cm/d
v_{16}	[m/s]	$3 \cdot 10^{-6}$ m/s	$5,9 \cdot 10^{-6}$ m/s
v_{84}	[m/s]	$5 \cdot 10^{-6}$ m/s	$5,3 \cdot 10^{-6}$ m/s
D_L	[m ² /s]	$6,19 \cdot 10^{-6}$ m ² /s	$1,45 \cdot 10^{-6}$ m ² /s
	[m ² /d]	0,53 m ² /d	0,125 m ² /d
λ_L	[m]	5,67m	0,26 m

4.3.2 Wiederfindungsrate

Es wurden 15 g Uranin in den Maschinenschacht und 250 g Uranin in den Schrägschacht, der von der Grünen Grotte zum großen Abbauholraum der 3. Sohle führt, injiziert. Das ergibt eine Gesamtmenge von 265 g Uranin im gefluteten Teil des Grubengebäudes.

Die Wiederfindungsrate wurde anhand der gemessenen Uraninkonzentration vom 21.03.2003, dem Eingabetag, bis zum Ende des Tracerversuches, am 20.01.2005 berechnet. Die Abflussmenge für den Maschinenschacht wurde nicht bestimmt. Deshalb dient für die Berechnung der Wiederfindungsrate ein Schätzwert, der 1,25 L/min beträgt.

$$\frac{\Delta t \cdot Q \cdot c_{\text{Uranin}}}{1000000} + c_{\text{ges.Uranin,vorher}} \quad \text{Gl. 7}$$

Δt : Zeitdifferenz
 Q : Durchfluss (1,25 L/min)
 c_{Uranin} : Uraninkonzentration

Demnach wurden von den ins Bergwerk eingebrachten 265 g Uranin nur 26 g am oberen Ausgang des Maschinenschachtes wiedergefunden, was einer Auffindungsrate von 10 % entspricht.

4.4 Interpretation der Ergebnisse

Bei dem durchgeführten Tracerversuch wurde an 2 Stellen, im Maschinenschacht und im Schrägschacht, der von der Grünen Grotte in den großen Abbauholraum der 3. Sohle führt, das Markierungsmittel Uranin aufgebracht.

Aus den erhaltenen Werten kann jeweils für den Maschinenschacht einzeln und für den gesamten unter Wasser stehenden Bereich die Fließgeschwindigkeiten berechnet werden. Für den Maschinenschacht ergab sich eine maximale Abstandsgeschwindigkeit von 6 m/d, eine dominierende Strömungsgeschwindigkeiten von 23 cm/d und eine mediane Abstandsgeschwindigkeit von 9,4 cm/d. Das injizierte Uranin im Schrägschacht der Grünen Grotte erreichte nach rund 300 Tagen den Maschinenschacht. Für den gesamten unter Wasser stehenden Bereich wurde eine dominierende Strömungsgeschwindigkeit von 49 cm/d und eine mediane Abstandsgeschwindigkeit von 58 cm/d ermittelt. Im Gegensatz zur langsamen Abflachung des 1. Peaks mit 620 Tagen, der aus der Tracereingabe im Maschinenschacht resultiert, hat der 2. Peak (Tracereingabe im Schrägschacht) einen kürzeren Abklingen von 120 Tagen. Dies spiegelt den größeren longitudinalen Dispersionskoeffizient von 0,53 m²/d und den kleineren für Peak 2 mit 0,13 m²/d wider. Ein schwach ausgeprägter 3. Peak ist in der Tracerdurchgangskurve aus Abbildung 17 zu erkennen. Dieser Traceranteil gelangt höchstwahrscheinlich aus der 4. Sohle in den Maschinenschacht. Am 16.03.2004 konnte im Teufenprofil der Uraninmessung (Anhang 8) in der 4. Sohle des Maschinenschachtes eine geringfügig höhere Uraninkonzentration gegenüber dem darüber liegenden Wasserkörpers bis zur 3. Sohle ausgemacht werden. Damit ist eine hydraulische Verbindung zwischen 3. und 4. Sohle nachgewiesen.

Es kann angenommen werden, dass für die Durchströmung des Abbauholraumes der 3. Sohle aufgrund der dort wahrscheinlich vorherrschenden kleinen Fließgeschwindigkeiten das Uranin eine sehr lange Zeit benötigt.

Aufgrund der gleichmäßigen Verteilung des Uranins im Maschinenschacht kann nicht nur auf einen advektiven Stofftransport, sondern auch auf einen diffusiven Stofftransport geschlossen werden.

Ein sehr großer Teil des eingebrachten Uranins wurde nicht wieder aufgefunden. Nur 10 % der eingesetzten Menge wurde im Maschinenschacht detektiert.

Anhand der Temperaturprofile über die Teufe kann nicht von einer konvektiven Durchmischung des Schachtkörpers ausgegangen werden. Der geothermische Gradient spielt in der geringen Wassersäule von 17 m der Felsendome Rabenstein keine Rolle.

Durch die anschließende hydrodynamische Modellierung soll herausgefunden werden, wie sich das Wasser durch das Bergwerk bewegt und wo der nicht wiedergefundene Teil des Uranins verblieben ist.

5 Ergebnisse der Hydrogeochemischen Untersuchungen

5.1 Statistische Auswertung

Fehler bzw. Abweichungen von den tatsächlichen Verhältnissen können systematischer aber auch zufälliger Art sein. Wohingegen die zufälligen Fehler nicht vermeidbar sind und nur durch die Wahl der Analyseverfahren und Gerätschaften minimiert werden können, sind systematische Fehler nach Klärung der Ursache vermeidbar. Durch exaktes Arbeiten von Anfang an, beginnend mit einer repräsentativen Probenahme, über Konservierung und Probenvorbereitung bis hin zur Bestimmung und Auswertung wurde versucht, systematische Fehler möglichst zu unterlassen.

5.1.1 Ausreißerkontrolle

Ein beobachteter Wert, der aus der Reihe fällt, muss keineswegs auf eine Fehlmessung zurückzuführen sein. Dieser Wert sollte erst dann eliminiert werden, wenn eine individuelle und inhaltliche Plausibilitätsprüfung herangezogen wurde. Es gibt drei einfache univariate Ausreißertests, die den kleinsten bzw. den größten Beobachtungswert überprüfen:

- Grubbs –Test
- Dixon`s r-Statistiken
- David-Hartley-Pearson-Test

Zur Prüfung der Ergebnisse hinsichtlich ihrer Plausibilität wurde der David-Hartley-Person-Test herangezogen. Dieser Test beschreibt das Verhältnis der Spannweite R (range) zur Standardabweichung s der Stichprobe:

$$T = \frac{R}{s} = \frac{x_{(n)} - x_{(1)}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{(i)} - \bar{x})^2}{n-1}}} \quad \text{Gl. 8}$$

Die errechnete Prüfgröße wird mit einem Tabellenwert Z aus Tabelle 5 verglichen. Wenn $R < Z$ ist, ist der Extremwert kein Ausreißer (MERKEL & PLANER-FRIEDRICH 2003).

Tabelle 5: Probengröße und Prüfgröße

Probengröße n	90%	95%	99%	99,5%
3	1,997	1,999	2,000	2,000
4	2,409	2,429	2,445	2,447
5	2,712	2,753	2,803	2,813

Einige Werte aus den gewonnenen Vor-Ort-Parametern der Felsendome Rabenstein weichen deutlich vom Mittelwert des jeweiligen Parameters ab. Aus diesem Grund wurde mit statistischen Mitteln untersucht, ob diese Werte Ausreißer sind oder tatsächlich der Realität entsprechen.

5.1.2 Mittelwert

Das arithmetische Mittel ist der am häufigsten verwendete Mittelwert und wird auch als Standardmittelwert bezeichnet (STOYAN, STOYAN & JANSEN 1997). Der Mittelwert wird nach Gleichung 9 berechnet.

$$\bar{x}_{\text{arithm}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad \text{Gl. 9}$$

n: Stichprobenanzahl
x: gemessener Wert

Der Mittelwert ist sehr ausreißerempfindlich und sollte daher an ausreißerfreien Daten berechnet werden.

5.1.3 Standardabweichung

Die Standardabweichung ist ein Maß für die Messgenauigkeit und gibt die Streuung um den Mittelwert an. Sie berechnet sich aus der Quadratwurzel der Streuung (Varianz) nach Gleichung 10 (STOYAN, STOYAN & JANSEN 1997).

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Gl. 10}$$

Die Standardabweichung wurde nur für ausreißerfreie Datensätze $n > 3$ berechnet.

5.1.4 Ionenbilanz

Die Berechnung des Analysefehlers mittels Ionenbilanz nach Gleichung 11 ist bei der Auswertung der Hauptionen notwendig. Die Anzahl der positiv geladenen Ionen und Komplexe unter Berücksichtigung ihrer Wertigkeit muss denen der negativ geladenen Ionen und Komplexe im Wasser entsprechen.

$$\text{Fehler} [\%] = \frac{(\sum \text{Kationen} - \sum \text{Anionen})}{0,5 \cdot (\sum \text{Kationen} + \sum \text{Anionen})} \cdot 100 \quad \text{Gl. 11}$$

In mg/L vorliegende Konzentrationen müssen in mmol(eq)/L umgerechnet werden. Nach DVWK (1979) ist bei Analysen eine Abweichung bei Konzentrationen bis 2 mmol(eq)/L von 5 % und bei Konzentrationen über 2 mmol(eq)/L von 2 % zulässig.

Eine Komplexbildung bleibt bei dieser Berechnung unberücksichtigt. Bei der thermodynamischen Berechnung mit PHREEQC werden die Komplexe zur Berechnung der Ionenbilanz mit einbezogen. Dieses Programm berechnet den Bilanzfehler aus der Summe aller negativ und positiv geladenen Komplexe nach Gleichung 12.

$$Fehler [\%] = \frac{\sum Kationen - \sum Anionen}{\sum Kationen + \sum Anionen} \cdot 100 \quad \text{Gl. 12}$$

5.2 Vor-Ort-Parameter

5.2.1 Wassertemperatur

In Abbildung 20 sind die gemessenen Temperaturen der Messpunkte über der Untersuchungszeit dargestellt. Die niedrigste gemessene Temperatur mit 2,7 °C wurde im Januar 2003 im Marmorsaal (MP 06) und die höchste Temperatur mit 9,7 °C im September 2002 im Seitenstollen (MP 01) ermittelt.

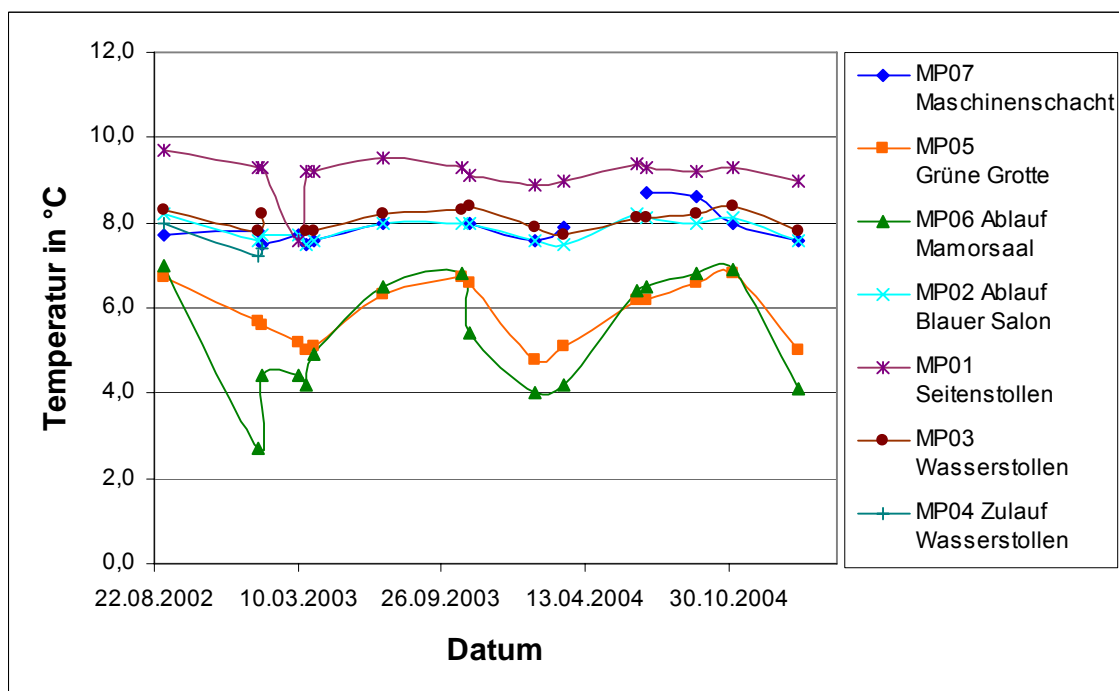


Abbildung 20: Wassertemperatur der Messpunkte im Untersuchungszeitraum

In den Felsendomenen von Rabenstein sind jahreszeitlich bedingte Schwankungen der Temperatur zu erkennen. Durch Sickerwassereintritte korrelieren die Temperaturen an den Messstellen im Marmorsaal (MP 06) sowie in der Grünen Grotte (MP 05) mit den Außentemperaturen. Während der Wintermonate kann die Ausbildung von Eisstalagmiten im Marmorsaal beobachtet werden. Gegenüber den Temperaturen an MP 05 und MP 06 weist der Seitenstollen (MP 01) eine höhere Temperatur von durchschnittlich 9 °C auf. An den Messpunkten MP 02, 03, 04 und 07 ist eine geringe jahreszeitliche Schwankung zu erkennen. Diese eher ausgeglichenen Temperaturen lassen auf eine längere Verweilzeit des Wassers im Bergwerk schließen.

5.2.2 pH-Wert

In den Wässern des Bergwerkes Rabenstein bewegt sich der pH-Wert von 6,5 bis 9. Außer dem Seitenstollen (MP 01) zeigen alle Messpunkte einen pH-Wert größer 7. Durch das Herauslösen von Ca^{2+} und Mg^{2+} -Ionen aus dem Kalkstein der Deckschicht des Bergwerkes während des Sickerwasserdurchganges sind an den Messpunkten im Marmorsaal und in der Grünen Grotte höhere Konzentrationen dieser Kationen im Wasser vorzufinden.

Die durchschnittlich niedrigsten pH-Werte wurden im Seitenstollen (MP 01) gemessen. Zurückzuführen sind diese auf die höheren Konzentrationen der Anionen Sulfat und Hydrogencarbonat.

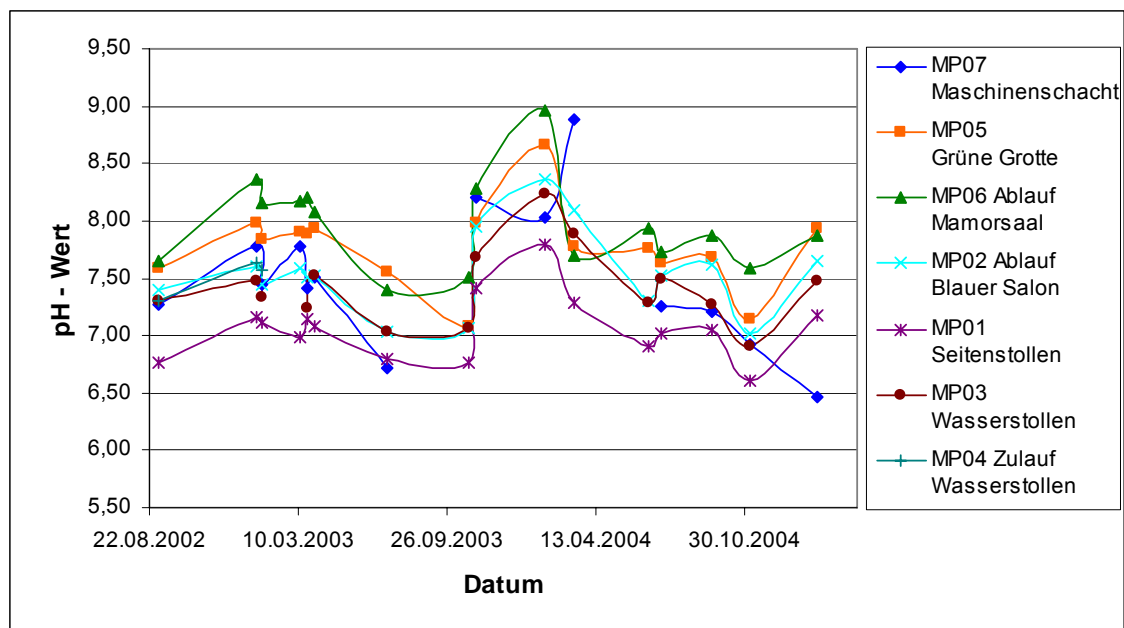


Abbildung 21: pH-Werte der Messpunkte im Untersuchungszeitraum

5.2.3 Elektrische Leitfähigkeit

Der Gehalt an dissoziierten Ionen einer Wasserprobe kann durch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit annähernd bestimmt werden. Außer dem Seitenstollen (MP 01), der sich deutlich mit gemessenen Werten bis 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ von den anderen Messpunkten abhebt, bewegen sich die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten zwischen 630 bis 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, maßgeblich verursacht durch Verwitterungs- und Lösungsprozesse. Dies spiegelt einen Lösungsinhalt wider, der laut MATTHESS (1994) üblich für süßes Grundwasser mit 30 bis 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ist. Eine Ausnahme bildet die gegenüber den anderen Messpunkten überdurchschnittlich hohe elektrische Leitfähigkeit des Seitenstollens (MP 01), welche in den höheren Konzentrationen der dissoziierten Ionen begründet liegt. In der Analyse der Hauptionen (Kapitel 5.3) sind die Konzentrationen der Kationen und Anionen im Seitenstollen deutlich höher als die der anderen Messpunkte.

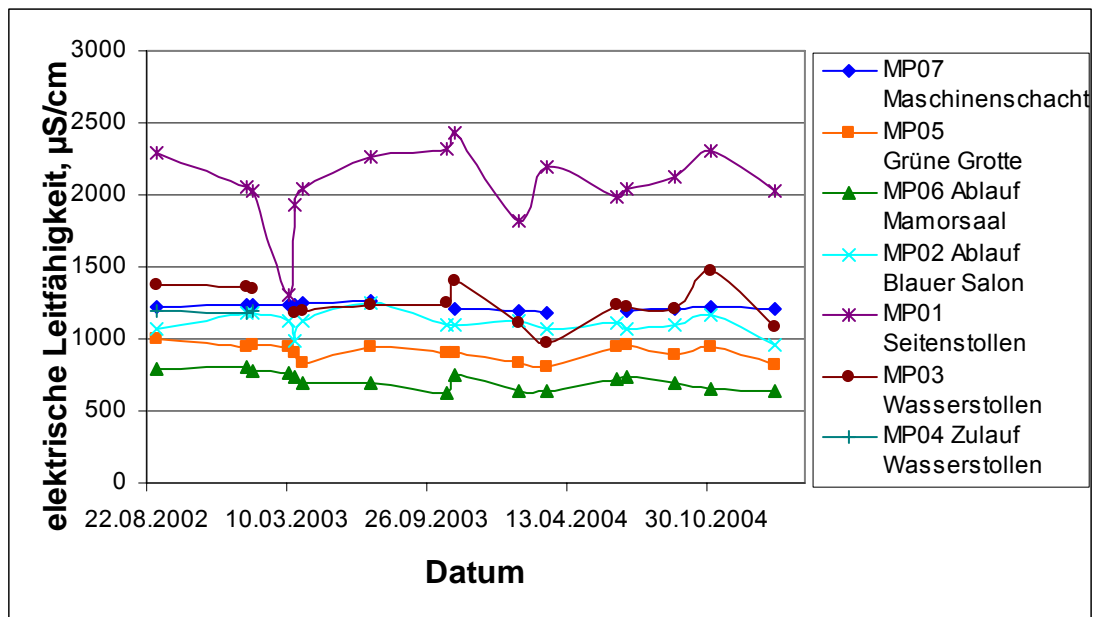


Abbildung 22: Elektrische Leitfähigkeiten der Messpunkte im Untersuchungszeitraum

Einen weiteren Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit besitzt die Temperatur. Eine Zunahme der Löslichkeit der Stoffe im Wasser und damit verbundene Erhöhung der Leitfähigkeit wird durch steigende Temperaturen hervorgerufen. Der Marmorsaal (MP 06) und die Grüne Grotte (MP 05) weisen die niedrigsten Temperaturen auf. Demzufolge sind auch die elektrischen Leitfähigkeiten geringer. Das Wasser des Seitenstollens (MP 01) mit der durchschnittlich höchsten Leitfähigkeit besitzt auch die höchsten gemessenen Wassertemperaturen im Bergwerk.

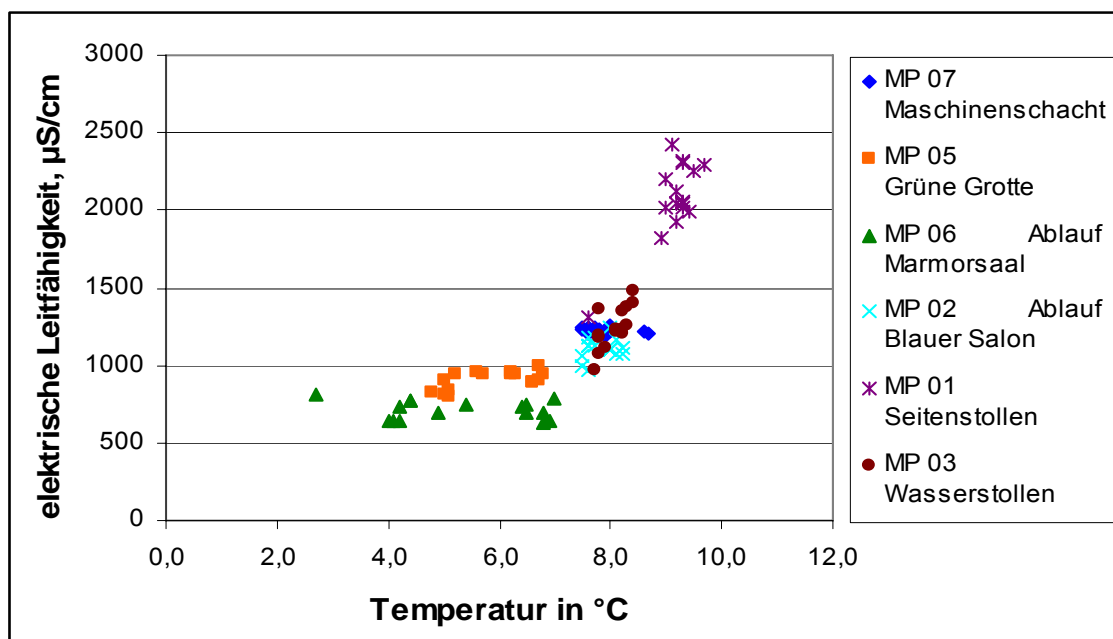


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit

5.2.4 Redoxpotential

In Abbildung 24 sind die mittleren korrigierten Redoxpotentiale der Messpunkte über dem Untersuchungszeitraum dargestellt. Die Redoxpotentiale variieren von 340 mV, gemessen in der Grünen Grotte, bis 540 mV im Wasserstollen (MP 03) und weisen folglich auf oxidierende Verhältnisse im Wasserkörper hin (MERKEL et al. 2002). Dieses Ergebnis kann durch die in Abschnitt 5.2.5 dargestellte Sauerstoffsättigung von 10 bis 80 % belegt werden.

Während die durchschnittlichen Redoxpotentiale an einem Messtag nur geringen Unterschieden unterlagen, weisen die Messungen im zeitlichen Verlauf deutliche Schwankungen auf.

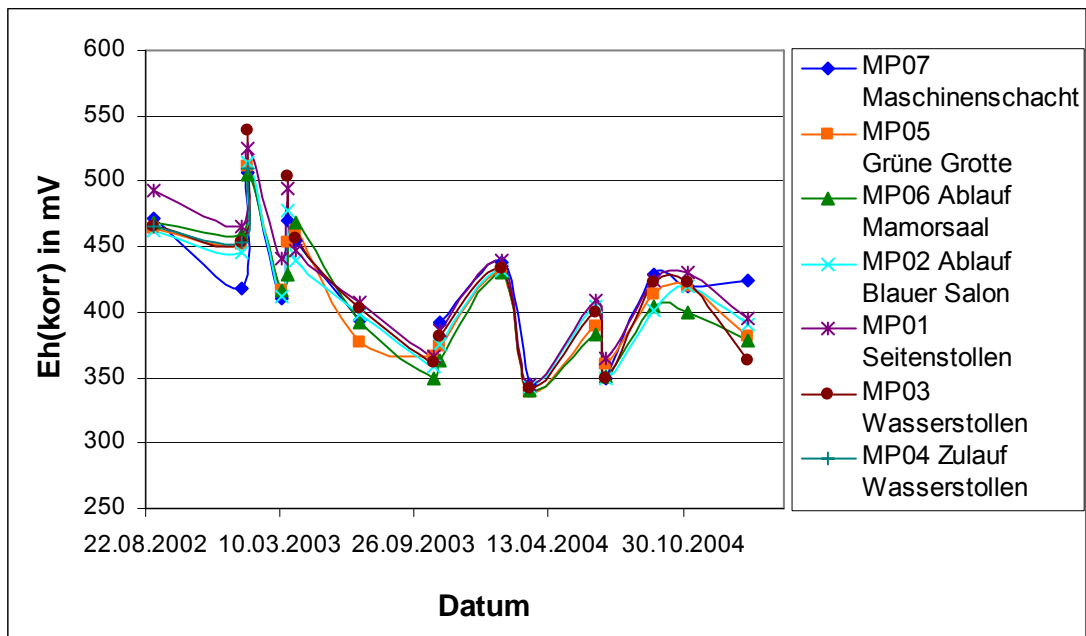


Abbildung 24: Redoxpotentiale an den Messpunkten im Untersuchungszeitraum

5.2.5 Sauerstoff

Der Sauerstoffgehalt im Grubenwasser wurde zweimal gemessen, im März 2002 und März 2003. Zur besseren Beurteilung der Sauerstoffsituation wurden nicht die Sauerstoffkonzentrationen sondern die prozentuale Sauerstoffsättigung in Abbildung 25 dargestellt. Diese variiert von 3 % Sättigung im Seitenstollen, (MK 01) bis 83 % Sauerstoffsättigung im Ablauf Marmorsaal (MP 06).

Die Löslichkeit von Gasen ist temperaturabhängig, jedoch ist der gravierende Unterschied von 70 bis 80 % Sauerstoffsättigung im Marmorsaal und im Ablauf Marmorsaal gegenüber den anderen Messpunkten auf dieser Weise nicht erklärbar. Die im Marmorsaal und der Grünen Grotte gemessene Sauerstoffsättigung kann auf den durch Wassertropfen eingebrachten Sauerstoff zurückgeführt werden. Die 20%-ige Sauerstoffsättigung im Maschinenschacht kann durch die längere Verweilzeit des Wassers in den gefluteten unteren Tiefbausohlen bewirkt werden.

Die geringe Sauerstoffsättigung im Seitenstollen kann durch den Sauerstoffverbrauch bei der mikrobiell katalysierten Oxidation der Eisensulfide (Pyrit) verursacht werden. Dieser verbindet sich nach Gleichung 13 mit Schwefel zu Sulfat (MATTESS 1994).

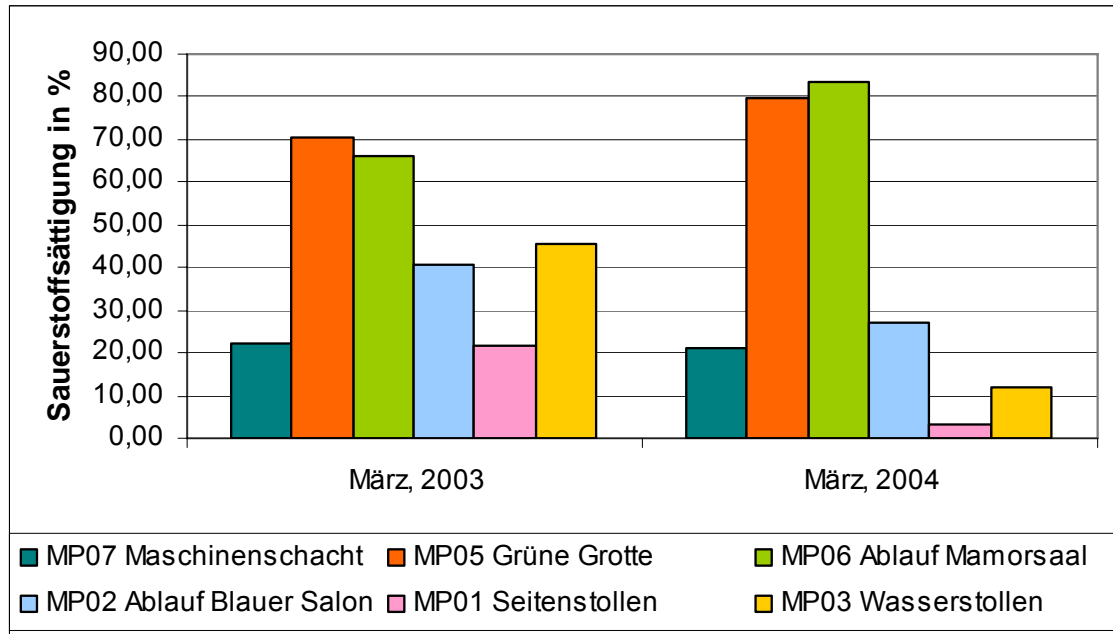
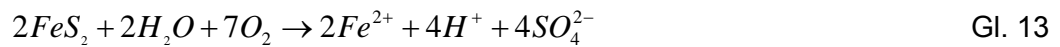


Abbildung 25: prozentuale Sauerstoffsättigung der Messstellen im Untersuchungszeitraum

Der Sauerstoffgehalt bestimmt maßgeblich das Redoxpotential eines Wassers. Anhand des Sauerstoffgehaltes können Aussagen über das Oxidationsvermögen sowie die damit verbundenen Lösungs- und Ausfällungsprozesse von Stoffen im Wasser getroffen werden. So würde bei gleichem pH-Wert das redoxensitive Eisen bei aeroben Verhältnissen als Eisenhydroxid und unter anaeroben Verhältnissen als Pyrit ausfallen.

5.2.6 Säure-Base-Gleichgewicht

Für den 20.01.2003 wurden für 5 Messpunkte die Gesamthärte und Carbonathärte berechnet und in Tabelle 6 anhand der Gesamthärte die Härtestufen klassifiziert.

Tabelle 6: Gesamthärte und Karbonathärte der Messpunkte und Klassifizierung nach KLUT-OLSZEWSKI

Messpunkt	Gesamthärte in [mmol(eq)/L]	Carbonathärte in [mmol(eq)/L]	Klassifizierung
MPKT02 Ablauf Blauer Salon	10,4	3,7	hart
MPKT06 Ablauf Mamorsaal	7,9	2,8	hart
MPKT05 Grüne Grotte	9,0	2,7	hart
MPKT07 Maschinenschacht	12,4	3,8	sehr hart
MPKT01 Seitenstollen	23,0	7,8	sehr hart

Das Wasser im Bergwerk Rabenstein wird nach dem Klassifizierungssystem nach KLUT-OLSZEWSKI als hart bis sehr hart eingestuft. Besonders das Wasser im Seitenstollen (MP 01) hebt sich durch eine sehr hohe Gesamthärte von den anderen Messpunkten ab. Zurückzuführen ist die hohe Gesamthärte auf die fast doppelt so hohen Calcium- und Magnesiumkonzentrationen im Seitenstollen gegenüber den anderen Messpunkten.

Einteilung der Kohlenstoffspezies in Hydrogencarbonat und gelöster Kohlensäure

Im Grubenwasser der Felsendome Rabenstein wurden pH-Werte zwischen 6,5 und 9 gemessen. Demnach liegt der Hauptteil des Kohlenstoffs als Hydrogencarbonat vor und nur ein kleiner Teil findet sich im Wasser gelöst als Kohlensäure wieder. In Abbildung 26 und tabellarisch im Anhang 15 sind die prozentualen Anteile und der Gehalt in mg/L von Hydrogencarbonat und Kohlensäure gegenübergestellt.

Der Maschinenschacht und der Blaue Salon weisen Hydrogencarbonatgehalte von 215 bis 230 mg/L auf. Der Gehalt an gelöster Kohlensäure liegt zwischen 3 und 10 mg/L, was einen Anteil von 1,5 bis 5 % vom gesamten Kohlenstoff ausmacht.

Im Marmorsaal und der Grüne Grotte befinden sich die in den Felsendomen niedrigsten gemessenen Hydrogencarbonatgehalte mit 130 bis 185 mg/L. Während aber in der Grünen Grotte gelöste Kohlensäuregehalte von 2 bis 10 mg/L (1,6 bis 6 % des Kohlenstoffs) vorkommen, liegen die Gehalte im Marmorsaal bei 0,1 bis 1,5 mg/L, was einen prozentualen Anteil von 0,1 bis 0,9 entspricht. Diese niedrigen Kohlensäuregehalte spiegeln die gemessenen pH-Werte bis 9 wider.

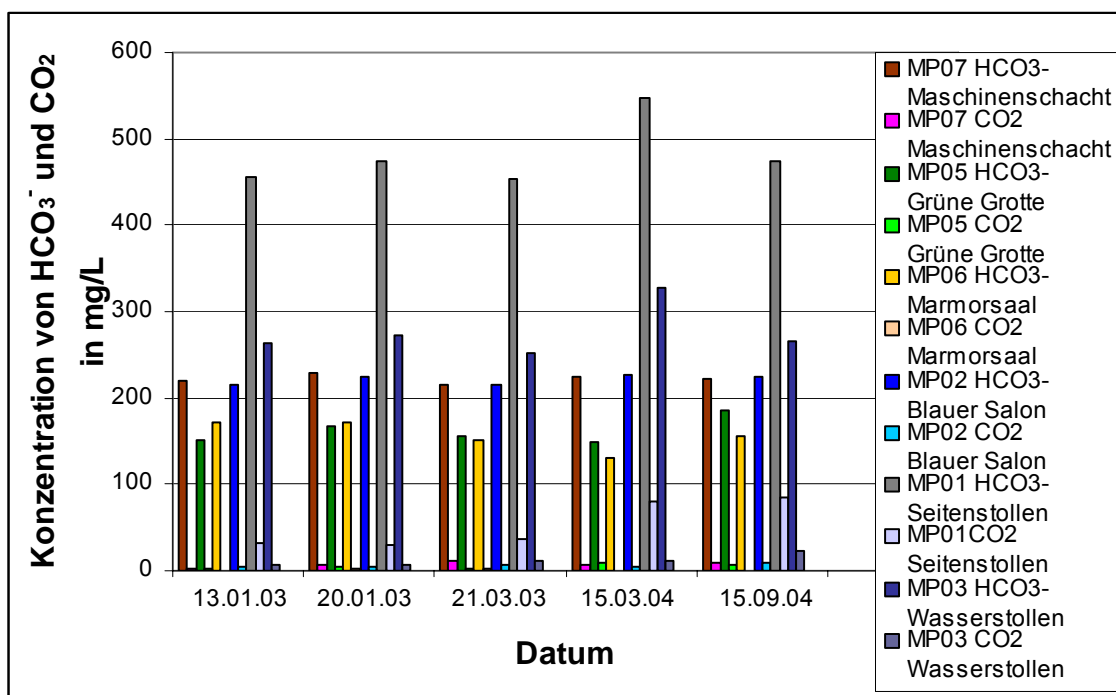


Abbildung 26: Gegenüberstellung des Hydrogencarbonat- und der Kohlensäuregehalt des Grubenwassers

Die im Seitenstollen gemessenen Hydrogencarbonatwerte sind mit 450 bis 550 mg/L deutlich höher als die ermittelten Konzentrationen der anderen Messstellen. Der Anteil von Hydrogencarbonat am Kohlenstoff liegt hier zwischen 85 und 94 %. Die gemessene Konzentration der gelösten Kohlensäure befindet sich zwischen 30 und 84 mg/L, das ein prozentualer Anteil von 6 bis 15 % entspricht.

Der Wasserstollen stellt ein Mischprodukt aus allen anfallenden Wässern der Felsdom dar. Die hier ermittelten Hydrogencarbonatgehalte liegen bei 250 bis 330 mg/L und die der gelösten Kohlensäure bei 7 bis 22 mg/L. Das kommt einem prozentualen Anteil von 92 bis 97 % Hydrogencarbonat bzw. 3 bis 8 % gelöster Kohlensäure am gesamten Kohlenstoff gleich.

5.2.7 Eisen

In Abbildung 27 sind die gemittelten Eisengehalte ($\text{Fe}_{\text{gesamt}}$) im Bergwerkswasser dargestellt. Die höchste Eisenkonzentration von 0,61 mg/L wurde am 15.03.2004 im Marmorsaal (MP 06) gemessen. Dieser Wert ist gegenüber den anderen Messstellen und Probenahmetagen höher, stellt aber dennoch nach der Plausibilitätsprüfung der Daten keinen Ausreißer dar. Auffallend ist, dass am 5.03.2004 auch an den anderen Messpunkten höhere Werte im Vergleich zu den anderen Messtagen aufgenommen wurden. Deshalb kann auch ein Messfehler bzw. Gerätefehler für die Abweichungen in Betracht kommen. Die meisten Eisenkonzentrationen liegen unterhalb der Nachweisgrenze bzw. bis 0,06 mg/L. Nach MERKEL in FRIMMEL, F.H. (1999) können geogene Eisenkonzentrationen im Kalkgestein im Mittel 0,03 bis 0,7 mg/L aufweisen. Im Nebengestein sind Erzpartikel vorzufinden. Da das Grubenwasser einen basischen Charakter besitzt, pH-Werte über 7, und ein Redoxpotential von 0,3 bis 0,4 V aufweist, befindet sich das Eisen nicht in Lösung sondern ist laut Stabilitätsfeld nach MATTHESS (1994) als $\text{Fe}(\text{OH})_3$ und Fe_2O_3 ausgefallen und demnach nicht in der Wasserlösung nachweisbar.

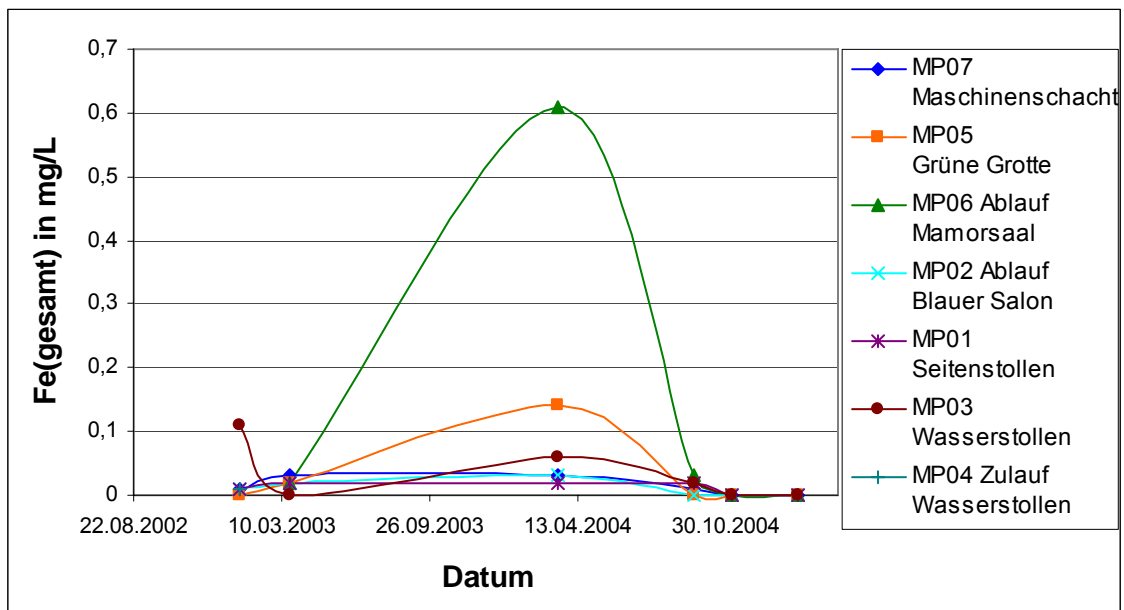


Abbildung 27: Eisengehalte an den Messstellen im Untersuchungszeitraum

5.3 Wasseranalyse der Hauptionen

Die ermittelten Konzentrationen der einzelnen Ionen sind im Anhang 16 aufgeführt. Für die Berechnungen der Ionenbilanz geht das Vor-Ort gemessene Hydrogencarbonat mit ein. In Anhang 3 ist die prozentuale Verteilung der Äquivalenzkonzentration der Ionen graphisch dargestellt.

An allen Messpunkten sind Calcium, Sulfat und Hydrogencarbonat, vorwiegend als freie Ionen, die dominierenden Spezies. Magnesium, Natrium, Chlorid und Kalium sind prozentual weniger im Grubenwasser vertreten.

Calcium

Die Lösung des Karbonatgesteins hängt vom Gehalt an freiem gelöstem Kohlendioxid ab (MATTHESS 1994). Die Lösung des Calciums erfolgt vorwiegend durch das Sickerwasser, welches durch das Deckgebirge fließt. Im Marmorsaal kann die Bildung von Stalaktiten bzw. Stalagniten beobachtet werden. Dabei verdunstet das mitgeführte Wasser teilweise und das Calcium kann als Calciumkarbonat ausfallen. Außerdem liegt nach der durchgeführten chemisch-thermodynamischen Gleichgewichtsberechnung in Kapitel 5.4 eine Übersättigung von Calcium vor und kann auch dadurch als Calcit ausgefallen sein.

Calcium ist mit 32 bis 35 %igem Anteil am Lösungsinhalt das dominierende Kation im Grubenwasser und bestimmt die Wasserhärte maßgeblich. Dabei wurde im Marmorsaal mit 6 mg/L die geringste Konzentration an Calcium gemessen. Im Blauen Salon, in der Grünen Grotte und im Maschinenschacht wurden Konzentrationen von 7 bis 9 mg/L ermittelt und die höchste Calciumkonzentration im Seitenstollen mit 17 mg/L. Das Calcium-Ion ist relativ groß und kann hydratisiert werden. Es bildet leicht anorganische Komplexe mit Hydrogencarbonat und Sulfat aus.

Sulfat

Die Sulfatanteile im Grubenwasser variieren von 22 % im Marmorsaal und Blauen Salon bis zu 29 % im Seitenstollen. Der Seitenstollen weist die höchste Konzentration von Sulfat mit 730 mg/L auf. Dagegen ist im Wasser des Marmorsaales nur 190 mg/L Sulfat enthalten. In der Grünen Grotte und im Blauen Salon wurden Sulfatgehalte von 240 bis 245 mg/L und im Maschinenschacht 380 mg/L bestimmt.

Das Sulfation kann als freie SO_4^{2-} -Ionen im Wasser vorkommen. Da Sulfationen eine starke Tendenz zur Komplexbildung aufweisen, bilden sie diese zum Beispiel mit Ca zu CaSO_4^0 , mit Mg zu MgSO_4^0 oder mit Na zu NaSO_4^0 . In den analysierten Wässern wurde mit Hilfe der hydrogeochemischen Modellierung festgestellt (Kapitel 5.4), dass vor allem CaSO_4^0 und MgSO_4^0 als Komplexe gebildet werden. Die höchsten Anteile im Wasser weisen jedoch die freien Sulfationen auf.

Laut MATTHESS (1994) können Kalksteine durchschnittlich 22 bis 175 mg/L Sulfat enthalten, diese sind jedoch nur in porösem oder angewittertem Karbonatgestein löslich. Da das Gestein tektonisch beansprucht wurde, können die zwischenkristallinen Sulfatablagerungen im Gestein in Lösung gehen. Dies allein ist aber nicht die Ursache für die im Wasser vorgefundene Sulfatkonzentration von 190 bis 730 mg/L. Sowohl in

Drusen als auch direkt im Kalkstein und in den Nebengesteinen tritt sehr häufig Pyrit (FeS_2) auf (NHUAN 1982). Auch die Minerale Coelestin (SrSO_4) und Chalkopyrit (Cu-FeS_2) weisen das Element Schwefel in ihren Verbindungen auf. Bei der Oxidation dieser sulfidischen Minerale wird Sulfat freigesetzt, da das Nitrat (NO_3^-) seinen Sauerstoff an den Schwefel des Pyrits gibt und bei dieser Reaktion Stickstoff (N_2) und Sulfat (SO_4^{2-}) entsteht (Gleichung 13 in Kapitel 5.2.5). Zudem kann Sulfat ebenfalls durch zahlreiche anthropogene Einflüsse, wie aus schwefelhaltigen Düngemitteln, Schwefeldioxid-Niederschläge aus der Luft, industrielle Abwässer usw. ins Grundwasser und damit in das Grubenwasser gelangen. Da Teile des Bergwerks verfüllt wurden (z.B. Seitenstollen), kann Sulfat eventuell durch Bauschutt zugeführt worden sein.

Nitrat

Nitrat kommt im Grubenwasser in einer Konzentration von 47 mg/L im Marmorsaal bis 63 mg/L in der Grünen Grotte und Maschinenschacht vor, das entspricht einer prozentualen Äquivalenzkonzentration zwischen 2 und 5 %. Es ist anzunehmen, dass das meiste Nitrat über das Sickerwasser aus der Bodenzone infolge intensiver landwirtschaftlicher Düngung ins Grubenwasser eingetragen wird.

Magnesium

In den Gesteinsanalysen von NHUAN (1975) wurden prozentuale Anteile von 0,3 bis 1,3 % ermittelt, was einem Dolomitanteil von rund 3 % im Karbonatgestein entspricht. Die im Grubenwasser enthaltenen Konzentrationen liegen im Marmorsaal bei 20 mg/L, in der Grünen Grotte bei 22 mg/L und im Blauen Salon und Maschinenschacht bei 29 mg/L vor. Die höchste Konzentration von Magnesium befindet sich im Seitenstollen mit 68 mg/L. Die ermittelten Werte entsprechen einer prozentualen Äquivalenzkonzentration zwischen 9 und 12 %.

Neben dem aus dem Kalkstein gelöstem Magnesium kann es auch anthropogen durch Düngemittel über das Sickerwasser ins Grubenwasser gelangen.

BERNSTEIN fand 1955 in seiner Gesteinsanalyse (Anhang 17) ein Dolomitgestein in den Felsendomen, hat jedoch seine genaue Herkunft nicht beschrieben.

Natrium

Die im Grubenwasser gemessenen prozentualen Äquivalenzkonzentrationen für Natrium liegen zwischen 5 und 6 %. Dabei befinden sich die niedrigsten Natriumkonzentrationen im Marmorsaal und in der Grünen Grotte mit 20 mg/L. 29 mg/L Natrium weist das Wasser des Blauen Salons und des Maschinenschachtes auf. Im Seitenstollen wurden die höchsten Konzentrationen von 68 mg/L Natrium gemessen.

Der schwarzgraue Calcitmarmor weist Anteile von Tonsubstanz auf, die laut MATTHESS (1994) reich an Natrium sind. Darüber hinaus gelangt Natrium durch Ionenaustauschprozesse ins Grundwasser. Durch Einsatz von Tausalzen gelangt Natrium ins Grundwasser. Einmal in Lösung gibt es praktisch keine Reaktion, die es wieder aus dem Grundwasser entfernen könnte (MATTHESS 1994).

Chlorid

Wie bei der Natriumkonzentration weist der Marmorsaal und die Grüne Grotte die geringsten Chloridkonzentrationen mit 43 mg/L auf. 38 mg/L Chlorid wurden im Maschinenschacht und 66 mg/L im Blauen Salon ermittelt. Der gemessene Wert im Seitenstollen ist auch hier der höchste im Bergwerk mit 83 mg/L. Chlorid liegt einer prozentualen Äquivalenzkonzentration von 4 bis 8 % im Felsendom Rabenstein vor.

In der Brekzie, die am großen mittleren Pfeiler in der Grünen Grotte sichtbar ist, sind Brocken eines amphibolführenden Chloridschiefers aufgeschlossen (GEISSLER & NHUAN 1982). Chloridionen gehen leicht in Lösung. In Streusalzen und Düngemitteln ist Chlorid enthalten und kann somit auch anthropogen ins Grubenwasser gelangen.

Kalium

Die Kaliumkonzentrationen im Wasser liegen im Marmorsaal und der Grünen Grotte bei 4 mg/L, im Blauen Salon und im Maschinenschacht zwischen 6 und 7 mg/L. Die höchste Kaliumkonzentration wurde im Seitenstollen mit 22 mg/L gemessen. Die ermittelten Kaliumkonzentrationen machen eine prozentuale Äquivalenzkonzentration von 1 % aus. Durch Verwitterung von Kaliumglimmern, hier Muskovit in den Phylliten, wird Kalium freigesetzt. Des Weiteren ist Kalium ein Bestandteil von Düngemitteln.

Fluor

Fluor ist nur in Spuren bei Konzentrationen von 0,1 bis 0,12 mg/L enthalten.

Lithium

Die ermittelten Werte für Lithium befanden sich unter der Nachweisgrenze.

5.4 Chemisch-thermodynamische Gleichgewichtesberechnung mittels PREEQC

Als Sättigungsindex (SI) wird der dekadische Logarithmus des Quotienten aus Ionenaktivität (IAP) und Löslichkeitsprodukt (LP) bezeichnet. Es ist ein Maß für die thermodynamische Aktivität in einem hydrogeochemischen System. Der Sättigungsindex charakterisiert den Sättigungsgrad des Lösungsinhaltes eines Wassers hinsichtlich der chemischen Spezies oder der im Wasser gelösten Minerale (HÖLTING 2005). Nach MERKEL & PLANER-FRIEDRICH (2002) berechnet sich das Ionenaktivitätsprodukt aus den analytisch bestimmten Konzentrationen einer gegebenen Wasseranalyse durch Umrechnung in Aktivitäten unter Berücksichtigung der Ionenstärke, der Temperatur des Wassers sowie der Komplexbildung. Aus der maximal möglichen Löslichkeit ergibt sich das Löslichkeitsprodukt durch Umrechnung auf die Wassertemperatur. Der Sättigungsindex wird nach Gleichung 14 berechnet.

$$SI = \log \frac{IAP}{LP} \quad \text{Gl. 14}$$

Der Sättigungsindex gibt Auskunft, ob eine Lösung im Gleichgewicht mit einer festen Phase ist oder ob eine Unter- bzw. Übersättigung besteht. MERKEL & PLANER-

FRIEDRICH (2002) bezeichnen den Bereich von -0,2 bis +0,2 als ein quasi-Gleichgewicht. Kleinere SI-Werte als -0,2 sind untersättigt bezüglich der jeweiligen Mineralphase und größere SI-Werte als +0,2 sind übersättigt.

Für die Berechnung des Sättigungsindex stehen die Analysedaten der Hauptionen vom XX zur Verfügung. Zusätzlich wurde aus dem Vor-Ort gemessene K_S (4,3)-Wert die Konzentration von Hydrogencarbonat abgeleitet, da im pH-Bereich zwischen 4,3 und 8,2 die Konzentration an K_S (4,3) in mmol/L gleich der Konzentration an HCO_3^- in mmol/L ist.

Für die Berechnung der einzelnen Messstellen werden demnach folgende Parameter eingegeben:

- Anionen: F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-
- Kationen: Li^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}
- pe-Wert, pH-Wert und Temperatur

5.4.1 Ergebnisse

Die nach der chemisch-thermodynamischen Gleichgewichtsberechnung ermittelte prozentuale Speciesverteilung ist im Anhang 4 dargestellt. Der größte Anteil der Hauptionen liegt als freie Ionen im Grubenwasser vor. Dabei dominieren die freien Hydrogencarbonat-, Calcium- und Sulfationen. Das Sulfat bildet leicht Komplexe mit Calcium und Magnesium.

Der berechnete Sättigungsindex ist in Abbildung 28 dargestellt.

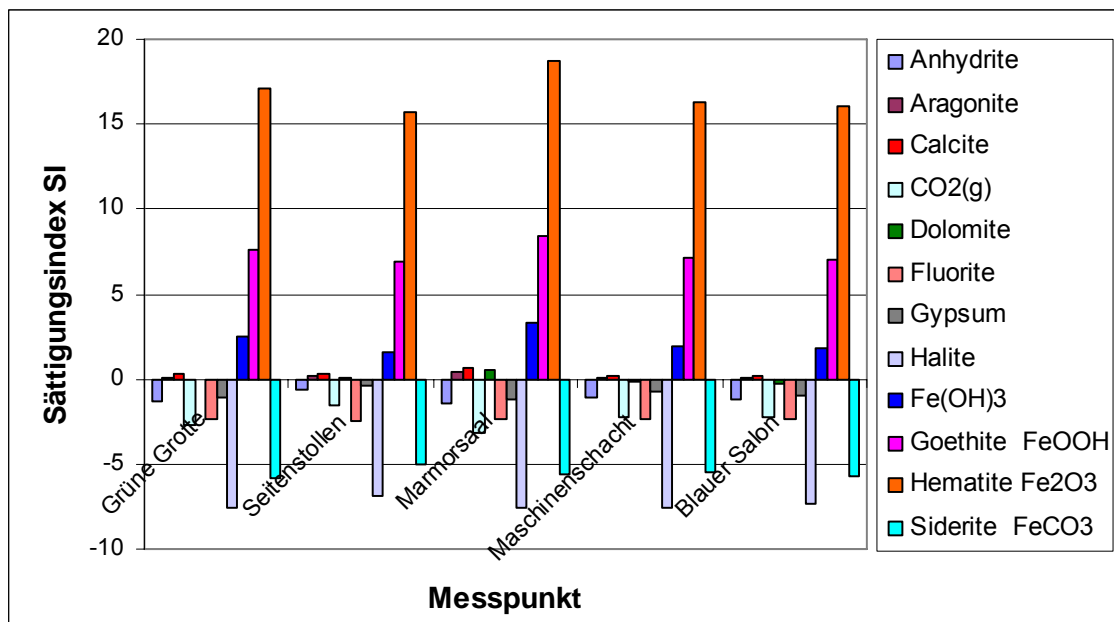


Abbildung 28: Sättigungsindex der Messstellen

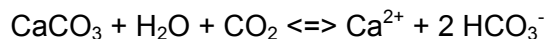
Es ist deutlich zu erkennen, dass unter den im Grubengebäude herrschenden Bedingungen die vorkommenden Eisenspecies Goethit, Hämatit und Eisenhydroxid ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) stark übersättigt sind. Das ausgefallene rotbraune Eisenhydroxid ist in Abbildung 29 im Hintergrund zu erkennen.

Auch Aragonit und Calcit sind an allen Messstellen übersättigt. Dagegen ist der Dolomit nur am Messpunkt Marmorsaal (MP 06) und Seitenstollen (MP 01) übersättigt. Im Marmorsaal ist die Übersättigung der drei Mineralphasen im Gegensatz zu den anderen Messstellen höher. Diese Übersättigung konnte vor Ort deutlich anhand der vorkommenden Stalaktiten und Stalagmiten bestätigt werden (Abbildung 29).



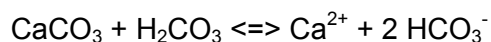
Abbildung 29: Calcitablagerungen an der Firste im Wasserstollen (MP 03), Foto: WOLKERSDORFER

Während das kohlensäurehaltige Wasser durch die Firste der 2. Sohle fließt, löst es den Kalkstein bis zur Kalksättigung in sich auf. Wenn es auf die Firste der 2. Sohle trifft, fließt das Sickerwasser an der Decke entlang, verliert an Fließgeschwindigkeit und bildet auf Grund der Oberflächenspannung Tropfen. Dabei gibt es CO_2 ab, was zur Ausfällung von kristallinem CaCO_3 führt. Dieser Sinter-Kalk bildet den von der Decke des Marmorsaals herabhängenden Tropfstein, den Stalaktiten. Der auf den Boden auftreffende Tropfen enthält noch etwas Kalk. Beim Aufprall des Tropfens wird nochmals CO_2 freigesetzt und Kalk fällt aus. Entsprechend wächst ein weiterer Tropfstein vom Boden in die Höhe und bildet einen Stalagmiten. Die Verdunstung des Wassers spielt nur in wenigen Höhlen bzw. Höhlenteilen, z.B. an Höhleneingängen eine Rolle.



oder auch

Gl. 15



Alle anderen vorkommenden Spezies in Abbildung 28 sind untersättigt.

5.5 Beurteilung der Wasserbeschaffenheit

Es gibt noch keine allgemein gültigen Grenzwerte für die Beurteilung von Grubenwasser. Zur Zeit werden Handlungsempfehlungen im Rahmen des EU Projekts ERMITE im Zusammenhang mit der EU Wasserrahmenrichtlinie erarbeitet.

Das Wasser aus dem Seitenstollen (MP 01) weist eine deutlich höhere Ionenkonzentrationen als die restlichen Messpunkte (MP 02 bis MP 07) auf. Jedoch tritt nach Weiterfließen ein Verdünnungseffekt ein, da sich Wasser aus dem Seitenstollen mit dem Wasser aus dem Blauen Salon und dem Marmorsaal vermischt. Erst dieses Wasser wird durch die Rösche in den Pleißbach geleitet und sollte folglich gesetzlichen Anforderungen genügen, da es nun die Eigenschaften eines Fließgewässers beeinträchtigen kann. Im Wasserstollen wurde keine Hauptionenanalyse vorgenommen, deshalb wurden die gemessenen Ionenkonzentrationen im Seitenstollen, Marmorsaal

und Blauer Salon zur Bewertung der Wasserbeschaffenheit berücksichtigt, da diese sich im Wasserstollen vereinen.

Zur Beurteilung der Wasserbeschaffenheit des Grubenwassers wurden die Gewässergüteklassifizierung der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, Stand Januar 1997) und der IWS-Liste (1994) herangezogen.

Die Konzentrationen der gemessenen Elemente im Marmorsaal und im Blauen Salon genügen den Anforderungen von LAWA und der IWS-Liste. Im Seitenstollen sind jedoch erhöhte Werte für Sulfat gemessen worden und unterliegen nach der Gewässergüteklassifizierung von LAWA (1997) einer hohen Belastung ($< 800 \text{ mg/L}$). Nach dem Vermischen mit den anderen Wässern des Bergwerks im Wasserstollen kann angenommen werden, dass es immer noch eine erhöhte bis hohe Belastung aufweist, wenn in den Pleißbach fließt. Laut IWS-Liste (Einleitwerte für kontaminierte Wässer, für Sulfat 3000 mg/L) ist die Sulfatkonzentration unterschritten.

5.6 Zusammenfassung

Das untersuchte Grubenwasser kann in 3 Wassertypen unterteilt werden. Die Wässer im Marmorsaal und in der Grünen Grotte weisen jeweils ähnliche Werte in den untersuchten Parametern auf. So sind in diesen beiden Messpunkten die niedrigsten Konzentrationen an Haptionen zu finden. Auch sind hier Übereinstimmungen in den gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten, Sauerstoffgehalten und pH-Werten vorhanden. Die Wassertemperaturen gleichen sich im Gegensatz zu den anderen Messpunkten deutlich den Außentemperaturen an. Das Wasser der Grünen Grotte und des Marmorsaals stehen aber nicht in Verbindung miteinander, sondern weisen die ähnliche Merkmale durch das zugeführte Sickerwasser von den Firsten der 2. Sohle auf. Das Wasser vom Marmorsaal wird auf der 2. Sohle in den Wasserstollen (Rösche, MP 03) geleitet. Dagegen findet das Wasser aus der Grünen Grotte keinen direkten Weg zum Wasserstollen, sondern gelangt durch die unter Wasser stehenden 3. und 4. Sohlen über den Maschinenschacht und anschließend über den Blauen Salon in den Wasserstollen.

Das Wasser aus dem Maschinenschacht fließt über den Blauen Salon und Zulauf Wasserstollen in den Wasserstollen und bildet somit eine zweite Einheit. Auch hier wurden ähnliche Werte der jeweils gemessenen Parameter gemessen. Durch die längere Verweilzeit der Wässer in den Tiefbausohlen werden durch zusetzende Wässer aus dem Gebirge noch zusätzliche Ionen herausgelöst.

Der Seitenstollen weist die höchsten Haptionenkonzentrationen sowie gegenüber den anderen Messpunkten auch eine höhere elektrische Leitfähigkeit und Temperatur auf. Im Seitenstollen wurden schwach saure pH-Werte gemessen, welche die niedrigsten pH-Werte im Grubenwasser der Felsendome Rabenstein darstellen. Hauptursache dafür ist höchstwahrscheinlich das anstehende Nebengestein, das aus Phylliten und Amphibolschiefer besteht. Der Abbauhohlraum hinter dem Seitenstollen ist zugemauert. Es ist nicht bekannt, was sich hinter dieser Mauer befindet. Es ist zu vermuten,

dass sich hinter der Mauer nicht zu verwendendes Abbaumaterial des Bergwerkes befindet bzw. es besteht die Möglichkeit das Bauschutt abgelagert wurde.

Der Wasserstollen stellt ein Mischwasser aus dem Seitensollen und dem Rest des Bergwerkes dar. Dieses Wasser wird durch die Rösche in den Pleißbach geleitet.

Nach der Gleichgewichtsberechnung mit PHREEQC stellte sich heraus, dass an allen Messpunkten Calcit, Aragonit, Geothit, Hämatit und Eisenhydroxid übersättigt sind. Die Hauptionen Calcium, Hydrogencarbonat und Sulfat treten hauptsächlich als freie Ionen im Wasser auf und nur in geringen Größenordnungen liegen sie als Komplexe vor. Das Grubenwasser der Felsendome Rabenstein ist ein $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ Wasser.

6 Theoretische Grundlagen für die Modellierung mit ANSYS/FLOTRAN

6.1 Einleitung

Das elementare Ziel einer Simulation ist die mathematische Nachbildung des Verhaltens eines technischen Systems. Bei der Finiten-Elementen-Methode (FEM) wird in der rechnerischen Simulation von Differentialgleichungen davon ausgegangen, dass anhand differentiell kleiner Teile (Elemente) das Verhalten einer Struktur beschrieben werden kann (MÜLLER & GROTH 2000). Für die Lösung dieser Differentialgleichungen stehen verschiedene numerische Lösungsverfahren zur Verfügung, welche in Kapitel 6.3.7 näher erläutert werden.

CFD – Computational Fluid Dynamic (Fluidanalyse)

Die Kernidee einer Fluidanalyse ist die Bestimmung der thermischen und strömungsmechanischen Charakteristik des Fluids.

Strömungsberechnungen werden zur Bestimmung der Strömungscharakteristik eines Fluids, wie z.B. dem Druckabfall, der Geschwindigkeitsverteilung, der Flussrichtung (Strömungslinien), der Auftriebs- und Widerstandkräfte und der Effekte aus Aufheizen oder Abkühlen verwendet.

6.2 Möglichkeiten von ANSYS/FLOTRAN

Für eine Strömungsberechnung steht die Finite-Elemente-Methode des Moduls FLOTRAN für Computational Fluid Dynamics (CFD) zur Verfügung. Mit Hilfe dieses Moduls können stationäre (zeitunabhängige) und transiente (zeitabhängige) Strömungen berechnet werden. Die Wahl der Zeitschritte in transienten Berechnungen erfolgt automatisch durch FLOTRAN bzw. durch die Festlegung des Anwenders.

Des Weiteren können die Berechnungen mit und ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses simuliert werden. Hinsichtlich der Strömungen wird nach laminarem oder turbulentem Verlauf unterschieden. Bei einer turbulenten Strömung kann der Benutzer sich zwischen verschiedenen Turbulenzmodellen entscheiden. Bei den in den Felsendomen Rabenstein untersuchten Strömungen wird von einem laminaren Verlauf ausgegangen, die Turbulenzmodelle werden deshalb nicht näher erläutert.

Die Wahl der Fluideigenschaften beeinflusst die Berechnungsergebnisse maßgeblich. Es wird zwischen inkompressiblen und kompressiblen Fluiden unterschieden. Für die Ausführung der Simulation ist die Eingabe der Dichte und Viskosität des verwendeten Fluides erforderlich. Unter Berücksichtigung der Wärme werden außerdem Angaben bezüglich Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärme benötigt. In FLOTRAN stehen

erzwungene, freie und gemischte Konvektion sowie Strömung in porösen Medien für die Berechnungen zur Auswahl.

Eine weitere Option in FLOTRAN stellt die Simulation von Fluidgemischen dar. Die Vermischungsvorgänge bei Flüssigkeiten beruhen auf Dichte-, Viskosität- und Diffusionsunterschieden. Die Transportgleichungen (Kapitel 6.3.1) werden auf Grundlage der Massenerhaltung der einzelnen Komponenten gelöst d.h. mit Hilfe einer Kontinuitätsgleichung mit einem Diffusionsterm zur gegenseitigen Durchmischung. Das Ergebnis ist eine Konzentrationsverteilung der einzelnen Fluidkomponenten. Zur Beschreibung von Fluidgemischen stehen in FLOTRAN drei Varianten zur Verfügung (ANSYS Inc. 2001).

I. Verdünnungsvermischungen (Dilute Mixture)

Hierbei wird das Eindringen eines kleinen Masseanteils in eine vorhandene Strömung untersucht, wobei der zugeführte Massenanteil so gering ist, dass dieser das Strömungsverhalten der vorhandenen Hauptströmung nicht beeinflusst.

II. Zusammengesetzte Vermischung (Composite Mixture)

Die Gesamteigenschaften der Strömung ergeben sich aus den Eigenschaften der einzelnen Fluidkomponenten. Die Lösung der Momentengleichung ist stets abhängig von der Verteilung der Massenanteile der Komponenten in der Strömung (Verknüpfung der Transportgleichung der Konzentrationen mit der Momentengleichung).

III. Gasgemische (Composite Gas)

6.3 Allgemeine Gesetzmäßigkeiten

6.3.1 Kontinuitätsgleichung (Massenbilanz)

Das Verhalten der Dichte in einem Volumenelement wird durch die Kontinuitätsgleichung beschrieben. Sie besagt, dass in einer Zeiteinheit die durch einen Querschnitt fließende Fluidmenge mit mittlerer Geschwindigkeit und mit der hindurchfließenden Masse an allen Querschnitten den gleichen Wert betragen muss.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad \text{Gl. 16}$$

ρ : Dichte

V_x, V_y, V_z : Vektorkomponenten des Geschwindigkeitsvektors

t : Zeit

Bei inkompressiblen Fluiden besagt die Kontinuitätsgleichung, dass eine durch ein Volumenelement strömende Flüssigkeit, die stets aus denselben Teilchen besteht, seine Masse beibehält. Die zeitliche Änderung der Dichte geht somit gegen null und die Kontinuitätsgleichung verkürzt sich auf die Gleichung 17 (OERTEL 2002 und BOHL 1998).

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad \text{Gl. 17}$$

6.3.2 Momentengleichung (Impulsbilanz)

Der Momentengleichung liegt die Newtonsche Gleichung mit Kraft = Masse × Beschleunigung zugrunde. Die dabei auf eine ruhende Flüssigkeit wirkenden Kräfte sind die Schwerkraft (und andere Massekräfte) und die Druckkraft. Bei der bewegten Flüssigkeit tritt zusätzlich die Flüssigkeitsreibung hinzu. In die Impulsbilanz fließen die Bernoulli-Gleichungen und die Euler-Gleichungen ein. Die Bernoulli-Gleichung bringt durch die Komponenten statischer Druck, potentielle Energie (Schweredruck) und die kinetische Energie (dynamischer Druck) die Konstanz der Energie zum Ausdruck. Die Euler-Gleichung der Hydrodynamik bezieht sich auf eine Volumeneinheit und beinhaltet die Beziehung Masse × Beschleunigung = Summe der Kräfte und beschreibt in guter Näherung die Bewegung von sehr niedrig bis nicht viskosen und inkompressiblen Flüssigkeiten.

Abgeleitet von diesen Grundgleichungen ergibt sich die partielle Differentialgleichung der Momentengleichung, die in Gleichung 18 für die Vektorkomponente in X-Richtung dargestellt ist (OERTEL 2002).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial z} &= \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + R_x + K_x + \\ \frac{\partial}{\partial x} + \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} + \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} + \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \text{Gl.18}$$

ρ : Dichte

g_x : Schwerkraftkomponente

μ : effektive Viskosität (bei laminarer Strömung ist sie gleich der dynamischen Viskosität)

R_x : nutzereigene Widerstandsterme/Quellen

K_x : zusätzliche Feldkräfte aus Multiphysik (z.B. Magnetfeldkraft auf ein magnetisierbares

Analog der Kontinuitätsgleichung ist für Fluide die zeitliche Änderung des Impulses innerhalb eines Volumenelementes konstant, welches die ein- und austretenden Impulsströme, die wirkenden Scher- und Normalspannungen und die auf die Masse des Volumenelements wirkenden Kräfte beinhaltet (OERTEL 2002).

6.3.3 Energiegleichung

Bei einer temperaturabhängigen Strömung wird zusätzlich zur Kontinuitätsgleichung und Momentengleichung die Energiegleichung herangezogen. Unter Vernachlässigung von Reibungsarbeit, Kompressionsarbeit und Dissipation (durch innere Reibung entstehende Wärme) gilt für inkompressible Flüssigkeiten die Gleichung 19 (OERTEL 2002).

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t}}_{\text{konvektive Wärme}} + \underbrace{\Delta \cdot (\rho v c_p T)}_{\text{Wärmeleitung}} - \underbrace{\Delta \cdot (k \Delta T)}_{\text{Wärmeleitung}} = Q_v \quad \text{Gl. 19}$$

ρ :	Dichte	v :	Geschwindigkeit
c_p :	Wärmekapazität	Q_v :	Wärmemenge
k :	Wärmeleitfähigkeit	t :	Zeit
T :	Temperatur		

6.3.4 Navier-Stokes Differentialgleichungen

Die Differentialgleichungen von Navier-Stokes beschreiben das Verhalten von Strömungen in Flüssigkeiten und Gasgemischen und geben einen Einblick in das Verhalten eines Fluids. Durch die Größen Geschwindigkeit, Druck und Dichte wird die Strömung eines Fluids in einem Gebiet über die Zeit charakterisiert. In einer inkompressiblen, laminaren, viskosen (zähen) und instationären Strömung bleibt die Dichte konstant, d.h., dass die Strömung nur durch die Impulsgleichung und die Kontinuitätsgleichung beschrieben wird. Diese beiden Gleichungen ergeben ein System von nichtlinearen Gleichungen 2. Ordnung, die als Navier-Stokes-Gleichungen bezeichnet werden.

Nach BOHL (1998) sind die Navier-Stokes Differentialgleichungen bis heute nicht exakt lösbar, deshalb können sie in der Strömungsmechanik nur näherungsweise bestimmt werden (Gleichung 20).

$$\rho \left[\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_z v_x}{\partial z} \right] = \rho \cdot g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] v_x \quad \text{Gl. 20}$$

u_x, u_y, u_z :	Geschwindigkeitskomponenten in x-, y- und z-Richtung	g_x :	äußere Kräfte, z.B. Schwerkraft
ρ :	Dichte	μ :	effektive Viskosität

6.3.5 Fluidgemischtransporte

Bei Fluidgemischtransporten breiten sich die Fluidkomponenten mit unterschiedlichen Materialeigenschaften, die untereinander nicht chemisch reagieren, aus. Das Massegleichgewicht jeder Komponente ist dabei die eigentliche Komponententransportgleichung, die die Kontinuitätsgleichung mit einem Diffusionsterm zur gegenseitigen Durchmischung enthält.

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_i V) + \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_i) = 0 \quad \text{Gl. 21}$$

Y_i :	Massenanteil der i-ten Komponente	V :	Geschwindigkeitsvektor
D :	Massendiffusionskoeffizient	ρ :	Dichte der Gesamtströmung

6.3.6 Materialgesetze

Die Eingabe von Dichte und Viskosität sind als Fluideigenschaften bei jeder Strömungsanalyse erforderlich. Bei der Berücksichtigung von Temperaturänderungen muss auch die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärme eingegeben werden. In ANSYS/FLOTTRAN stehen für die Fluideigenschaften verschiedene Materialgesetze zur Verfügung. Man kann zwischen den Fluidtypen konstant (mit konstanten Eigenschaften), flüssig, gasförmig, Fluidgemische und vom Anwender definierte Eigenschaftstabellen wählen (ANSYS Inc. 2001).

6.3.7 Lösungsalgorithmen und Solver

Für jeden Freiheitsgrad werden die zu lösenden Gleichungen einzeln gelöst. Die Momentum-Energie-, Speciestransport- und die Turbulenzgleichung haben alle die Form der skalaren (ungerichteten) Transportgleichung mit jeweils vier verschiedenen Termtypen, den Advektionsterm, den transienten Term, den Diffusionsterm und den Quellterm. Der Advektionsterm spielt dabei eine signifikante Rolle, da er über die anderen Terme dominiert und somit zu numerischen Instabilitäten führen kann (Kapitel 6.3.9). In nachfolgender Tabelle 7 sind die Terme mit ihren Algorithmen aufgeführt.

Tabelle 7 Lösungsalgorithmen für die Terme der Transportgleichung

Term der Transportgleichung	Algorithmus
Advektionsterm	<p>MSU Monotone Streamline Upwind Methode (Druckgleichung)</p> <p><i>SUPG</i> Streamline Upwind / Petrov-Galerkin Methode (für Momentum-, Turbulenz-, Energie- und Speciestransportgleichung)</p> <p>die SUPG-Annäherung besteht aus der Galerkindiskretisierung des Advektionsterm und einen zusätzlichen diffusionsähnlichen Unruhe-term, welcher nur in Advektionsrichtung wirkt.</p>
Transienter Term	<p>Newmark Differenzen Methode</p> <p>Backward Differenzen Methode</p>
Diffusionsterm	Wichtungsfunktion
Quellenterm	Wichtungsfunktion

Für die zu berechnenden Größen Geschwindigkeiten, Drücke, Temperaturen und Energien kann jeweils einzeln der gewünschte Solver angegeben werden. FLOTRAN unterscheidet drei Arten von Solvern (Löser):

- der Näherungslöser (Iterationen werden vom Benutzer festgelegt),
- die Semi-Direkten Löser (sie iterieren bis zu einem festgelegten Konvergenzkriterium der Freiheitsgrade),
- direkte Löser.

Tabelle 8 Solver mit ihrer bevorzugten Anwendung erläutert

Solver		Anwendung
<u>Näherungslöser:</u>		
TDMA	Tri Diagonal Matrix Algorithm	ausreichend für Geschwindigkeits- und Turbulenzgleichungen arbeitet sehr stabil
<u>Semi-Direkte Löser auch „exakte“ Löser:</u>		
PCG	Preconditioned Conjugate Gradient Method	zu empfehlen für Druckgleichungen, da dadurch Massenbilanz gesichert
PCCR	Preconditioned Conjugate Residual Method	für inkompressible Druckgleichungen
PGMR	Preconditioned Generalized Minimum Residual Method	ungeeignet für Geschwindigkeiten gut bei Energiegleichungen
<u>Direkte Löser:</u>		
	Boeing Sparce Direct Method	total ungeeignet für Geschwindigkeitsberechnungen, extrem hoher Speicherbedarf

6.3.8 Diskretisierung

Ein Finites-Element-Netz erhält man durch Zerlegung des geometrischen Modells in einzelne Elemente. Die Eckpunkte dieser Elemente werden als Knoten bezeichnet. Die Elemente sind die Teilgebiete für die jeweils die Differentialfunktion gelöst wird. Jedem Element müssen folgende Eigenschaften zugewiesen werden

- Elementtyp
- Materialeigenschaften
- Elementkoordinatensystem

Die Genauigkeit der Ergebnisse sowie die Berechnungszeit sind hauptsächlich von der Anzahl der Knoten des Netzes abhängig. Ein feineres Netz mit einer höheren Knotenanzahl liefert ein genaueres Ergebnis als ein gröberes Netz.

Regionen im Modell, die von besonderem Interesse für die Strömungsauswertung sind, sollten entsprechend der gewollten Genauigkeit feiner vernetzt werden. Ein Mindestmaß an Netzfeinheit sollte nach bestimmten mathematischen Kriterien (Kapitel 6.3.9) eingehalten werden.

Allerdings ist zu beachten, dass bei extrem hoher Netzdichte die Summe der Fehler aus Diskretisierung und Numerik wieder ansteigt. Des Weiteren bestimmt die Elementgröße die Größe des Zeitschrittes.

6.3.9 Gütekriterien für Diskretisierungsverfahren (Stabilität und Konsistenz diskreter Näherungsverfahren)

Die zeitliche und örtliche Diskretisierung bestimmt wesentlich die Stabilitäts- und Konsistenzigenschaften. Je feiner die Auflösung der diskreten Approximation ist, desto besser stimmen die exakte Lösung der Ausgangsgleichung und die Näherungsfunktion der diskretisierten Gleichung überein (LEGE 1996).

Bei der zeitlichen Diskretisierung sind in der Simulation der Tracerausbreitung das Courant- und das Neumann-Kriterium zu beachten. Die Courant-Zahl spielt eine Schlüsselrolle in der numerischen Dispersion. Dabei ist die Advektion eine Quelle der Instabilität für die Berechnung. Der advective Term bei expliziten Verfahren wird dann instabil, wenn sich ein Strömungspartikel in einem Zeitschritt über ein Element hinaus bewegt (DVWK SCHRIFTEN 127 1999). Das Courant-Kriterium soll gewährleisten, dass während eines Zeitschrittes die Konzentrations- oder Temperaturdifferenz in einem finiten Element nicht größer werden kann als die durch advective Stoff- oder Wärmeströme hervorgerufene Konzentrations- oder Temperaturänderung (LEGE 1996).

Courant-Kriterium (Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl oder auch CFL-Zahl)

$$Cr = \left| v \cdot \frac{\Delta t}{\Delta l} \right| \leq 1 \quad \text{Gl. 22}$$

v : Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Δt : Zeitschritt [s]

Δl : charakteristische Elementlänge [m]

Die Beachtung des Neumann-Kriteriums (Fo) soll verhindern, dass Konzentrations- oder Temperaturgradienten in einem finiten Element während eines Zeitschrittes durch diffusive oder dispersive Stoff- oder Wärmeströme umgekehrt werden.

Neumann-Kriterium

$$Fo = \frac{D}{\Delta l^2} \cdot \Delta t \leq 0,5 \quad \text{Gl. 23}$$

D: molekularer Diffusionskoeffizient [m²/s]

Δt: Zeitschritt [s]

Δl: charakteristische Elementlänge [m]

Ein weiteres Problem bei der numerischen Lösung der Transportgleichung stellt die numerische Diffusion dar. Beim Fortschreiten einer Konzentrationsfront während eines Zeitschrittes erreicht diese noch nicht den nächsten Knoten. Da dieser Knoten mit in das Rechenverfahren einbezogen wird, wird er mit einer mehr oder weniger geringeren Konzentration behaftet sein. Je höher die Konsistenzordnung des numerischen Verfahrens ist, desto geringer ist die numerische Diffusion.

Als weiteres Kriterium sollten die Quellen und Senken einbezogen werden. Während eines Zeitschrittes soll nicht mehr Substanz oder Wärme das finite Element verlassen soll als ursprünglich enthalten war (LEGE 1996).

Praktische Messergebnisse sind zum Zwecke der Verifikation unerlässlich. Das Modell kann erst dann genutzt werden, wenn eine gute Übereinstimmung mit der Realität besteht.

6.3.10 Iterationen und Randbedingungen

Vor dem Lösen der Gleichungen müssen Randbedingungen verschiedener Ordnung gesetzt werden. Bei Strömungsanalysen müssen Haftbedingungen für die Außenwände mit einer Geschwindigkeit von 0 m/s angegeben werden. Es sind Einlassgeschwindigkeiten und ein Druck von 0 bar am Auslass notwendig. Die Randbedingungen können als Lasten (loads) an Linien, Flächen und Knoten der Elemente aufgebracht werden.

In der nachfolgenden Lösungsphase werden die gewünschten Lastschritte, Zwischenschritte und Gleichgewichtsiterationen angegeben. Ein Lastschritt (load step) ist eine Lastkonfiguration, für die eine Lösung berechnet wird. In der transienten Analyse können mehrere load steps vorgenommen werden, um in einer gegebenen Zeitspanne nacheinander Lasten aufzubringen und anschließend zu simulieren. Die Zwischenschritte, auch substeps genannt, sind Zeitpunkte innerhalb eines Lastschrittes, für die Lösungen berechnet werden. Die Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinander folgenden Zwischenschritten wird als Zeitschritt (time step) oder als Zeitinkrement (time increment) bezeichnet. Für jeden dieser Zeitschritte werden eine bestimmte Anzahl von Gleichgewichtsiterationen (equilibrium iterations) gesetzt. Hierbei handelt es sich um iterative Korrekturen um gute Konvergenzen zu erhalten.

7 Modellbildung und Randbedingungen der Simulation

7.1 Modellbildung und Diskretisierung

Als Grundlage für den Aufbau des Modells dienten Grundrisskarten des Markscheiders DIETZE von 1893, die sich im Sächsischen Bergarchiv von Freiberg befinden. Da am Anfang des 20. Jh. die beiden unteren Tiefbausohlen geflutet wurden, beruhen alle später angefertigten Karten der 3. und 4. Sohle auf den Risskarten von 1893. Von der Markscheiderei des Oberbergamt Sachsen in Freiberg wurde das Hauptblatt und Karten der 3. und 4. Sohle in einem Maßstab 1:500 mit genauer Nordausrichtung angefertigt und später auf Mikrofilm übertragen (MF 8177, MF 8181, MF 8183). Es wurde mit der Tauchschule Sachsenluft (Erwin Biefang) die Größe und Höhe der Hohlräume und Strecken besprochen und nach ihren Angaben verändert. Nach dessen Kenntnisstand weisen die Gänge einen Querschnitt von 2 x 1,5 m auf. Die Abbauräume der 3. und 4. Sohle verfügen über eine durchschnittliche Höhe von 3,5 m. Weiterhin ist der Abbauhohlraum der 3. Sohle über einen Schrägschacht bzw. Rampe oder Rutsche mit der 4. Sohle verbunden. Die zugrunde liegende Karte für den Aufbau des Modells ist in Anhang 1 ersichtlich. Anhand der Mikrofilme und den Angaben der Taucher wurde das Modell zur Simulation der Strömungsverhältnisse für die Felsendome Rabenstein entwickelt.

Für die Modellierung in ANSYS/FLOTRAN dient ein dreidimensionales geometrisches Modell mit kartesischen Koordinaten die Grundlage. Der Koordinatenursprung befindet sich auf der 3. Sohle im Maschinenschacht. Die Abbauhohlräume und Gänge befinden sich in südwestlicher Richtung und wurden mit den dazugehörigen x- und y-Koordinaten festgelegt. Die Teufe wurde mit der z-Koordinate bestimmt. Um das Modell zu bilden, wurden auf der Arbeitskarte Punkte „keypoints“ festgelegt, über die die Konstruktion der Gänge und Hohlräume erfolgte. Aus den Punkten wurden Flächen und aus den Flächen Volumen erzeugt. Anschließend wurden die Volumen mit dem Befehl „glue“ verbunden. Es wurde versucht das Bergwerk weitestgehend naturgetreu nachzubilden. Die Abbildung 30 zeigt das geometrische Modell der 3. und 4. Sohle der Felsendome Rabenstein. In roter Farbe ist der Maschinenschacht dargestellt, in blauer Farbe die 3. Sohle und in violett-farben die 4. Sohle.

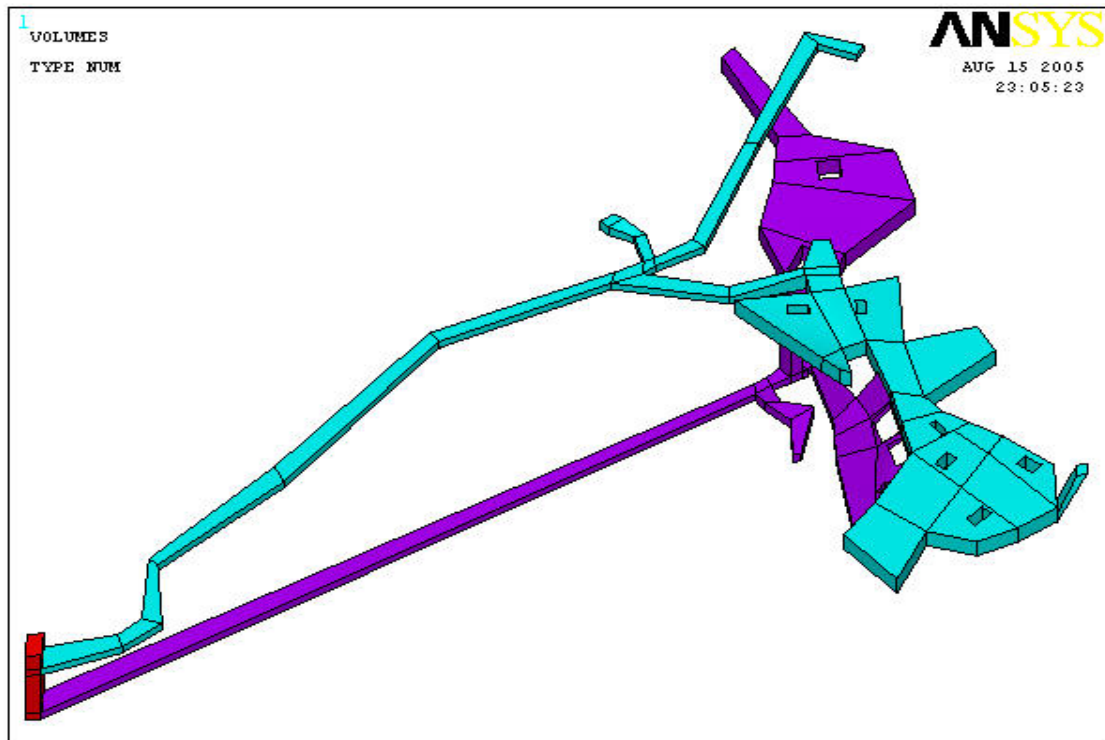


Abbildung 30: Darstellung der 3. Sohle (blau), der 4. Sohle (violettfarben) und des Maschinenschachtes (rot)

Nach der Modellbildung erfolgte die Diskretisierung. Aufgrund der unregelmäßigen Geometrien durch Pfeiler in den Abbauhohlräumen wurde eine Tetraedervernetzung angewandt. Die Abbauräume weisen eine Elementlänge von 1 m auf. In Bereichen höherer Fließgeschwindigkeiten (Strecken der Abbauhohlräume zum Maschinenschacht und an Übergänge von einem Abbauraum in eine Strecke) wurden die Elemente mit 0,5 m feiner diskretisiert. Aufgrund der Bedeutung des Maschinenschachtes für die Auswertung, wurde auch hier auf eine feinere Diskretisierung von 0,5 m geachtet. Eine noch feinere Vernetzung war nicht möglich, da dies die Zahl der Knoten und Elemente weiter erhöht und damit auch beträchtlich die Rechenzeit verlängern würde.

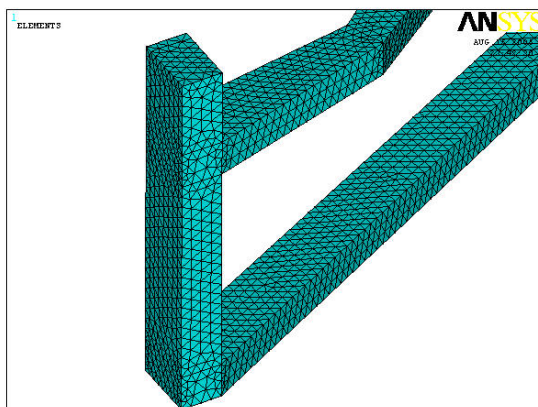


Abbildung 31: Diskretisierung des Maschinenschachtes

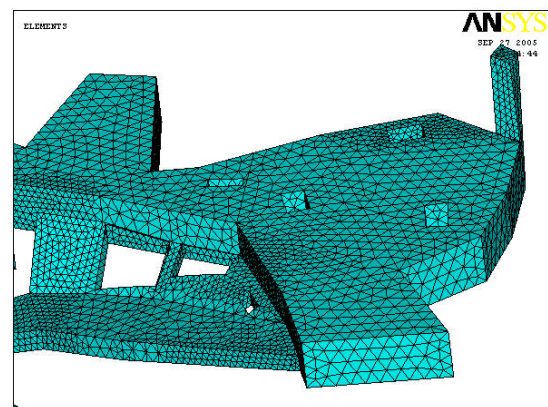


Abbildung 32: Diskretisierung des Abbauhohlräume der 3. Sohle

Am Ende der Diskretisierung weist das Modell 64 Volumen 156228 Elemente und 37440 Knoten auf. In Abbildung 31 und Abbildung 32 sind jeweils Teile des Modells, zum einem der Maschinenschacht und zum anderem der Abbauholraum der 3. Sohle, mit den Elementen und Knoten dargestellt.

7.2 Hydrodynamische Verhältnisse und abgeleitete Randbedingungen

7.2.1 Einlassgeschwindigkeiten

Der Wasserzufluss in die beiden Tiefbausohlen erfolgt nicht direkt, sondern über Tropfwasser durch Klüfte und Störungsflächen. Es wird angenommen, dass der größte Teil des Wassers durch die Firste der 3. Sohle in die Hohlräume eindringt und nur ein geringer Teil durch Klüfte in die 4. Sohle. Im Modell wird ein Wasserzufluss von 80 % in die 3. Sohle und nur 20 % in die 4. Sohle angenommen. Der Wasserzutritt ist eine Einlassrandbedingung und wird über insgesamt 9 ausgewählte Flächen an den Firsten der Sohlen definiert. Die ausgewählten Flächen befinden sich nicht in der Nähe des Maschinenschachtes, da dieser zur Auswertung genutzt werden soll. Die Wasserströmung im Bergwerk wurde mit zwei verschiedenen Einlassgeschwindigkeiten berechnet. Zum einem dienten die Abflussdaten aus Kapitel 4.1 (Set 1) der Felsendome Rabenstein als Grundlage für die Strömungsberechnung. Die Durchflussmengen im Wasserstollen spiegeln die Abflussmengen des gesamten Bergwerks wider. Für die Berechnung wird angenommen, dass die Wasserströme aus dem Marmorsaal, Seitenstollen und Maschinenschacht sich zu annähernd gleichen Teilen im Wasserstollen vereinen. Dies würde einer Durchflussmenge von durchschnittlich 4 bis 5 L/min entsprechen. Die Menge des Wasserzutritts entspricht dabei der Menge am Abfluss. Es wurden geringe konstante Einlassgeschwindigkeiten von $2 \cdot 10^{-7}$ m/s an der Firste der 3. Sohle und $6,5 \cdot 10^{-8}$ m/s an der Firste der 4. Sohle angenommen. Zum anderen dienten die Ergebnisse des Tracerversuches (Set 2) als Berechnungsgrundlage. Hierbei wurden die ermittelten Fließgeschwindigkeiten auf die ausgewählten Flächen bezogen. Diese Werte sind deutlich kleiner als die von Set 1.

Tabelle 9 Einlassgeschwindigkeiten für die 3. und 4. Sohle

Sohle	Flächen- größe	Einlassgeschwindigkeit Set 1 (Werte aus Abflussdaten)	Einlassgeschwindigkeit Set 2 (Werte aus Tracerversuch)
3. Sohle	300 m ²	$2 \cdot 10^{-7}$ m/s	$1 \cdot 10^{-7}$ m/s
4. Sohle	204 m ²	$6,5 \cdot 10^{-8}$ m/s	$4,2 \cdot 10^{-8}$ m/s

7.2.2 Strömungsregime

Nach BOHL (1998) wird das Strömungsregime durch temperaturabhängige Fluideigenschaften, die Geometrie des Strömungsraumes und die vorherrschenden Fließgeschwindigkeiten beeinflusst. Für die Felsendome Rabenstein wurde die Temperatur des Grubenwassers im Maschinenschacht gemessen. Die notwendigen Stoffdaten wurden anhand der Temperaturdaten aus der Literatur entnommen (VDI 2002). In nachfolgender Tabelle 10 sind die anzuwendenden Fluideigenschaften des Grubenwassers zusammengefasst.

Tabelle 10 Fluideigenschaften des Grubenwassers der Felsendome Rabenstein

Parameter	Größe
Temperatur	7,55 bis 8,0 °C
Dichte	999,85 kg/m ³
Thermische Leitfähigkeit (λ)	$587 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
Dynamische Viskosität (η)	$1375 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$
Kinematische Viskosität (ν)	$1,375 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Da die Dichte- und Volumenänderungen infolge von Druck und Temperaturänderungen gering sind, wird nach BOHL (1998) und OERTEL (2002) das Wasser als Flüssigkeit allgemein als inkompressibles Fluid angegeben. Im Grubenwasser des Maschinenschachtes liegen geringe Temperaturunterschiede von 0,35 K vor (aus Voruntersuchungen aus Kapitel 4.2.1).

Ein weiterer wichtiger Punkt für das Strömungsregime ist die Berechnung der Reynoldszahl. Sie ist ein Maß dafür, ob eine Strömung laminar oder turbulent erfolgt. Ihre Berechnung erfolgt nach Gleichung 24 (OERTEL 2002).

$$\text{Re} = \frac{|v| d \rho}{\eta} = \frac{|v| d}{\nu} \quad \text{Gl. 24}$$

Re: Reynoldszahl
 ρ : Dichte des Wassers [kg/m³]
 v : mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
 η : dynamische Viskosität [kg/(m · s)]
 d : Durchmesser eines kreisrunden Rohres [m]
 ν : kinematische Viskosität [m²/s]

Die Strecken besitzen keinen kreisförmigen Querschnitt. Nach BOHL (1998) kann deshalb für nicht kreisförmige Strömungsquerschnitte statt d der hydraulische Durchmesser d_h (Gleichung 25) einer gedachten Ersatzrohrleitung mit kreisförmigem Querschnitt verwendet werden.

$$d_h = \frac{4 \cdot A}{U} \quad \text{Gl. 25}$$

d_h : hydraulischer Durchmesser [m]
 A : Querschnittsfläche des Rohres [m²]
 U : hydraulischer Umfang [m]

Die Reynoldszahl wurde im Maschinenschacht für die dominierende Abstandsgeschwindigkeit und die maximalen Abstandsgeschwindigkeiten berechnet. Zur Überprüfung der Ergebnisse nach der ersten Simulation der Strömungsgeschwindigkeit wurde die Reynoldszahl für die im Bergwerk maximal auftretende Strömungsgeschwindigkeit berechnet. Sie trat in der Strecke von dem Abbauhohlraum der 3. Sohle zum Maschinenschacht bzw. in der Strecke vom Abbauhohlraum der 4. Sohle zum Maschinenschacht mit 6,6 m/d auf. In Tabelle 11 sind die ermittelten Reynoldszahlen mit den dazugehörigen Parametern aufgeführt. Laminare Strömung tritt unterhalb der kritischen Reynoldszahl von 2320 auf (BOHL 1998). Die errechneten Reynoldszahlen liegen alle unterhalb des kritischen Wertes von 2320. Aufgrund dieser Werte kann ein laminares Strömungsregime im gefluteten Teil des Bergwerks angenommen werden.

Tabelle 11 berechnete Reynoldszahl und notwendige Parameter zur Berechnung der Reynoldszahl

Ort	A [m ²]	U [m]	D _h [m]	V [m/s]	Re
Maschinenschacht	2*3,6 = 7	11,2	2,5	$v_{\text{dom}} = 1,97 \cdot 10^{-6}$ m/s	3,6
Maschinenschacht	2*3,6 = 7	11,2	2,5	$v_{\text{max}} = 7,6 \cdot 10^{-5}$ m/s	138
Strecke der 3. Sohle	1,5 * 2 = 3	7	1,7	$V_{\text{max}} = 3,71 \cdot 10^{-4}$	458

7.3 Weitere Randbedingungen

Für die Modellströmung im Bergwerk sind noch weitere Randbedingungen notwendig. So wurde die Strömung mit einer Erdbeschleunigung von 9,81 m/s² berechnet. Außerdem wurden als Haftbedingungen für die äußeren Wände des Bergwerks eine Geschwindigkeit von 0 m/s angegeben. Um das Wasser aus dem Maschinenschacht frei ausfließen zu lassen, ist die Vorgabe von einem Druck von 0 bar an der oberen Austrittsfläche des Maschinenschachtes notwendig.

Zur Überprüfung der Strömungsverhältnisse in der 4. Sohle wurden die dort angenommenen Einlassgeschwindigkeiten auf 0 gesetzt. Es zeigte sich, dass sich trotz eines nicht vorhandenen Einlasses in der gesamten 4. Sohle eine Strömung ausbildete. Das Wasser drang durch den Schacht und durch die Rampe vom Abbauhohlraum der 3. Sohle in die untere Stollensohle.

8 Strömungsmodellierung mit ANSYS/FLOTRAN

8.1 Vorgehensweise

Aus den berechneten Geschwindigkeiten des Tracerversuches und anschließender Berechnung der Reynoldszahl (Kapitel 7.2.2) kann von einer laminaren Strömung ausgegangen werden. Die Turbulenzmodelle werden für die Strömung nicht verwendet.

Die Kalibrierung erfolgte in Set 1 anhand der gemessenen Abflussdaten und anschließend in Set 2 durch die berechneten Geschwindigkeiten aus dem Tracertest. Dabei wurde nach der Strömungseinstellung ein Geschwindigkeitsprofil am Auslass des Maschinenschachtes erstellt und mit den Werten des Tracerversuches verglichen. Diese Kalibriermöglichkeit konnte nur für den Maschinenschacht vorgenommen werden, da über das restliche Bergwerk keine Messdaten bezüglich der Strömungsgeschwindigkeiten zur Verfügung standen. Zur weiteren Plausibilitätsprüfung wird eine Massenbilanz erstellt, welche am Ein- und Auslass übereinstimmen muss bzw. deren Abweichung 5 % nicht übersteigen darf. Bei Nichteinhaltung der Vorgabe werden die Randbedingungen erneut angepasst.

Die gewählten Zeitschritte bei der transienten Strömungsberechnung müssen das Courant- und das Neumann-Kriterium erfüllen. Für die Einstellung der Strömung wurden kleine Zeitschritte gewählt, weshalb die Einhaltung der Kriterien kein Problem darstellt.

8.2 Berechnung des Strömungsfeldes

8.2.1 Stationäre Berechnungen

8.2.1.1 Lösungsparameter und Kalibrierung

Bei der stationären Berechnung des Strömungsfeldes wurden für die Geschwindigkeiten der stabile und empfohlene Näherungslöser Tri Diagonal Matrix Algorithm (TDMA) verwendet. Für den Freiheitsgrad Druck kam der semi-direkte Löser Preconditioned Conjugate Residual Method (PCCR) zur Anwendung.

Die Kalibrierung ist erst dann sinnvoll, wenn die Massenbilanz ausgeglichen ist. Für die stationäre Berechnung unterschritt die Massenbilanz erst nach rund 4500 Iterationen die geforderte Abweichung von 5%. In nachfolgender Abbildung 33 ist die Massenbilanz für die stationäre Berechnung dargestellt.

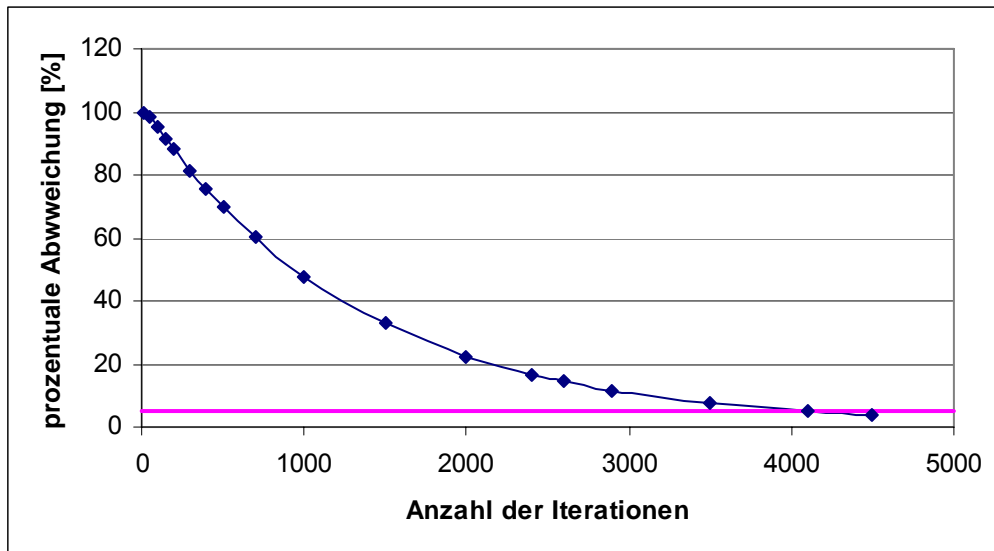


Abbildung 33: Massenbilanz der stationären Berechnung

Nachdem die Massenbilanz ausgeglichen wurde, kann die eigentliche Kalibrierung starten. Dafür wurde am Ende des Maschinenschachtes ein Geschwindigkeitsprofil konstruiert und mit den zu erwarteten Geschwindigkeiten aus dem Tracerversuch verglichen. Bei Set 1, mit den ermittelten Einlassgeschwindigkeiten aus den Abflussdaten, ergab sich im Maschinenschacht eine mittlere Geschwindigkeit von 1 m/d und eine maximale Geschwindigkeit von 1,9 m/d.

Eine deutlich niedrigere Strömungsgeschwindigkeit im Maschinenschacht erhielt man durch die Kalibrierung mit den Werten aus dem Tracerversuch (Set 2). Dabei ergab sich eine maximale Geschwindigkeit von 0,8 m/d und eine mittlere Geschwindigkeit von 0,4 m/d.

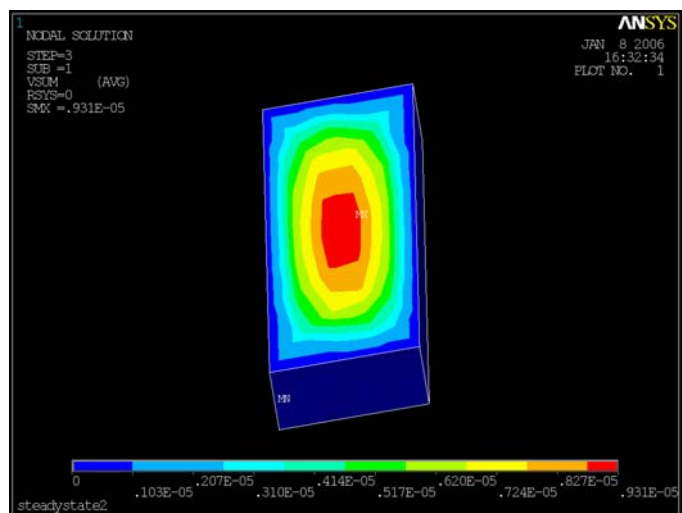


Abbildung 34: Geschwindigkeitsverteilung am Ausgang Maschinenschacht mit Einlassgeschwindigkeiten aus Set 2

In Abbildung 35 sind die Geschwindigkeiten aus Set 1 und Set 2 über den Querschnitt am Ausgang des Maschinenschachtes dargestellt

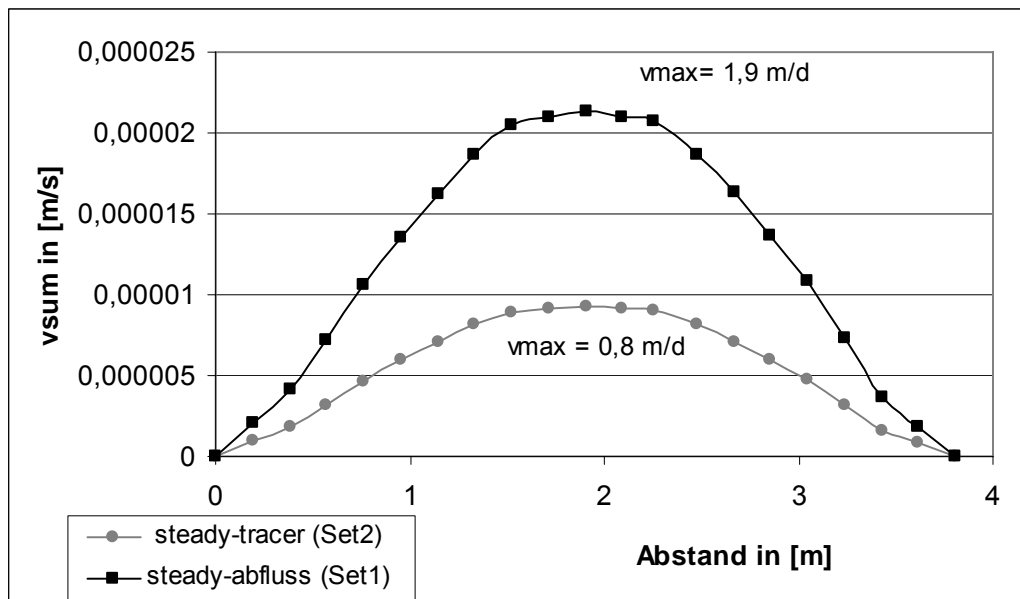


Abbildung 35: Geschwindigkeiten für die Kalibrierung für Set 1 und Set2

In Tabelle 12 sind die durch die Kalibrierung ermittelten Werte aufgeführt und mit den zu erwartenden Werten aus dem Tracerversuch gegenübergestellt. Die zu erwartenden Fließgeschwindigkeiten aus dem Tracertest erfüllt annähernd die Berechnung aus Set 2.

Tabelle 12: Kalibrierungsgeschwindigkeiten für Set 1 und Set 2 und Gegenüberstellung mit Geschwindigkeiten aus dem Tracertest für stationäre Berechnung

	Berechnung mit Abflussdaten (Set 1)	Berechnung mit Tracerdaten (Set 2)	Tracertest
Massenfluss	0,14815	0,032395	
v_{sum} Ausgang Maschinenschacht	1 m/d	0,4 m/d	0,23 m/d
v_{sum} ganzes Modell	3,2 m/d	0,86 m/d	0,49 m/d

8.2.1.2 Ergebnisse

Set 1 Strömungsplot anhand der Werte aus den Abflussdaten

In Abbildung 36 ist der Strömungsplot der stationären Berechnung mit den Werten aus den Abflussdaten dargestellt. In den großen Abbauholräumen der 3. und 4. Sohle traten sehr kleine Fließgeschwindigkeiten in einer Größenordnung von 0,16 m/d bis 0,9 m/d auf. In den Strecken, die von den Abbauholräumen zum Maschinenschacht führen, wurden die höchsten Geschwindigkeiten mit bis zu 6,4 m/d verzeichnet. Im Maschinenschacht selber waren durchschnittliche Fließgeschwindigkeiten von 1 m/d anzutreffen.

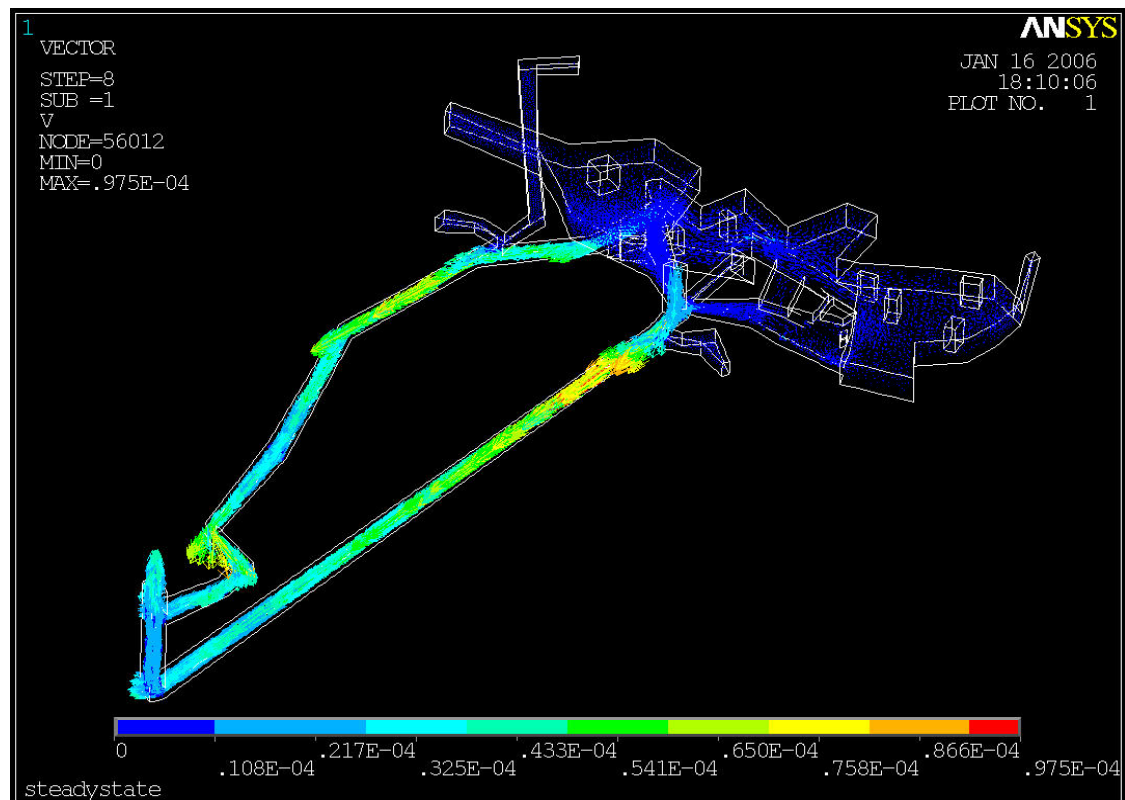


Abbildung 36: Strömungsbild der stationären Berechnung

Set 2 Strömungsplot anhand der Werte aus den Tracertest

Wie schon aus der Kalibrierung zu erwarten war, ergaben die simulierten Fließgeschwindigkeiten mit den Einlassgeschwindigkeiten aus den Werten vom Tracerversuch (Set 2) gegenüber Set 1 kleinere Werte.

Es sind auf dem ersten Blick keine großen Unterschiede im Strömungsbild erkennbar, sondern nur die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten nehmen eine unterschiedliche Größe an. Deshalb wurde darauf verzichtet für jede Berechnung das Strömungsbild abzubilden.

Auch hier traten in den großen Abbauhölräumen der 3. und 4. Sohle sehr kleine Fließgeschwindigkeiten in einer Größenordnung von 0,07 m/d bis 0,4 m/d auf. Im Maschinenschacht selber herrschten mittlere Fließgeschwindigkeiten von 0,4 m/d vor. Die höchsten Geschwindigkeiten bis zu 1,8 m/d traten in den Strecken von den Abbauhöhlräumen zum Maschinenschacht auf.

8.2.2 Transiente Berechnungen

8.2.2.1 Lösungsparameter und Kalibrierung

Wie bei den vorangegangenen Berechnungen wurde auch bei der transienten Strömungsberechnung der TDMA Solver für die Geschwindigkeitsfreiheitsgrade und der PCCR Solver für den Druck verwendet.

Die Konvergenz des transienten Strömungsfeldes erfolgte in kleinen Zeitschritten von 200 s mit jeweils 50 cumulativen Iterationen pro Zeitschritt. Bei dieser kleinen Zeitschrittwahl stellte die Einhaltung des Courant- und Neumann-Kriteriums kein Problem dar. Wie bei der stationären Berechnung wurden so viele Zeitschritte gewählt, bis die Massenbilanz keine größere Abweichung als 5 % aufwies (Abbildung 37).

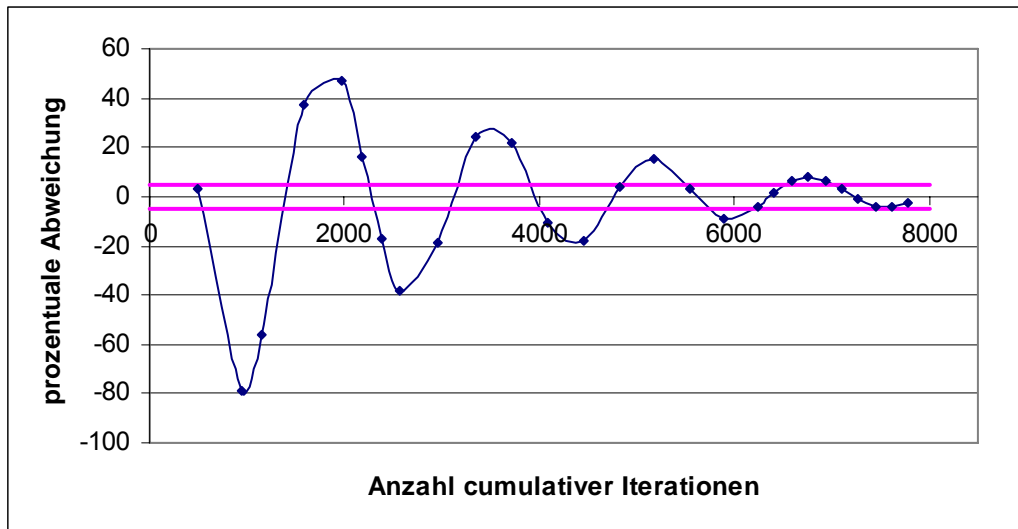


Abbildung 37: Massenbilanz für die transiente Berechnung

Analog zu der stationären Berechnung wurde nach dem Ausgleich der Massenbilanz ein Geschwindigkeitsprofil am Ausgang des Maschinenschachtes erstellt (Abbildung 37).

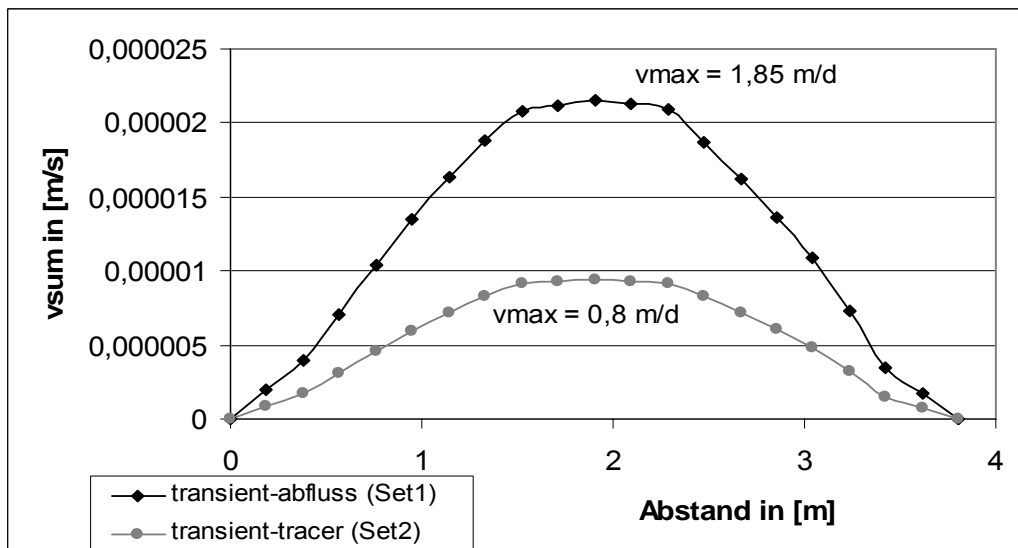


Abbildung 38: Geschwindigkeiten für die Kalibrierung für Set 1 und Set 2

Mit den Werten aus den Abflussdaten (Set 1) ergab sich eine mittlere Geschwindigkeit von 0,9 m/d und eine maximale Geschwindigkeit von 1,85 m/d. Wie schon bei der stationären Berechnung lagen auch hier die Geschwindigkeiten für Set 2 (Werten aus dem Tracerversuch) niedriger. So betrug die maximale Geschwindigkeit 0,8 m/d und die

mittlere Geschwindigkeit rund 0,4 m/d. Die Geschwindigkeiten über den Querschnitt am Ausgang des Maschinenschachtes aus den Berechnungen Set 1 und Set 2 sind in Abbildung 38 dargestellt.

Die ermittelten Fließgeschwindigkeiten wurden in der Tabelle 13 den zu erwartenden Werten aus dem Tracerversuch gegenübergestellt. Die Geschwindigkeiten von Set 2 lagen wie bei der stationären Berechnung näher an den errechneten Geschwindigkeiten aus dem Tracertest.

Tabelle 13: Kalibrierungsgeschwindigkeiten für Set 1 und Set 2 und Gegenüberstellung mit Geschwindigkeiten aus dem Tracertest für die transiente Berechnung

	Berechnung mit Abflussdaten (Set 1)	Berechnung mit Tracerdaten (Set 2)	Tracertest
Massenfluss	0,14815	0,032395	
v_{sum} Ausgang Maschinenschacht	0,8 m/d	0,4 m/d	0,23 m/d
v_{sum} ganzes Modell	3,3 m/d	0,95 m/d	0,49 m/d

Dennoch weichen die Fließgeschwindigkeiten aus der Simulation von den errechneten Werten aus dem Tracertest ab. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde eine weitere Berechnung durchgeführt. In dieser Simulation wurde von der Annahme ausgegangen, dass sich mit der Auswahl (Anzahl) der Flächen für die Einlassgeschwindigkeiten die Fließgeschwindigkeiten in den Strömungsbereichen ändern. Hierfür wurde der Einlass über alle Flächen der Abbauhohlräume definiert. Die aus dieser Berechnung erhaltenen Ergebnisse entsprachen wichen nicht deutlich von den Werten aus Set 2 ab. Folglich hat die Anzahl bzw. Auswahl der Einlassflächen keinen offensichtlichen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeiten.

8.2.2.2 Ergebnisse

Der Strömungsverlauf der Ergebnisse aus der transienten Strömungsberechnung für die Berechnung mit den Einlassgeschwindigkeiten aus Set 1 als auch für Set 2 gegenüber der Abbildung 36 wiesen keine merklichen Unterschiede auf. Nur die jeweils berechneten Fließgeschwindigkeiten nehmen eine unterschiedliche Größe an. Deshalb wird auf die Abbildung der jeweiligen Strömungsbilder abgesehen.

Set 1 Strömungsplot anhand der Werte aus den Abflussdaten

Die transiente Berechnung mit den Einlassbedingungen aus Set 1 unterschied sich nicht merklich von der stationären Berechnung mit Set 1. Auch hier befanden sich die kleinsten Geschwindigkeiten in den großen Abbauhohlräumen der 3. und 4. Sohle mit Größenordnungen von 0,2 m/d bis 0,65 m/d. Im Maschinenschacht waren mittlere Geschwindigkeiten von 0,9 m/d vorzufinden. Die größten Fließgeschwindigkeiten von 6,6 m/d wurden in den Strecken zwischen den Abbauhohlräumen und Maschinenschacht erreicht.

Set 2 Strömungsplot anhand der Werte aus den Tracertest

Die höchsten auftretenden Fließgeschwindigkeiten kamen in den Strecken zwischen Abbauhohlräumen und Maschinenschacht mit 1,9 m/d vor, die Geringsten in den Abbauhohlräumen mit 0,09 m/d bis 0,6 m/d. Im Maschinenschacht herrschten mittlere Geschwindigkeiten von 0,4 m/d vor.

8.3 Auswertung der stationären und der transienten Strömungsberechnung

Aus dem Strömungsplots in Abbildung 36 ist ersichtlich, dass das gesamte Bergwerk von Wasser durchströmt wurde, d.h. dass keine Region von der Strömung abgeschnitten ist. In den großen Abbauhohlräumen herrschen mit 16 bis 90 cm/d für Set 1 und 7 bis 40 cm/d für Set 2 geringe Fließgeschwindigkeiten. Dies spiegelt auch die Aussage der Taucher wieder, die sagten, dass kaum eine Strömung des Wassers wahrzunehmen ist. An den Übergängen der Abbauhohlräume zu den Strecken mit kleinerem Querschnitt ist aus dem Strömungsplot ein Anstieg der Geschwindigkeiten erkennbar.

Die stationären und transienten Geschwindigkeitsplots wiesen im Strömungsbild nur geringe Abweichungen in den Fließgeschwindigkeiten auf. Die Abweichungen sind in der Tabelle 14 neben den Geschwindigkeiten aus den gesamten gefluteten Bergbau-sohlen (v_{\max} und v_a) und den Werten für einzelne wichtige Bereiche gegenübergestellt (Maschinenschacht ($v_{\max \text{ MS}}$ und $v_a \text{ MS}$), großer Abbauhohlraum der 3. Sohle unter der Grünen Grotte ($v_{\max \text{ GG}}$ und $v_a \text{ GG}$)). Zur näheren Betrachtung wurden auch der Nahbereich des Eingabepunktes des Tacers ($v_{\max \text{ GG-Eingabe}}$) und dem Abbauhohlraum der 4. Sohle ($v_{\max \text{ 4.So}}$ und $v_a \text{ 4.So}$) betrachtet. Diese Aufschlüsselung in einzelne kleine Teilbereiche zeigt, dass die Fließgeschwindigkeiten ($v_{\max \text{ GG-Eingabe}}$ und $v_{\max \text{ 4.So}}$ und $v_a \text{ 4.So}$) in der 3. Sohle zum Übergang in den Schrägschacht sehr klein sind.

Tabelle 14: berechnete Geschwindigkeiten der transienten und stationären Strömung

Geschwindigkeiten	Stationär Set 1	Stationär Set 2	Transient Set 1	Transient Set 2	Tracertest
v_{\max} [m/d]	6,4	1,81	6,6	1,90	0,58
v_a [m/d]	3,2	0,95	3,3	0,95	0,49
$v_{\max \text{ MS}}$ [m/d]	1,9	0,86	1,85	0,86	6,48
$v_a \text{ MS}$ [m/d]	1	0,40	0,9	0,43	0,23
$v_{\max \text{ GG}}$ [m/d]	0,9	0,44	0,65	0,59	
$v_a \text{ GG}$ [m/d]	0,5	0,22	0,6	0,29	
$v_{\max \text{ GG-Eingabe}}$ [m/d]	0,16	0,07	0,2	0,10	
$v_{\max \text{ 4.So.}}$ [m/d]	0,37	0,16	0,37	0,16	
$v_a \text{ 4.So.}$ [m/d]	0,18	0,08	0,18	0,08	

Die Berechnungsergebnisse von Set 2 korrelieren am ehesten mit den gemessenen Geschwindigkeiten des Tracertests. Die berechneten Fließgeschwindigkeiten in den Strecken der Abbauholräume zum Maschinenschacht entsprechen vermutlich nicht der Realität. Die modellierten transienten Werte weichen nicht wesentlich von den stationären ab und Set 2 (transient) dient als Grundlage für die Uraninsimulation.

9 Simulation der Uraninausbreitung

9.1 Vorgehensweise

Zur Simulation der Tracerausbreitung wurde eine Verdünnungsmischung (dilute mixture) angenommen, welche eine Beeinflussung des Strömungsverhaltens der vorhandenen Hauptströmung durch die Eigenschaften der Species ausschließt. Die zu lösende Transportgleichung für Uranin wird auf Basis der Fließgeschwindigkeiten und der Dichte des Wassers gelöst. Das Programm ANSYS/FLOTRAN verlangt für die Multiple Species Analyse mindestens zwei zu definierende Species, wobei die erste Species das im Bergwerk strömende Wasser wiedergibt. Die zweite Species spiegelt den verwendeten Tracer Uranin wider. ANSYS/FLOTRAN verlangt die Ausweisung einer algebraischen Species. In den hier vorgenommenen Speciesberechnungen wurde das Wasser als die algebraische Species verwendet. Demzufolge wurde für das Uranin (zweite Species) die Transportgleichung gelöst und der Massenanteil des Wassers (erste Species) aus dem Anteil der zweiten Species berechnet. Der eingesetzte Massenanteil des Uranins im Maschinenschacht und in der Grünen Grotte betrug 0,01. Nach bereits gewonnener Erfahrung bei der Uraninsimulation mit ANSYS/FLOTRAN stellte UNGER (2002) fest, dass kleinere Massenanteile nicht in den Diagrammen erkennbar werden.

Wie beim experimentellen Tracerversuch wurde auch bei der numerischen Berechnung des Speciestransportes an zwei Stellen das Uranin aufgebracht. Zum einem im Maschinenschacht, in einer Teufe von rund 14 m und zum anderem im Schrägschacht der Grünen Grotte zu den Abbauholraum der 3. Sohle in einer Teufe von rund 4 m. Die Aufgabe erfolgte jeweils an einem einzelnen Knoten.

Wie bei den vorangegangenen Strömungsmodellierungen wurde für den Freiheitsgrad Druck der PCCR Solver verwendet. Die Geschwindigkeitsgleichungen wurden mit dem TDMA Solver gelöst, da dieser sehr stabil, empfohlen und am besten geeignet ist. ANSYS schlägt für die Lösung der Speciestransportgleichung ebenfalls den TDMA Solver vor.

Notwendige Parameter zur Simulation der Ausbreitung des Tracers sind die Dichte und der Diffusionskoeffizient. Der Diffusionskoeffizient für das Uranin wurde aus WITTHÜSER (2000) entnommen und der Diffusionskoeffizient für Wasser wurde nach der Gleichung 26 von WILKE und CHANG (1955) in nach CHOY und REIBLE (2000) berechnet. Alle notwendigen Parameter für die Tracerausbreitung sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

$$D = \frac{1,173 \cdot 10^{-16} \cdot T \cdot \sqrt{\Phi \cdot M}}{\mu \cdot V_m^{0,6}} \quad \text{Gl. 26}$$

D:	molekularer Diffusionskoeffizient [m^2/s]	μ :	Viskosität des Lösungsmittels [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
T:	Temperatur [K]	V_m :	molares Volumen des Lösungsmittels am Siedepunkt [m^3/kmol] (nach GAMBIL (1958) in nach CHOY und REIBLE (2000) = 0,0189 m^3/kmol)
Φ :	Verbindungsfaktor für das Lösungsmittel (nach CHOY und REIBLE (2000) = 2,26)		
M:	Molekulargewicht [g/mol]		

Tabelle 15: Parameter für die Tracersimulation

Parameter	Wasser	Uranin
Molmasse [g/mol]	18,1	376,28
Diffusionskoeffizient [m^2/s]	$1,65 \cdot 10^{-9}$	$4,51 \cdot 10^{-10}$
Dichte [kg/m^3]	999,85	1000,1 ... 1010

Bei der transienten Berechnung der Uraninausbreitung mussten die in Kapitel 6.3.9 erläuterten Stabilitätskriterien befolgt werden. Das Courant- und das Neumann-Kriterium wurden für eine Elementlänge von 0,5 m und 1 m sowie für die maximale als auch die dominierende Strömungsgeschwindigkeit berechnet. Da die Einhaltung des Courant-Kriteriums schwieriger war als die Einhaltung des Neumann-Kriteriums, wurde zur Ermittlung der maximal möglichen Schrittweite die Courant-Zahl auf 1 gesetzt. Unter Annahme der maximal gemessenen Geschwindigkeiten dürfen die Zeitschritte bei Set 1 nicht größer als 2 h sein und bei Set 2 eine Zeitschrittgröße von höchstens 6 h aufweisen.

Tabelle 16: Berechnung der maximalen Zeitschritte in Bezug auf Courant- und Neumann-Kriterien

Geschwindigkeit	Δl in [m]	Δt [s]	Cr	Fo
<u>Ermittelte Geschwindigkeiten aus Abflussdaten (Set 1)</u>				
$v_{\max} = 7,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	0,5	6579 (1 h 50 min)	1	$1,2 \cdot 10^{-5}$
	1	13158 (3 h 40 min)	1	$5,9 \cdot 10^{-6}$
$v_{\text{dom}} = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	0,5	13158 (3 h 40 min)	1	$2,4 \cdot 10^{-5}$
	1	26316 (7 h 20 min)	1	$1,2 \cdot 10^{-5}$
<u>Ermittelte Geschwindigkeiten aus Tracerdaten (Set 2)</u>				
$v_{\max} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	0,5	22727 (6 h 19 min)	1	$4,1 \cdot 10^{-5}$
	1	45455 (12 h 38 min)	1	$2 \cdot 10^{-5}$
$v_{\text{dom}} = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	0,5	45455 (12 h 38 min)	1	$8,2 \cdot 10^{-5}$
	1	90909 (25 h 15 min)	1	$4,1 \cdot 10^{-5}$

Für ein optimales Ergebnis wurde zuerst ein transientes Strömungsfeld konvergiert ohne den Speciestransport zu aktivieren. Als Grundlage diente hierfür das transiente Strömungsmodell mit den Werten von Set 2. Folglich wurde der Ausbreitung des Urans in einer bereits vorhandenen Strömung modelliert.

Um eine einmalige Tracereingabe zu simulieren, wurde nach 5 substeps mit jeweils 4000 s die Lasten der Species ausgeschaltet.

9.2 Ergebnisse

Die Auswertung der Simulation der Uraninausbreitung erfolgte anhand mehrerer ausgewählter Volumen. Das wichtigste Volumen für die Ergebnisanalyse ist der obere Bereich des Maschinenschachtes. Zur Unterscheidung, aus welcher Sohle der größte Teil des Uranins in den Maschinenschacht strömt, wurden die zum Maschinenschacht angrenzenden Volumen der Strecke der 3. und der 4. Sohle zur Auswertung hinzugezogen. Damit konnten für die ausgewählten Volumen Tracerdurchgangskurven erstellt werden. Während der Simulation wurde festgestellt, dass im großen Abbauholraum der 3. Sohle eine Restkonzentration des Uranins verblieb.

Anhand der Tracereingabe im Maschinenschacht konnte die Kalibrierung überprüft werden.

9.2.1 Berechnungen mit Werten aus Set 2 (Tracerdaten)

Für die Tracerausbreitung im Bergwerk wurden mehrere Simulationsrechnungen gestartet. Bei der 1. Simulation mit Eingabe im Schrägschacht von der Grünen Grotte zum Abbauholraum der 3. Sohle konnte keine Ausbreitung des Uranins verzeichnet werden. Die ausgebildeten Fließgeschwindigkeiten im Schrägschacht des Modells waren mit 1 cm/d zu gering, so dass der Tracer nach 300 Tagen den Schrägschacht noch nicht verlassen hat. Diese Rechnung wurde abgebrochen.

Da aus der Erfahrung der 1. Rechnung sich das Uranin aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten nicht ausbreiten konnte, wurde der Eingabeknoten vom Schrägschacht in den Abbauholraum der 3. Sohle, in rund 1 m Entfernung zum Eingang des Schrägschachts, verlagert. Das Uranin erreichte erst nach 400 Tagen den Ausgang des großen Abbauhohlraumes der 3. Sohle. Daraufhin wurde auch diese Berechnung der Tracerausbreitung für das gesamte Bergwerk abgebrochen.

Wie im praktisch durchgeführten Tracerversuch wurde das Uranin in 14 m Teufe im Maschinenschacht als zweite Eingabestelle aufgegeben.

In Abbildung 39 ist die Ausbreitung des Tracers in der Mitte des Maschinenschachtes dargestellt. Das Uranin hebt sich mit den rötlichen Farben vom umliegenden grün erscheinenden Wasser ab. Zuströmende Wässer aus den Strecken drückten den Tracer an die gegenüberliegende Seite der Außenwand.

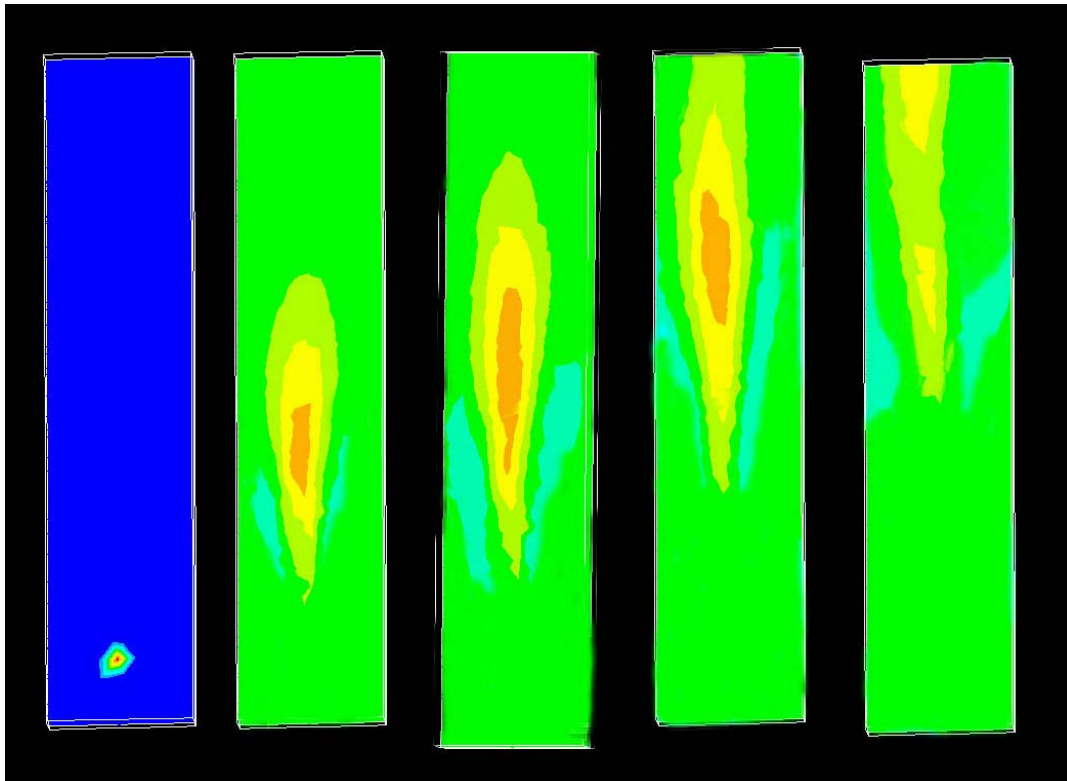


Abbildung 39: Verlauf der Tracerausbreitung im Maschinenschacht, nach 20 Stunden, nach 20 Tagen, nach 24 Tagen, nach 28 Tagen und nach 55 Tagen

Die Auswertung der Tracereingabe im Maschinenschacht erfolgte anhand der maximalen Uraninkonzentration am Ausgangsvolumen des Maschinenschachtes. Anhand dieser Daten wurde eine Tracerdurchgangskurve erstellt, an der die charakteristischen Abstandsgeschwindigkeiten abgelesen werden konnten.

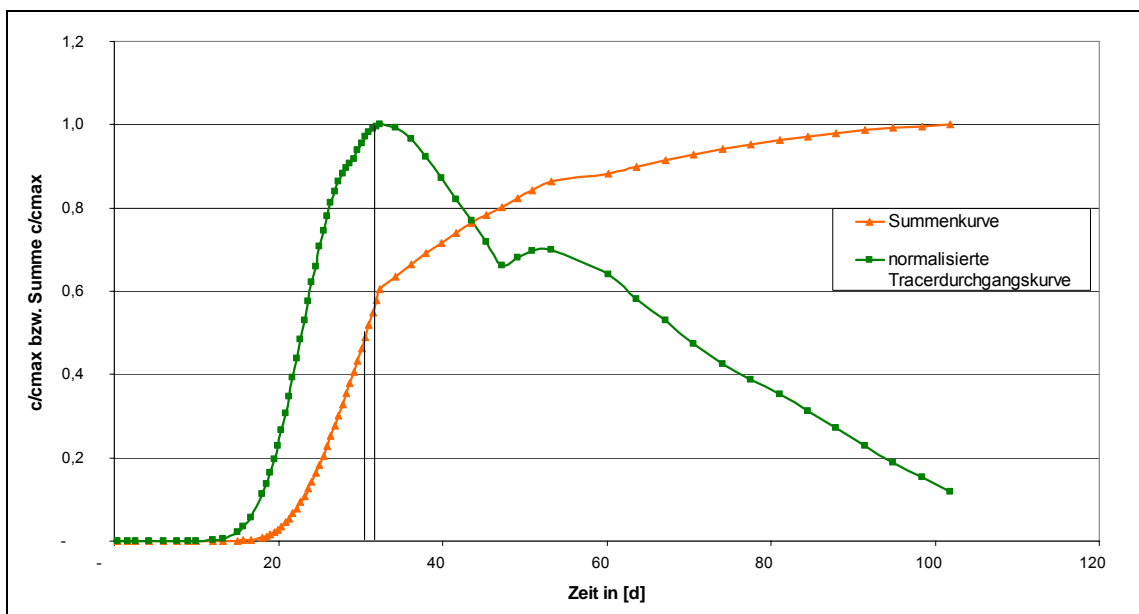


Abbildung 40: Summenkurve und normalisierte Tracerdurchgangskurve für Eingabeknoten Maschinenschacht für Set 2

Das Uranin erreichte nach 15 Tagen schneller als im Tracertest den Ablauf des Maschinenschachtes. Daraus berechnet sich eine maximale Abstandsgeschwindigkeit von 0,93 m/d. Die höchste Konzentration Uranin (t_{dom}) wurde nach 32 Tagen und der Zeitpunkt, an dem 50 % des Tracers (v_{50}) eingetroffen sind, mit 31 Tagen festgelegt. Das ergibt eine dominierende Abstandsgeschwindigkeit von 0,44 m/d und eine mediane Abstandsgeschwindigkeit von 0,45 m/d.

9.2.2 Berechnung mit Werten aus Set 1

Die Simulierten Geschwindigkeiten aus Set 2 waren für die Tracerausbreitung im gesamten Bergwerk zu gering. Aus diesem Grunde wurden die Einlasswerte aus Set 1, die Strömungsberechnung anhand der Abflussdaten des Bergwerks, herangezogen. Der Tracereingabeknoten wurde für diese Berechnung beibehalten.

9.2.2.1 Ergebnisse der Tracereingabe im Maschinenschacht

Der Tracer breitete sich simultan wie die Berechnung mit den Einlassgeschwindigkeiten von Set 2 aus (Abbildung 39). In Abbildung 41 ist die Summenkurve und Tracerdurchgangskurve für den Eingabeknoten im Maschinenschacht dargestellt. Wie zu erwarten war, erreichte das Uranin nach 4 Tagen deutlich zeitiger das oberste Volumen des Maschinenschachtes. Die daraus berechnete maximale Abstandsgeschwindigkeit beträgt 3,5 m/d. Nach bereits 10 Tagen erreichte die dominierende Hauptkonzentration und nach 13 Tagen 50 % der angekommenen Tracermenge den Ausgang im Maschinenschacht. Die entsprechende dominierende Abstandsgeschwindigkeit beträgt 1,4 m/d und die mediane Abstandsgeschwindigkeit 1,1 m/d.

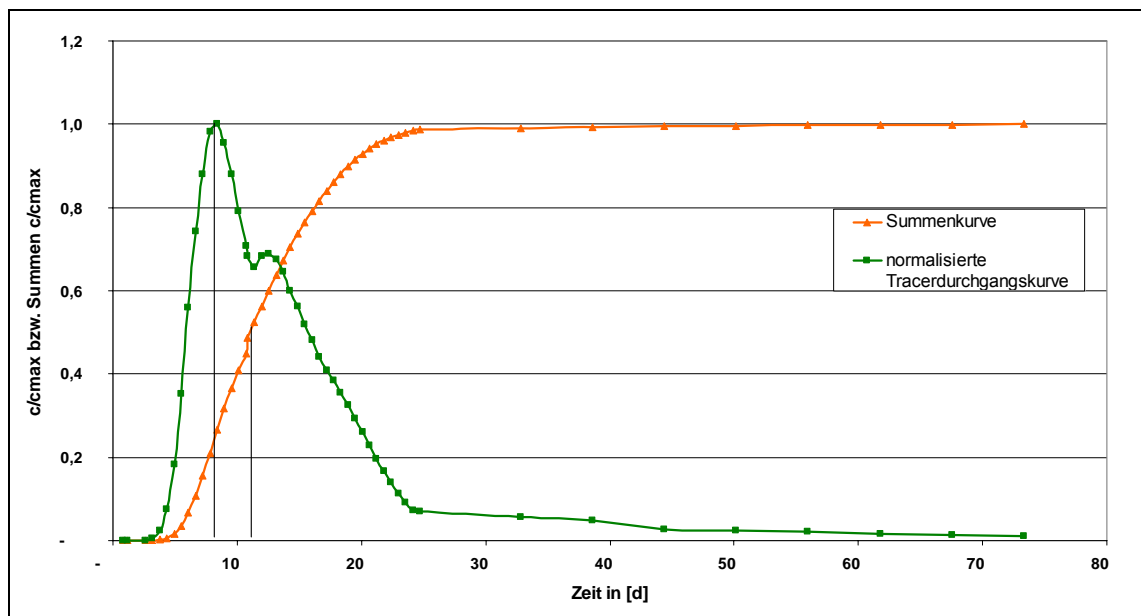


Abbildung 41: Summenkurve und normalisierte Tracerdurchgangskurve für Eingabeknoten Maschinenschacht für Set 1

9.2.2.2 Ergebnisse der Tracereingabe im Abbauholraum der 3. Sohle für das gesamte Bergwerk

In Abbildung 42 sind die Durchgangskurven des Uranins für den Maschinenschacht und den Strecken der 3. und 4. Sohle dargestellt. Für den oberen Bereich im Maschinenschacht kann deutlich die Restkonzentration von der Tracereingabe im unteren Teil des Maschinenschachtes bis zu einer Zeit von 40 bis 70 Tagen erkannt werden. Die Tracerwolke aus dem Abbauholraum bewegt sich hauptsächlich über die Strecke der 3. Sohle in den Maschinenschacht. Über die Strecke der 4. Sohle erreicht nur ein kleiner Teil des Uranins den Maschinenschacht. Die hierfür abgebildete Durchgangskurve in Abbildung 42 spiegelt aber nicht die tatsächlichen Verhältnisse wider, da nur die ganze Strecke (rund 60 m) als Volumen zur Verfügung stand. Der Tracer würde den Maschinenschacht nicht in 200 Tagen sondern zu einem späteren Zeitpunkt erreichen. Aus der Kurve kann jedoch abgeleitet werden, dass sich das Uranin auch über die 4. Sohle in den Maschinenschacht bewegt.

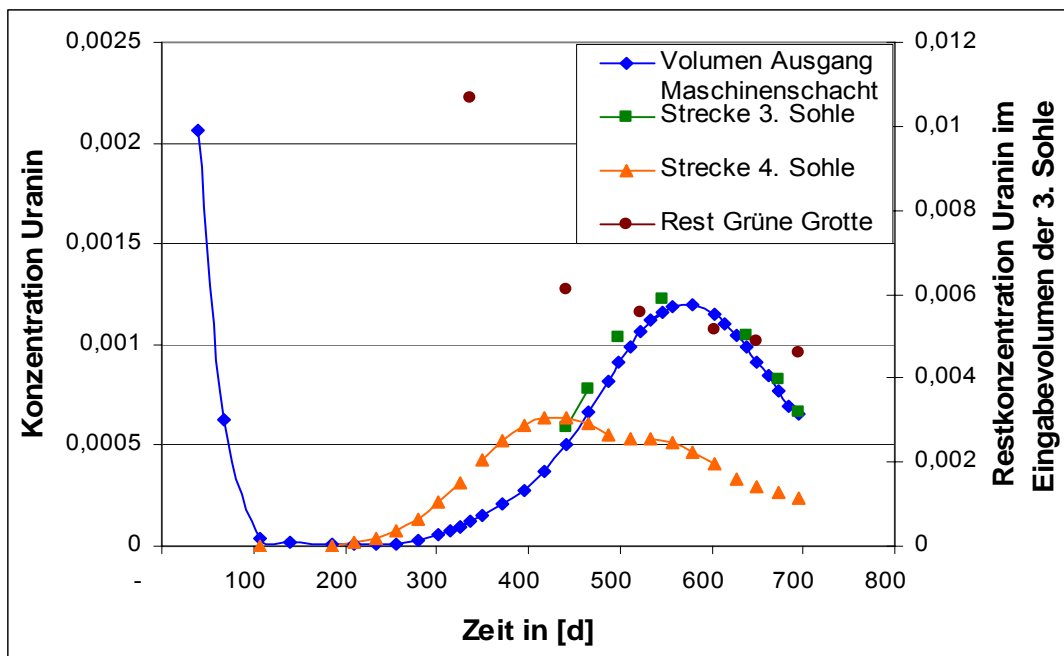


Abbildung 42: Tracerdurchgangskurven für den Maschinenschacht und den Strecken der 3. und 4. Sohle, sowie die Restkonzentration Uranin im Eingabevolumen der 3. Sohle

Aus den gewonnenen Daten wurden eine Summenkurve und eine normalisierte Tracerdurchgangskurve (c/c_{\max}) erstellt, die in Abbildung 43 ersichtlich ist. Anhand dieser Kurven wurden die charakteristischen Zeitpunkte ermittelt und die entsprechenden Strömungsgeschwindigkeiten berechnet. So wurde der Tracer am Ausgang des Maschinenschachtes nach 280 bis 330 Tagen zum ersten Mal registriert. Das ergibt eine maximale Abstandsgeschwindigkeit von 0,62 bis 0,53 m/d. Der dominierende Teil des Tracers (t_{dom}) erreichte nach 580 Tagen den Maschinenschacht und der Zeitpunkt, an dem 50 % des Tracers (v_{50}) eingetroffen sind, wurde mit 590 Tagen definiert. Die abgeleitete dominierende Abstandsgeschwindigkeit ist 0,3 m/d und die mediane Abstandsgeschwindigkeit beträgt 0,29 m/d.

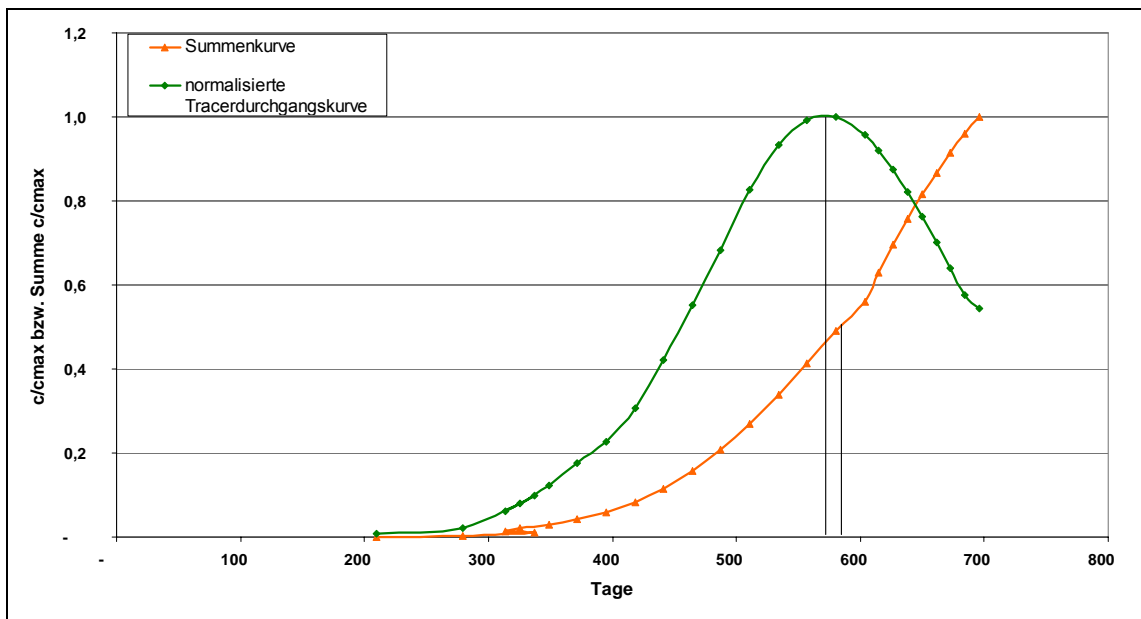


Abbildung 43: Summenkurve und normalisierte Tracerdurchgangskurve für Eingabeknoten im Abbauholraum der 3. Sohle

Die simulierte Ausbreitungsgeschwindigkeit des Uranins entspricht nicht den Ergebnissen aus dem praktischen Versuch. Eine weitere Berechnung mit den Einlassgeschwindigkeiten aus Set 1 und erneut versetztem Tracereingabeknoten wurde für eine neue Simulation herangezogen.

9.2.3 Berechnung mit Werten aus Set 1 und mit neuem Eingabeknoten

Die simulierten Geschwindigkeiten aus Set 1 und Set 2 waren für die Tracerausbreitung zu gering. Nach eingehender Analyse des großen Abbauholraumes der 3. Sohle wurde der Eingabeknoten aufgrund schlechter Strömungsbedingungen erneut rund 1,5 m in Richtung Ausgang versetzt.

In Abbildung 44 sind 4 Bilder der Uraninausbreitung im Abbauholraum der 3. Sohle nach 50, 80, 110 und nach 140 Tagen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Uraninfahne eher advektiv mit der Strömung als diffusiv ausbreitet. Anteile des Uranins bleiben im Schatten der Säulen stecken.

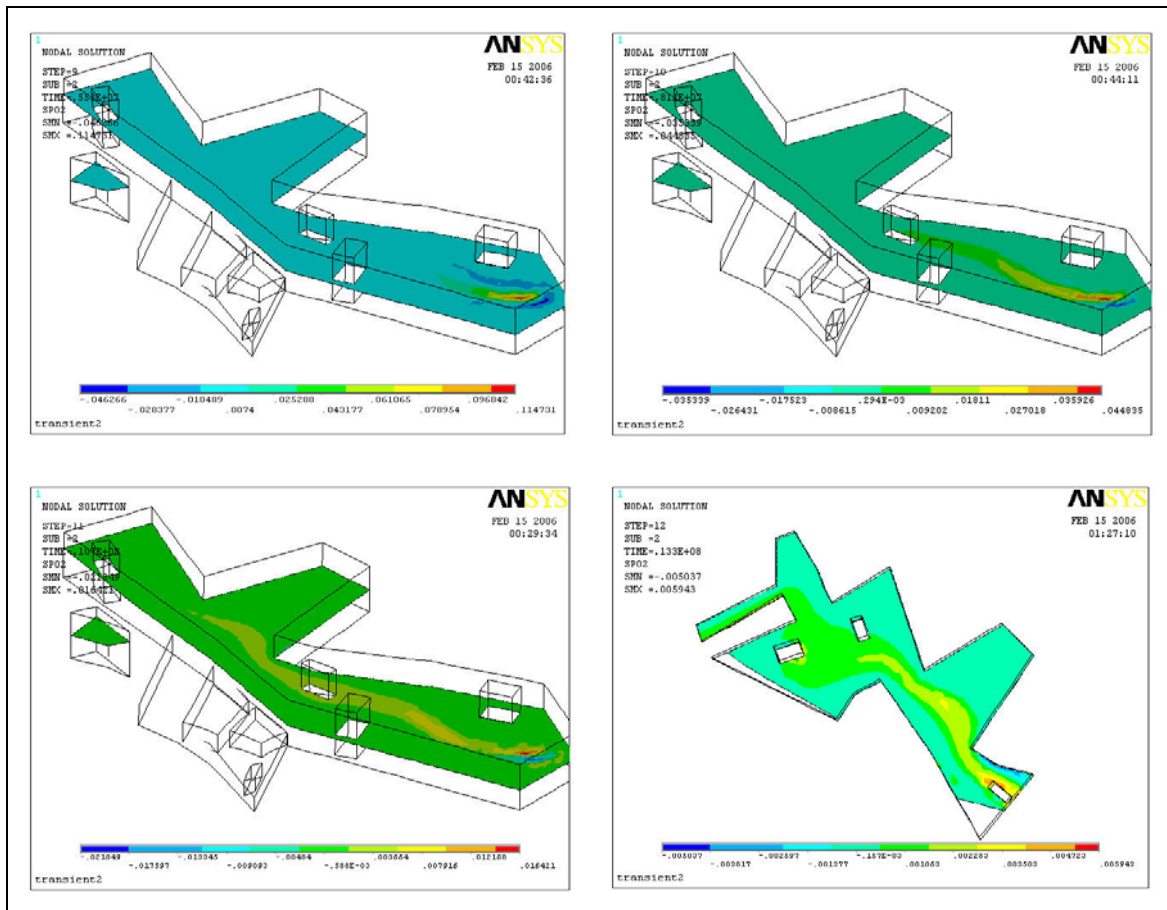


Abbildung 44: Ausbreitung des Uranins im Abbaubolraum der 3. Sohle; von links nach rechts: 1. Bild – Uraninfahne nach 50 Tagen, 2. Bild – Uraninfahne nach 80 Tagen, 3. Bild – Uraninfahne nach 110 Tagen und 4. Bild – Uraninfahne nach 140 Tagen

Bei der Simulation der Tracerausbreitung auf Grundlage des neuen Eingabeknotens und Strömungsgeschwindigkeiten aus Set 1 erreicht der Tracer Uranin gegenüber der vorhergehenden Berechnung deutlich früher den Maschinenschacht. Die Durchgangskurve des Tracers ist analog zu Set 1 in Abbildung 45 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich das Verhalten des Tracers nicht von der Tracerausbreitung aus Set 1 abweicht. Anhand der Summenkurve und der normalisierten Tracerdurchgangskurve (c/c_{\max}) in Abbildung 46 können die charakteristischen Zeitpunkte ermittelt und die dazugehörigen Strömungsgeschwindigkeiten berechnet werden. Die erste Registrierung des Uranins erfolgte nach rund 180 Tagen und ergab eine maximale Abstandsgeschwindigkeit von 0,97 m/d. Nach 371 Tagen erreichte der dominierende Teil (t_{dom}) und nach 381 Tagen an dem 50 % des Tracers (v_{50}) eingetroffen sind, den Maschinenschacht. Die entsprechend berechnete dominierende Abstandsgeschwindigkeit ist 0,47 m/d und die mediane Abstandsgeschwindigkeit beträgt 0,46 m/d.

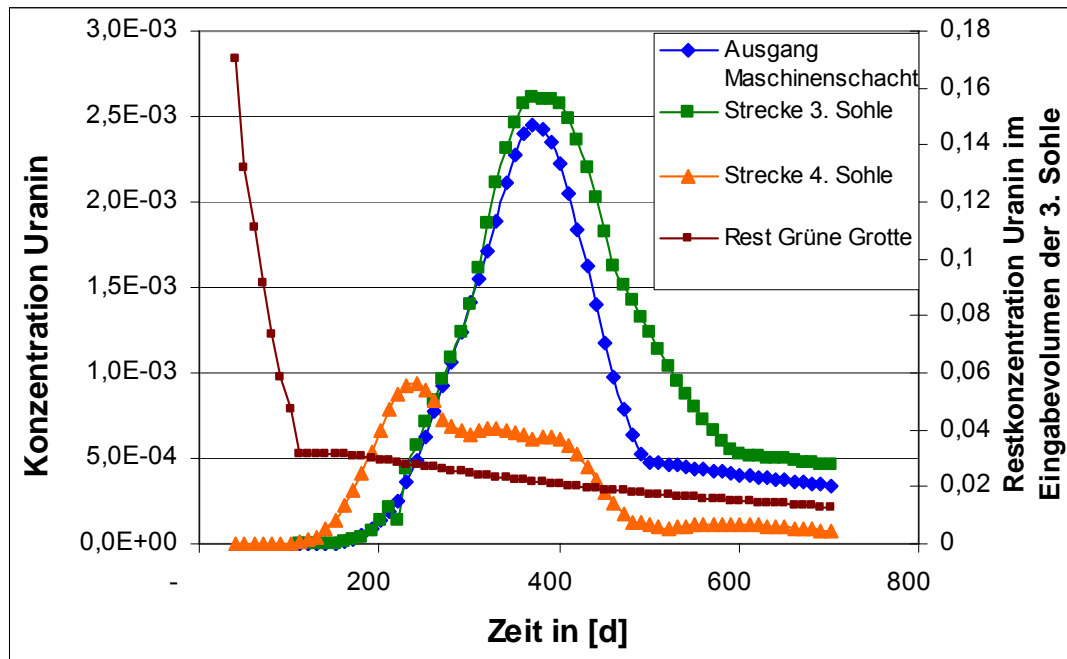


Abbildung 45: Tracerdurchgangskurven für den Maschinenschacht und den Strecken der 3. und 4. Sohle, sowie die Restkonzentration Uranin im Eingabevolumen der 3. Sohle

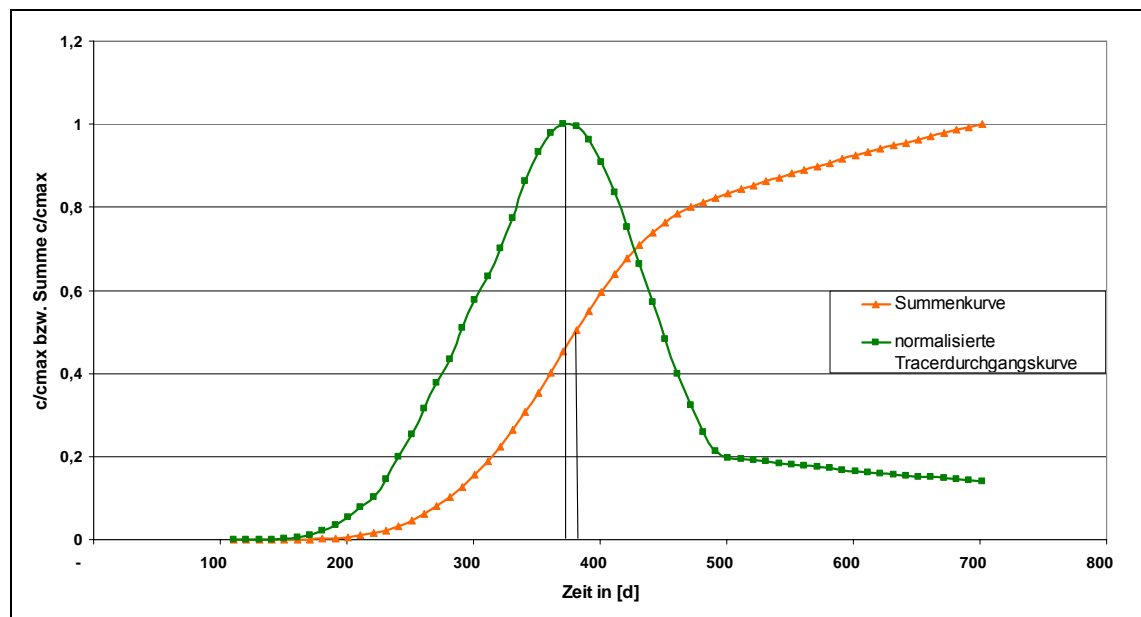


Abbildung 46: Summenkurve und normalisierte Tracerdurchgangskurve für Eingabeknoten im Abbauholraum der 3. Sohle

Aus der Tracerdurchgangskurve der Strecke der 4. Sohle in Abbildung 45 ist erkennbar, dass ein Teil des Uranins auch durch die 4. Sohle zum Maschinenschacht gelangt. Zur Aufklärung, ob sich das Uranin durch den Schacht oder durch die Rampe in die 4. Sohle strömt, wurde für die jeweiligen Volumen eine weitere Tracerdurchgangskurve erstellt. Diese sind im Anhang 18 dargestellt. Dabei fließt der größte Teil des Uranins durch den Schacht in die 4. Sohle und nur ein kleiner Teil gelangt durch die Rampe in die untere Tiefbausohle.

Ein Teil des Uranins verblieb im Eingabebereich der 3. Sohle. Diese Restkonzentration wurde in Abbildung 45 als Sekundärachse dargestellt. Gegenüber dem Anteil, der im Maschinenschacht eintrifft, ist der verbleibende Teil des Uranins im hinteren Bereich des Abbauholraums noch beträchtlich groß. In der abgebildeten Uraninausbreitung in Abbildung 44 ist zu erkennen, dass sich Teile des Uranins hinter den Pfeilern konzentrieren, bzw. sich diffusiv in den hinteren, kaum durchströmten Bereich des Abbauholraums bewegt.

9.3 Auswertung

Die Strömungssimulation wurde mit verschiedenen Parametersätzen durchgeführt. Die Einlassbedingungen wurden über die gemessenen Durchflussmengen am Auslass und der ermittelten Geschwindigkeiten aus dem Tracerversuch berechnet. Es wurde versucht die Hohlräume mit Pfeilern realitätsgetreu nachzubilden. Durch erste Berechnungen wurde das Modell mit den berechneten Geschwindigkeiten aus dem Tracerversuch am Ausgang des Maschinenschachtes kalibriert. Die Ergebnisse der Uraninausbreitung zeigen, dass das Strömungsmodell mit Set 1 und 2 wahrscheinlich nicht der Realität entspricht. Die sehr geringen Geschwindigkeiten im Abbauholraum der 3. Sohle verursachen eine sehr lange Verweildauer des Uranins im Bergwerk und damit zu lange Fließzeiten bis zum Abfluss im Maschinenschacht.

Es zeigte sich, dass die zuvor kalibrierten Strömungsmodelle nur begrenzt verwendet werden konnten. Der Tracereingabeknoten musste versetzt werden, damit sich das simulierte Ergebnis mit dem praktischen Tracerversuch vergleichbar ist.

Hinsichtlich der Auswertung des simulierten Tracertest im Maschinenschacht und im Abbauholraum der 3. Sohle waren deutlich Unterschiede zu verzeichnen. In den Tabelle 17 und Tabelle 18 sind die berechneten Geschwindigkeiten des Tracerversuchs für die 3 vorgenommenen Simulationen der Tracerausbreitung mit dem praktisch durchgeführten Tracerversuch aufgelistet.

Abgesehen von der maximalen Abstandsgeschwindigkeit sind die simulierten Ausbreitungsgeschwindigkeiten aus Set 2 für die Tracereingabe im Maschinenschacht zu hoch. Dagegen ist die maximale Abstandsgeschwindigkeit aus Set 2 vergleichbar mit den Werten aus dem Tracerversuch. Hier stimmen die dominierende und wirkungsvolle Abstandsgeschwindigkeit nicht annähernd mit den berechneten Geschwindigkeiten aus dem durchgeführten Tracerversuch überein. Auffallend ist die Ähnlichkeit beim Abklingen der Tracerdurchgangskurve für Set 2 mit dem praktischen Tracerversuch. Dies spiegelt den größeren longitudinalen Dispersionskoeffizient gegenüber der Tracereingabe in der Grünen Grotte wider. Die Tracerdurchgangskurve aus den Werten von Set 1 weist ein wesentlich schnelleres Abklingen der Uraninkonzentration auf, das mit den schnelleren Fließgeschwindigkeiten begründet werden kann. Des Weiteren ist in beiden Durchgangskurven ein zweiter kleinerer Peak zu erkennen. Dieser resultiert höchstwahrscheinlich aus dem Auseinanderziehen der Tracerwolke, die in Abbildung 39 in der letzten Darstellung des Maschinenschachtes zu erkennen ist.

Tabelle 17: Gegenüberstellung der ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten aus Set 1 und Set 2 mit denen des praktischen Tracerversuchs für die Eingabe im Maschinenschacht

Ort		Set 1		Set 2		Tracerversuch	
		Tage	Geschwindigkeit in [m/d]	Tage	Geschwindigkeit in [m/d]	Tage	Geschwindigkeit in [m/d]
Maschinen-schacht	v_{\max}	4	3,5	15	0,93	2	6
	v_{dom}	10	1,4	32	0,44	65	0,23
	v_{50}	13	1,1	31	0,45	149	0,094

Da nach den ersten Simulationsversuchen festgestellt werden musste, dass sich das Uranin mit den Eingabewerten aus Set 2 zu langsam ausbreitet, wurden die Strömungsberechnungen mit den Abflussdaten durchgeführt. Hierbei musste für ein zutreffendes Ergebnis auch der Eingabeknoten in einem Bereich mit besseren Strömungsbedingungen verschoben werden. Aus Tabelle 18 ist ersichtlich, dass dieser veränderte Tracereingabeknoten ein deutlich besseres Ergebnis hervorbringt. Die dominierende und die mediane Abstandsgeschwindigkeit stimmen sehr gut mit 0,47 m/d und 0,46 m/d mit den Werten aus dem Tracerversuch, bei dem 0,49 und 0,48 ermittelt wurde, überein. Jedoch ist die simulierte maximale Abstandsgeschwindigkeit mit 0,97 m/d gegenüber der Geschwindigkeit aus dem Tracertest deutlich zu hoch.

Tabelle 18: Gegenüberstellung der ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten aus Set 1 und Set 3 mit denen des praktischen Tracerversuchs für die Eingabe im Abbauholraum der 3. Sohle

Ort		Set 1		Set 1 mit veränderten Eingabeknoten		Tracerversuch	
		Tage	Geschwindigkeit in [m/d]	Tage	Geschwindigkeit in [m/d]	Tage	Geschwindigkeit in [m/d]
Ganzes Bergwerk	v_{\max}	280 - 330	0,62 - 0,53	180	0,97	300	0,58
	v_{dom}	580	0,3	371	0,47	352	0,49
	v_{50}	590	0,29	381	0,46	356	0,48

Der Hauptteil des Tracers gelangte im durchgeführten Tracerversuch in den Felsendomen über die Strecke der 3. Sohle zum Maschinenschacht. Anhand des Teufenprofils vom 16.03.2004 (Anhang 8) konnte nachgewiesen werden, dass sich auch ein kleinerer Teil durch die Strecke der 4. Sohle zum Maschinenschacht bewegt. Die simulierte Uraninausbreitung zeigt, dass sich auch hier ein kleinerer Traceranteil durch die 4. Sohle zum Maschinenschacht strömt.

Im Vergleich der Ergebnisse der numerischen Berechnungen mit denen des Tracertests werden folgende Fehler im Modell vermutet. Die simulierten Strömungsgeschwindigkeiten im Schrägschacht der Grünen Grotte zum Abbauholraum der 3. Sohle sind

wahrscheinlich zu gering. Eine simulierte Tracerbewegung fand nur sehr langsam statt. Teilweise sammelte sich das Uranin im Modell im Randbereich oder hinter Pfeilern. Einzelne Strömungsgeschwindigkeiten in Strecken (bis 6 m/d) erscheinen dagegen zu hoch. Eine Betrachtung dieser Detailbereiche bedarf weiterer Berechnungen. Die Auswahl der Randbedingungen könnte darauf Einfluss nehmen.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Tracerversuch in einem ehemaligen Kalksteinbergwerk durchgeführt. Es erfolgte die Aufnahme und Auswertung von physiko-chemischen Vor-Ort-Parametern und die Analyse der Hauptionen des Grubenwassers. Zur Klärung einer möglichen Stratifizierung des Wasserkörpers im Maschinenschacht wurden Temperatur und elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Teufe gemessen. Auf Grundlage der Ergebnisse des Tracerversuches wurde ein Transportmodell mit ANSYS/FLOTRAN erstellt und das Strömungsverhalten sowie die Ausbreitung des Tracers Uranin simuliert.

Das Kalksteinbergwerk Rabenstein unterscheidet sich mit seinem Ein-Schacht-System von anderen Bergwerken, die meist ein kompliziertes Netz aus Schächten und Strecken aufweisen. Eine Stratifizierung des Wasserkörpers ist kaum bzw. nicht vorhanden. Die Temperatur und die elektrische Leitfähigkeitsmessungen waren über die Teufe relativ konstant. Solche stagnierenden Verhältnisse sind laut HASCHE (200X) typisch für eine Ein-Schacht-System, wo auf Grund eines zu geringen geothermischen Gradienten weder eine freie noch eine erzwungene Konvektion stattfinden kann.

Bei dem durchgeführten Tracerversuch wurden im Maschinenschacht und im Schrägschacht der Grünen Grotte zum Abbauholraum der 3. Sohle Uranin als Tracermittel aufgegeben. Der Tracerversuch erstreckte sich über einen Zeitraum von fast 2 Jahren (März 2003 bis Februar 2005). In diesem Zeitraum wurden die physiko-chemischen Vor-Ort-Parameter mehrmals aufgenommen.

Da an zwei Stellen der Tracer injiziert wurde, konnten für den Teilbereich Maschinenschacht und für den gesamten unter Wasser stehenden Bereich durchschnittliche Fließgeschwindigkeiten berechnet werden. Für den Maschinenschacht ergab sich eine maximale Abstandsgeschwindigkeit von 6 m/d, eine dominierende Abstandsgeschwindigkeit von 23 cm/d und mediane Geschwindigkeit von 9,4 cm/d. Der Tracer aus dem Schrägschacht der Grünen Grotte erreichte erst nach 300 Tagen die Entnahmestelle im Maschinenschacht. Daraus resultiert eine maximale Fließgeschwindigkeit von 58 cm/d. Nach 352 Tagen erreichte der dominierende Hauptteil des eingesetzten Tracers die Entnahmestelle und es ließen sich daraus dominierende Fließgeschwindigkeiten von 49 cm/d berechnen.

Während der Untersuchungszeit ergaben die Messungen der elektrischen Leitfähigkeit an den 7 Messstellen im Grubenwasser konstante Werte zwischen 630 bis 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die Wassertemperaturen schwanken zwischen 3 und 10 °C und Redoxpotentiale zwischen 340 und 540 mV. Der pH-Wert lag zwischen 6,5 und 9. Anhand der gemessenen Parameter wurde das Grubenwasser in 3 Wassertypen eingeteilt. Das Wasser im Marmorsaal und der Grünen Grotte weist ähnliche Verhältnisse auf mit den geringsten elektrischen Leitfähigkeiten, den höchsten pH-Werten und der höchsten Sauerstoffsättigung (Typ 1). Das Wasser der Grünen Grotte gelangt durch die 3. und 4. Sohle in den Maschinenschacht und von dort wird es über den Blauen Salon in den

Wasserstollen geleitet. Auf Grund der langen Verweilzeit des Wassers im gefluteten Bereich des Bergwerks verändern sich die physiko-chemischen Eigenschaften und bildet Typ 2 des Grubenwassers. Die Abnahme der Sauerstoffsättigung ist deutlich zu erkennen. Das Wasser aus dem Seitenstollen (Typ 3) hebt sich durch seine höhere Ionenkonzentration und Wassertemperatur und niedrigerem pH-Wert deutlich vom Rest des Bergwerks ab. Das Wasser aus dem Marmorsaal, dem Blauen Salon und dem Seitenstollen vereinigen sich im Wasserstollen und wird über die Rösche in den Pleißbach abgeleitet. Das dem Vorfluter zugeführte Grubenwasser muss gesetzlichen Anforderungen genügen. Bis auf die gemessenen Sulfatgehalte wurden keine Überschreitungen nach LAWA (1997) festgestellt. Bei einer Einordnung nach IWS (1994) wurden keine Grenzwerte überschritten.

Im Anschluss an die hydrogeochemischen Untersuchung erfolgte die Strömungsmodellierung mit ANSYS/FLOTRAN. Im Bergwerk kann von laminaren Strömungsverhältnissen ausgegangen werden. Zur Berechnung der Strömung wurden einerseits die berechneten Fließgeschwindigkeiten aus dem Tracerversuch und andererseits die Werte aus den Abflussdaten herangezogen. Es wurden jeweils stationäre und transiente Strömungsberechnungen durchgeführt.

Der simulierte Strömungsverlauf aller Berechnungen war ähnlich, nur die Fließgeschwindigkeiten nahmen unterschiedliche Größen an. So ergaben sich dominierende Fließgeschwindigkeiten mit den Eingabeparametern der Abflussdaten von 1 m/d und für die Simulation anhand der Tracerergebnisse ergaben sich dominierende Fließgeschwindigkeiten von 0,4 m/d. Bei näherer Betrachtung der Strömungsbilder konnte festgestellt werden, dass sich das Wasser vor allem durch die großen Abbauholräume sehr langsam mit teilweise nur 0,07 m/d bewegt. Die simulierten Fließgeschwindigkeiten mit den Werten aus dem Tracerversuch sind vergleichbar mit den reellen Fließgeschwindigkeiten aus dem Tracertest.

Bei der anschließenden Simulation der Tracerausbreitung wurde in die schon vorhandene Strömung das Uranin an den zwei bekannten Eingabestellen, im Maschinenschacht und im Schrägschacht von der Grünen Grotte zum Abbauholraum der 3. Sohle, eingegeben. Die Ausbreitung des Uranins auf Grundlage der simulierten Strömung mittels der Tracerdaten musste abgebrochen werden, da sich das Uranin nach 400 Tagen nicht aus dem Abbauholraum der 3. Sohle bewegte. Deshalb musste auf die Simulationsergebnisse mittels Abflussdaten zurückgegriffen werden. Die Tracerausbreitung stimmt relativ gut mit dem praktisch durchgeführten Tracerversuch überein. Die simulierte dominierende Abstandsgeschwindigkeit mit 0,47 m/d entspricht etwa der aus dem Tracerversuch mit 0,49 m/d.

Es konnte gezeigt werden, dass Modellierungsrechnungen ergänzend zum praktischen Tracerversuch herangezogen werden können. Die Verwendung von Strömungsmodellen ohne Verifizierung durch praktische Versuche ist nicht zu empfehlen. Unter Voraussetzung der genauen Nachbildung eines Bergwerks liegt der Vorteil der Modellierung in einer detaillierten Untersuchung der hydrodynamischen Verhältnisse.

Literaturverzeichnis

ANSYS, Inc. (2001): ANSYS 10 Theory Manuel. USA

ARBEITSKREIS „HUMAN- UND ÖKOTOXIKOLOGISCHE BEWERTUNG VON MARKIERUNGSMITTELN IN GEWÄSSERN“ (1997): Human- und ökotoxikologische Bewertung von Markierungsmitteln in Gewässern. – Grundwasser, Bd. 2 Nr. 2, 61-64, 2 Tab.; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg

BOHL, W. (1998): Technische Strömungslehre. Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, Inkompressible Strömungen, Kompressible Strömungen, Strömungstechnik. Vogel Verlag, Würzburg

BÖGLI, A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie; Springer Verlag, Berlin

DUNGER, V. (1994): Grundlagen der Hydrologie.- unveröffentlichtes Manuskript der TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie; Freiberg, 148 S.

DVWK SCHRIFTEN 100 (1992): Anwendung hydrogeochemischer Modelle, Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.; Paul Parey Verlag, Hamburg, Berlin

DVWK SCHRIFTEN 111 (1979): Empfehlungen zu Umfang, Inhalt und Genauigkeitsanforderungen bei chemischen Grundwasseruntersuchungen. - DVWK-Regeln 111. 6S., Paul Paray Verlag, Hamburg, Berlin

DVWK SCHRIFTEN 127 (1999): Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.; Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

FÖRSTER, Dr. B. (2004): Schachtanlage Asse, Transportprozesse in Grubengebäude. GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Sechste Informationsveranstaltung, <http://www.gsf.de/asse/foerster-6-Info-1.phtml> (Datum des Zugriffs: 14.02.2006)

GEISSLER, E. & NHUAN, T.T. (1982): Die Rabensteiner unterirdischen Felsendome – Zur Geologie und Geschichte des Schaubergwerks – In: STÄDTISCHE MUSEEN KARL-MARX-STADT. – 4. Aufl., 38 S., 20 Abb.; Karl-Marx-Stadt (Druckhaus Karl-Marx-Stadt)

HASCHE A. (2002): Tracertechniken und hydrodynamische Untersuchungen in gefluteten Untertagebergwerken. unveröffentl. Lehrstuhl für Hydrogeologie; Freiberg

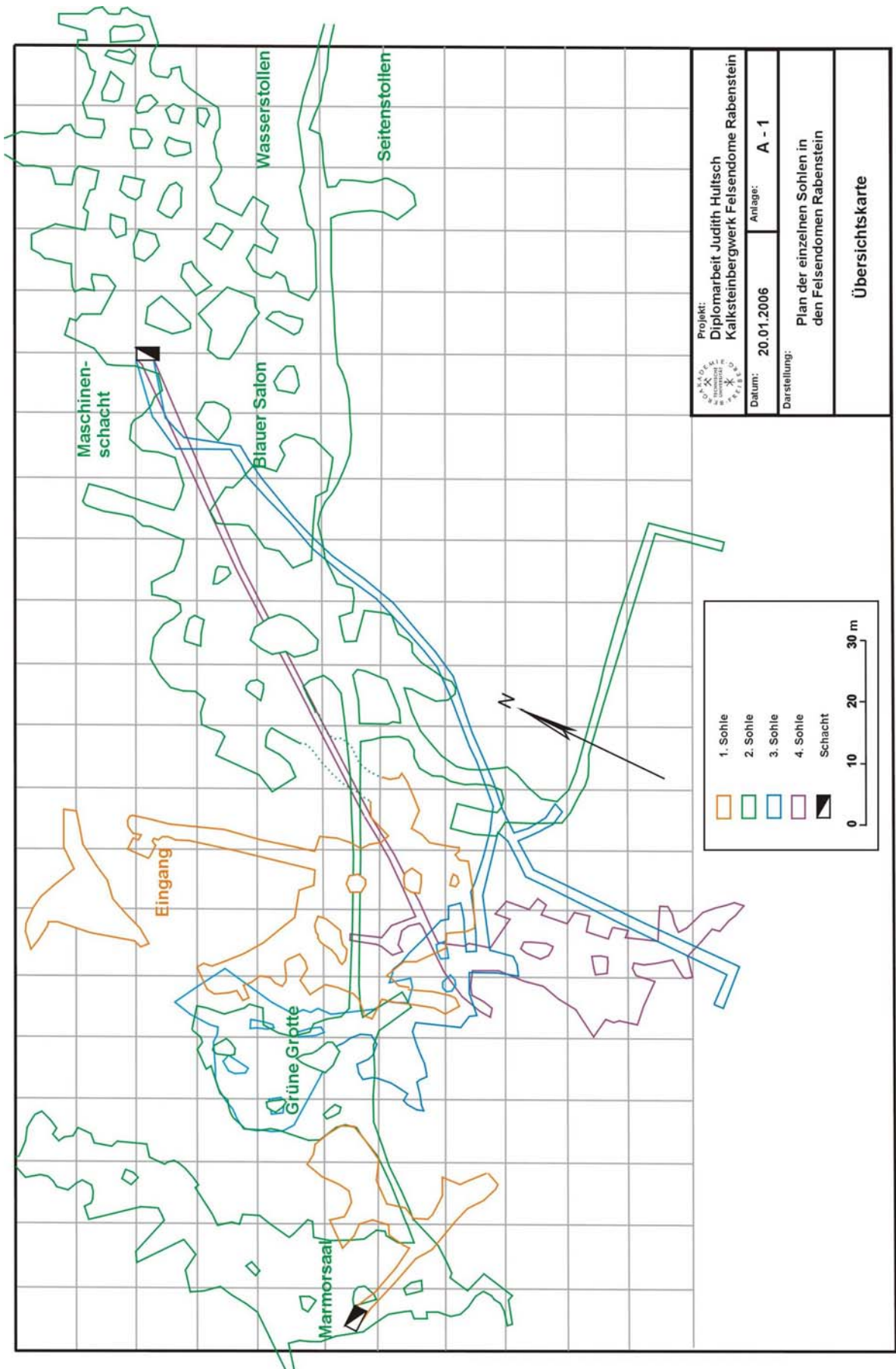
HÖLTING, B., COLDEWEY, W. G. (2005): Hydrogeologie, Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie, Elsevier, Spektrum Akad. Verlag, München

ILSCHER, W. (1986): Bergschadenkundliche Analyse, Bergarchiv Freiberg

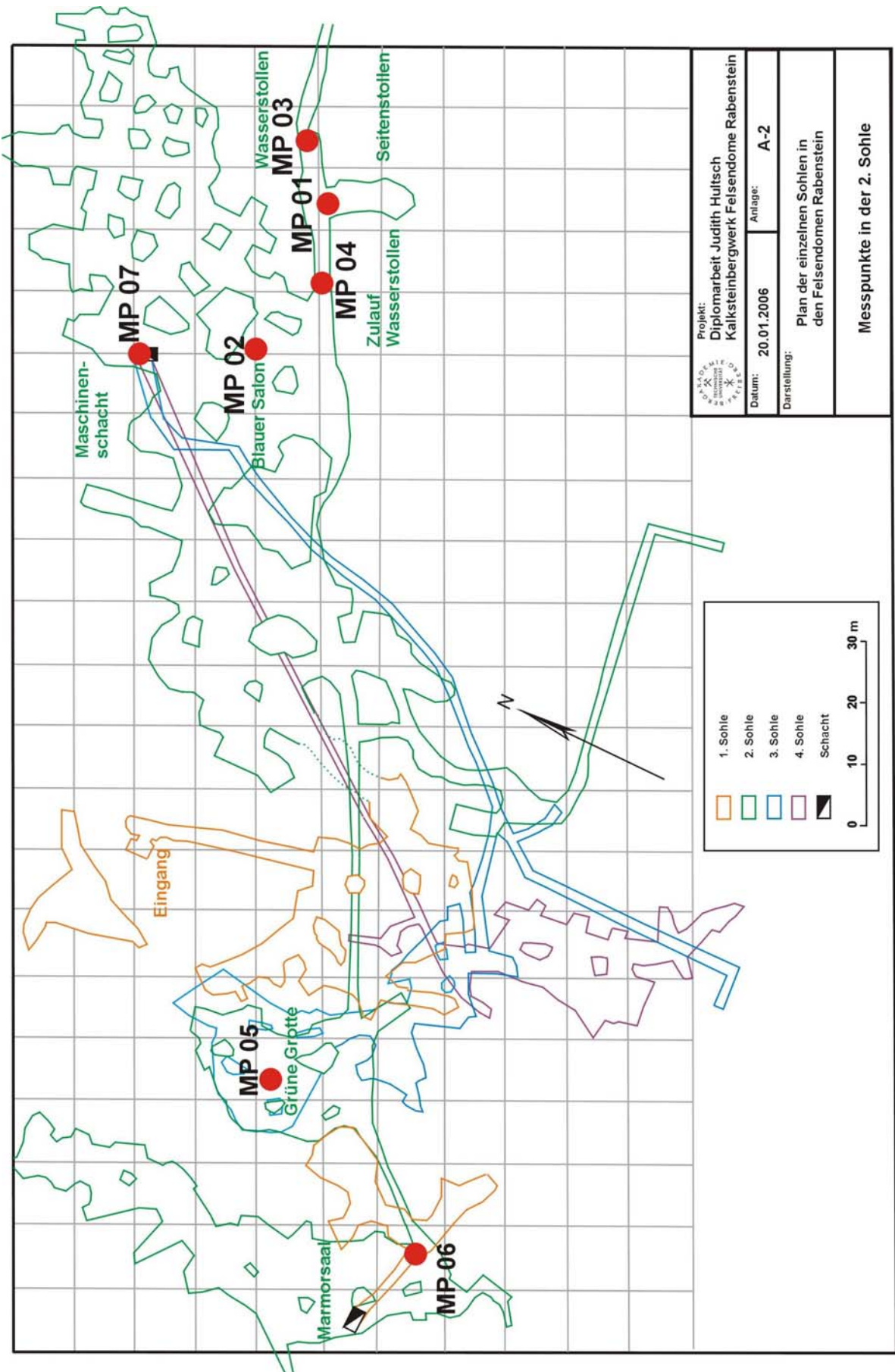
- KAHL, S., KOMISCHKE, H.** (2003): Natriumfluoreszein – Tracer in gefluteten Untertagebergwerken. Untersuchung zum Verhalten im neutralen pH-Wert-Bereich. unveröffentl. Studienarbeit an der TU Bergakademie Freiberg
- KÄSS, W.** (2004): Lehrbuch der Hydrogeologie. Bd.9 Geohydraulische Markierungstechnik, Gebrüder Borntraeger Verlag, Berlin Stuttgart
- KÖLLE, W.** (2003): Wasseranalysen – richtig beurteilt, WILEY-VCH Verlag, Weinheim
- LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser** (1998): Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer - Ableitung und Erprobung von Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer für die Schwermetalle Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink. - Band II; Berlin (Kulturbuchverlag Berlin GmbH).
- LEGE, T., KOLDITZ, O. & ZIELKE, W.** (1996): Strömungs- und Transportmodellierung.- Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Bd.2, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokio
- LÜHR, H. P., JORNS, A. C., STAUPÉ, J.** (1994): Einleitwerte für Kontaminierte Wässer: Anforderungen an kontaminierte Wässer aus Grundwassersanierungsmaßnahmen, Bodenwaschvorgängen, Grundwasserabpumpungen sowie Stör- und Unfällen bei der Einleitung in Oberflächengewässer und Kanalisation; IWS-Schriftenreihe, Bd.14, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- MATTHESS, G.** (1994): Lehrbuch der Hydrogeologie. Bd.2 Die Beschaffenheit des Grundwassers, Gebrüder Borntraeger Verlag, Berlin, Stuttgart
- MERKEL B. & PLANER-FRIEDRICH B.** (2002):Grundwasserchemie.- Praxisorientierter Leitfaden zur numerischen Modellierung von Beschaffenheit, Kontamination und Sanierung aquatischer Systeme, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- MERKEL B. & PLANER-FRIEDRICH B.** (2003): Integrierte Datenauswertung Hydrogeologie; unveröffentlichtes Manuskript der TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie; Freiberg, 61 S
- MERKEL B., PETER H.J., MEINRATH G. VOLKE P.** (2002): Hydrochemisches Praktikum; unveröffentlichtes Manuskript der TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie; Freiberg, 79 S
- MÜLLER, G., GROTH, C.** (2000): FEM für Praktiker, Bd.1: Grundlagen, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim
- OERTEL jr. H.** (2002): Prandtl – Führer durch die Strömungslehre, Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden
- PETER, P.** (1999): Die Benutzung des Strömungsmoduls FLOTRAN innerhalb des FEM-Programms ANSYS. Skript zum Einführungslehrgang am Universitätsrechenzentrum der TU Bergakademie Freiberg, Freiberg
- SCHNEGG, P.A., COSTA, R.** (2002): Tracer Tests made easier with field fluorimeters. Bulletin d'Hydrogeologie No 20, Centre d'Hydrogeologie, Universite de Neuchatel

- SCHREINER, M., KREYSING, K.** (1998): Geotechnik Hydrogeologie. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Bd.4, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokio
- SCHWEDT, G.** (1995): Mobile Umweltanalytik: Schnelltestverfahren und Vor-Ort-Messtechnik, Vogel Verlag, Würzburg
- SPURK, J. H.** (1996): Strömungslehre. Einführung in die Theorie der Strömungen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona Budapest, Hongkong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapore, Tokio
- STOYAN, D.; STOYAN, H. & U. JANSEN** (1997): Umweltstatistik – Statistische Verarbeitung und Analyse von Umweltdaten – 343 S.; Teubner Verlag, Leipzig
- UNGER, K.** (2002): Hydrodynamische Verhältnisse im gefluteten Unterbau des Bergwerks Großkogel/Tirol, Numerische Modellierung mit ANSYS/FLOTRAN. unveröffentl. Diplomarbeit an der TU Bergakademie Freiberg
- VDI** (1997): VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. Verein Dt. Ingenieure, Berlin
- WACKWITZ, T.** (2002): Multitracerversuch im gefluteten Blindschacht des Bergwerks Großkogel/Tirol, Vorbereitung, Durchführung und GIS-unterstützte Auswertung. unveröffentl. Diplomarbeit an der TU Bergakademie Freiberg
- WALTER R.** (1992): Geologie von Europa; 651 S.; E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- WITT, Prof. Dr. Ing. K. J.** (2004): Arbeitsblätter zur Vorlesung, Grundlagen des Schadstofftransports, Umweltgeotechnik Universität Weimar
- WOLKERSDORFER, C., FELDTNER, N., TREBUSAK, I.** (1997): LydiA – A new method for tracing mine water. International Mine Water Association: Mine Water and the Environment 1: 43-55; Ljubljana
- WOLKERSDORFER, C., FELDTNER, N., TREBUSAK, I.** (2002): Mine Water Tracing. A Tool for Assessing Flow Paths in Flooded Underground Mines. Mine Water and the Environment (2002) 21: 7.14, 3 Abb., 3 Tab.; IMWA Springer Verlag

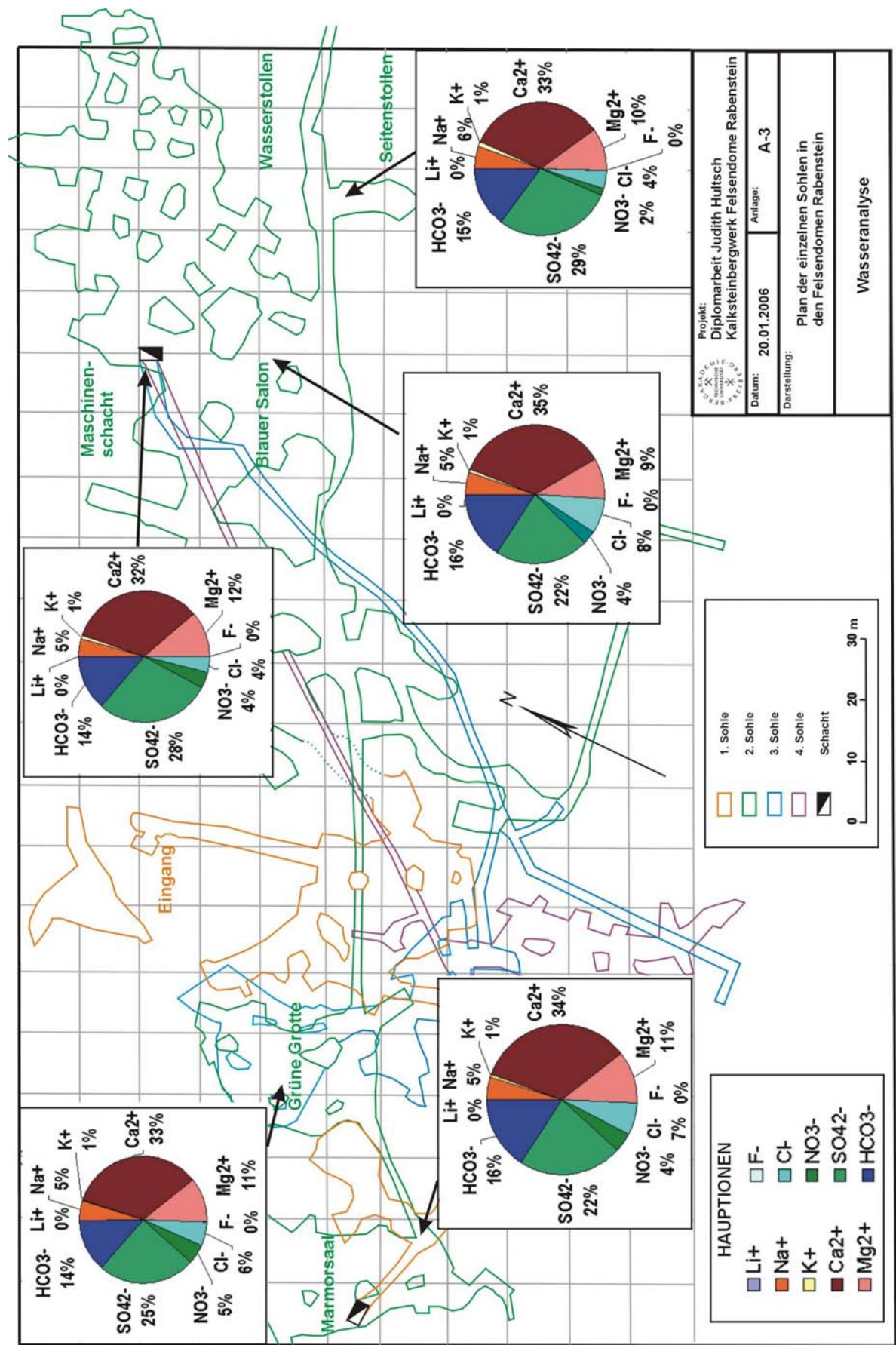
Anhang



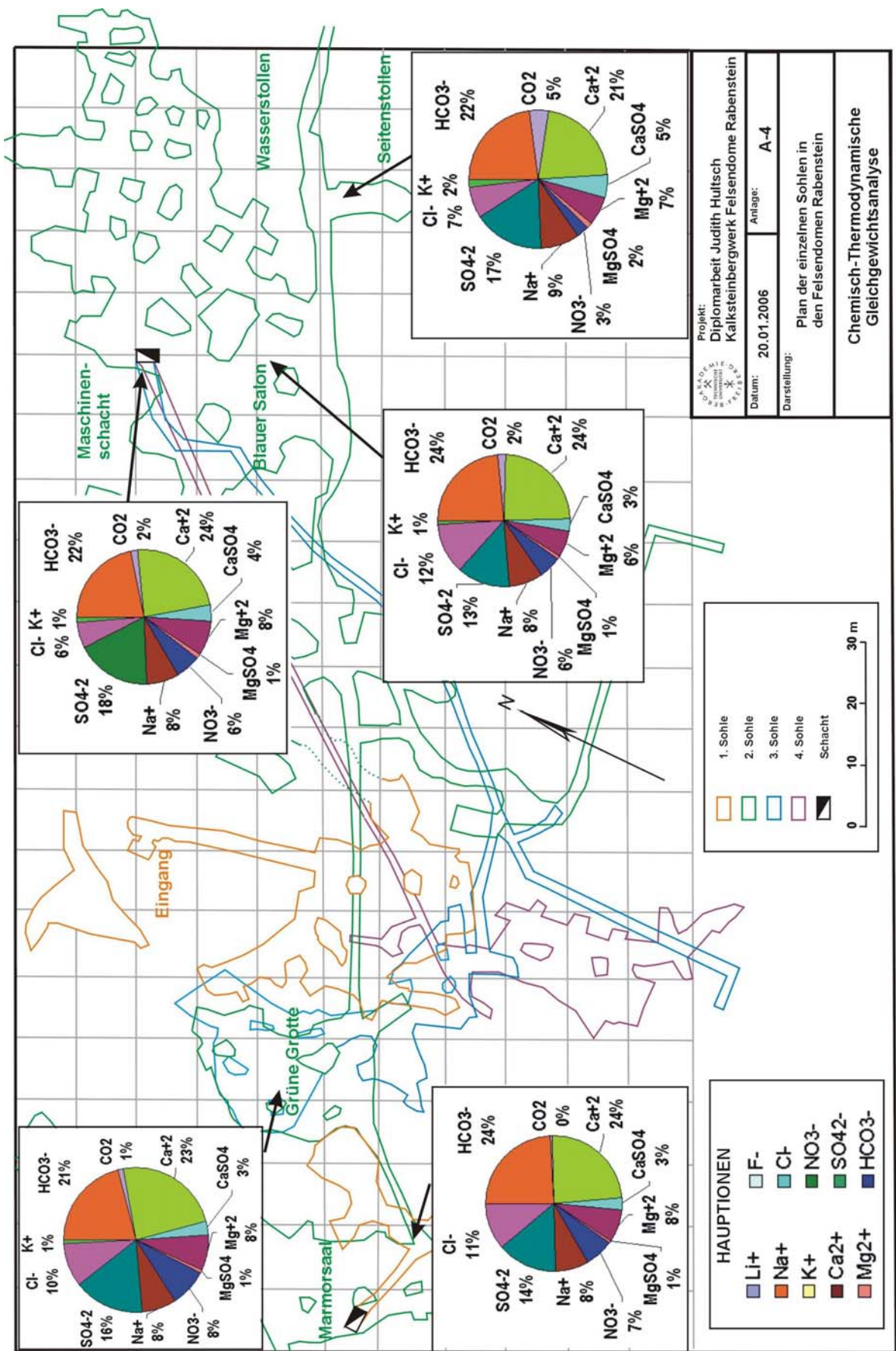
Anhang 1: Übersicht über die 1. bis 4. Sohle



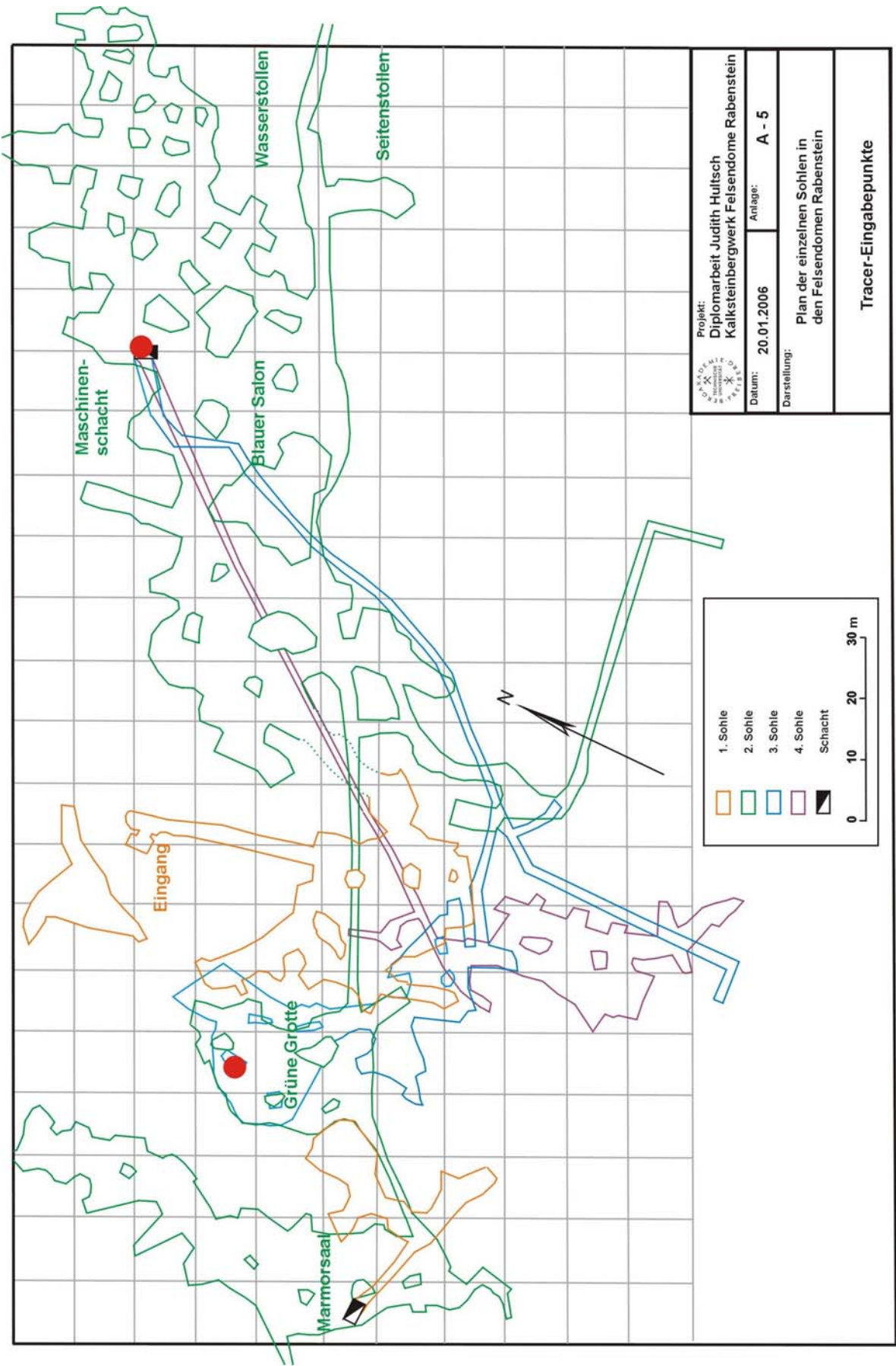
Anhang 2: Lage der Messpunkte in den Felsendomen Rabenstein



Anhang 3: Wasseranalyse der Haptionen



Anhang 4: chemisch-thermodynamische Gleichgewichtsanalyse



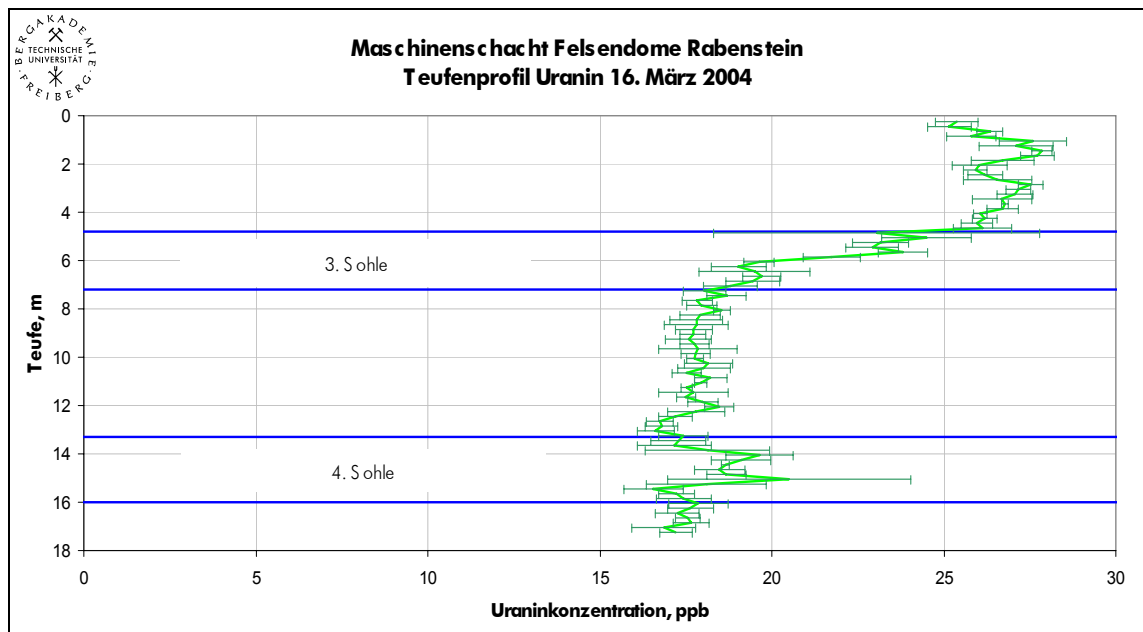
Anhang 5: Übersichtskarte mit Tracereingabepunkte

Datum	gemessene Parameter
04. September 2002	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, EhKs, Kb
13. Januar 2003	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh, Ks, Kb, Fe _(gesamt) , Fe ²⁺ , HCO ₃ , CO ₂
20. Januar 2003	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh, Ks, Kb, HCO ₃ , CO ₂ ,
12. März 2003	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh
21. März 2003	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh Ks, Kb, Fe _(gesamt) , Fe ²⁺ , HCO ₃ , CO ₂ , O ₂
01. April 2003	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh
07. Juli 2003	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh
24. Oktober 2003	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh
04. November 2003	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh
03. Februar 2004	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh
15. März 2004	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh Ks, Kb, Fe _(gesamt) , Fe ²⁺ , HCO ₃ , CO ₂ , O ₂
23. Juni 2004	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh
08. Juli 2004	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh
15. September 2004	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh Ks, Kb, Fe _(gesamt) , Fe ²⁺ , HCO ₃ , CO ₂
05. November 2004	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh
03. Februar 2005	Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung, pH, Eh

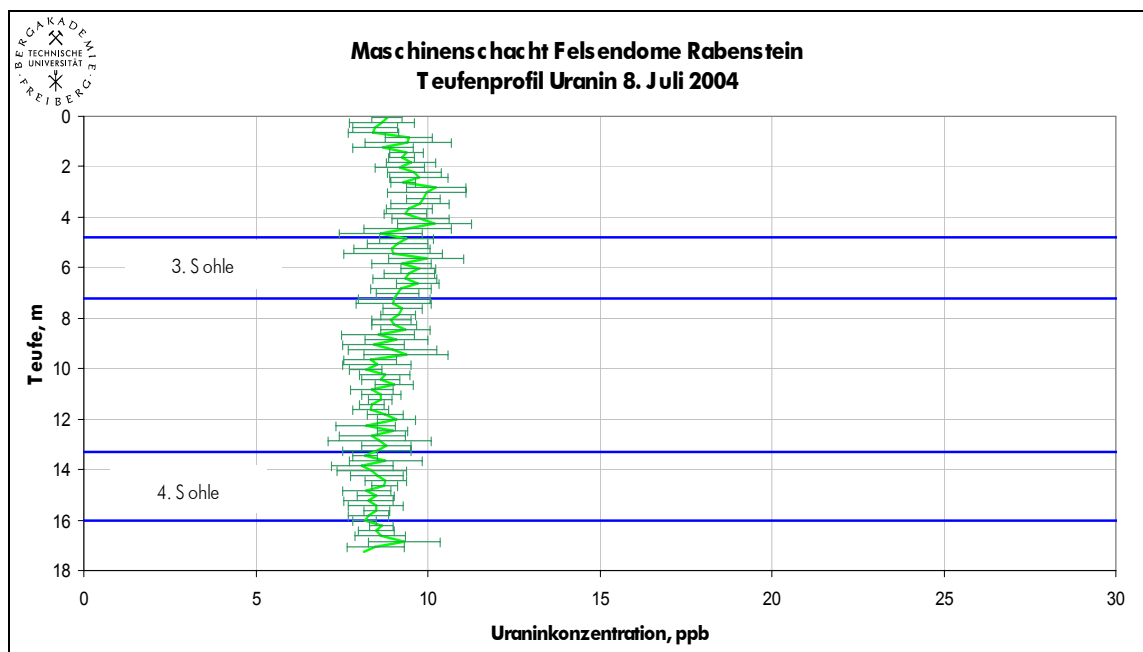
Anhang 6: Probenahmezeitpunkte und die jeweils gemessenen Parameter

Datum	Uhrzeit	Wasserstand ca. 1m vor Wehr [cm]	Wasserstand Überlauf [cm]	Wasserstand Überlauf [cm]	Abfluss Wehr [L/min]	Fehler [L/min]	Abfluss [m³/d]	Abfluss [m³/d]
21.03.03	11:45	19,8	4,6	3,8	23,1	2,92	29,1 - 37,5	33,3
24.10.03	17:00	17,5	2,3	1,5	2,3	0,29	2,8 - 3,7	3,3
03.02.04	10:15	22	6	6	72,4	9,16	91,1 - 117,5	104,3
15.03.04	10:45	17,75	3	1,75	3,3	0,42	4,2 - 5,4	4,8
23.06.04	13:40	19	3,5	3	12,8	1,62	16,1 - 20,8	18,4
09.07.04	14:30	19	3	3	12,8	1,62	16,1 - 20,8	18,4
15.09.04	15:00	18,75	2,5	2,75	10,3	1,30	13,0 - 16,7	14,8
05.11.04	11:00	18	2	2	4,6	0,59	5,8 - 7,5	6,7
03.02.05	14:30	20	4,5	4	26,3	3,32	33,1 - 42,6	37,9
				Mittelwert	18,7	2,36	23,5 - 30,3	26,9
				Mittelwert ohne 03.02.2004	11,9	1,51	15,0 - 19,4	17,2

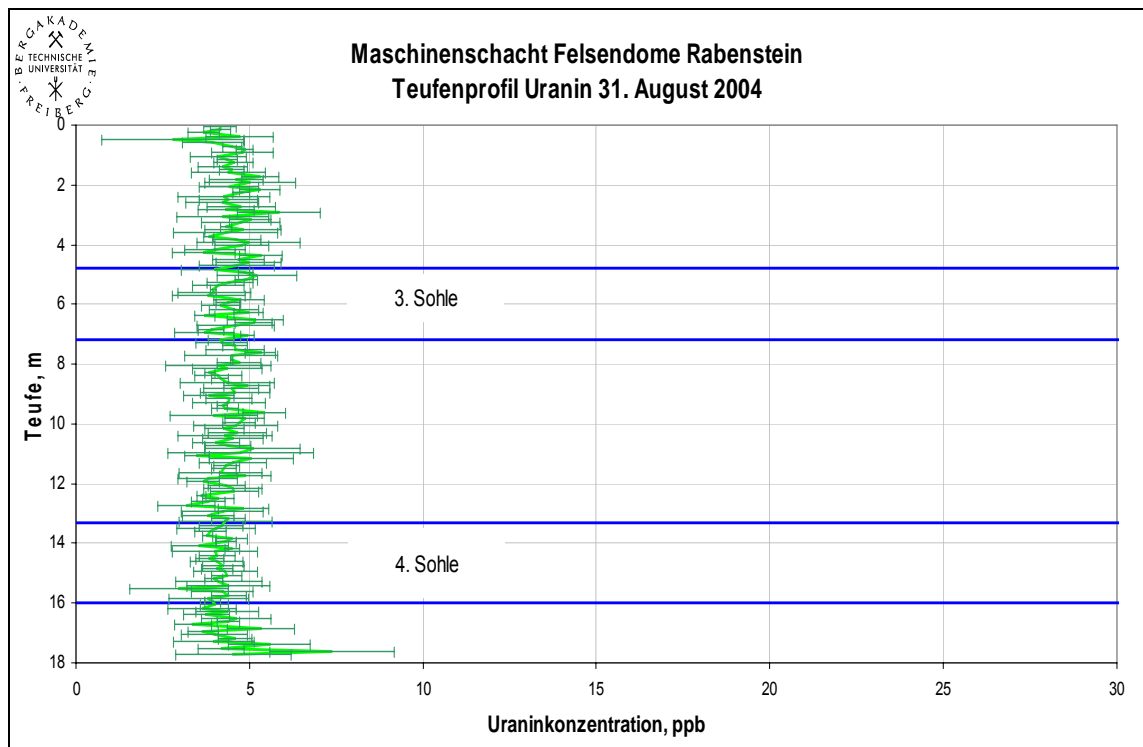
Anhang 7: Durchflussmessungen und errechneter Abfluss von März 2003 bis Februar 2005 für die Felsendome Rabenstein



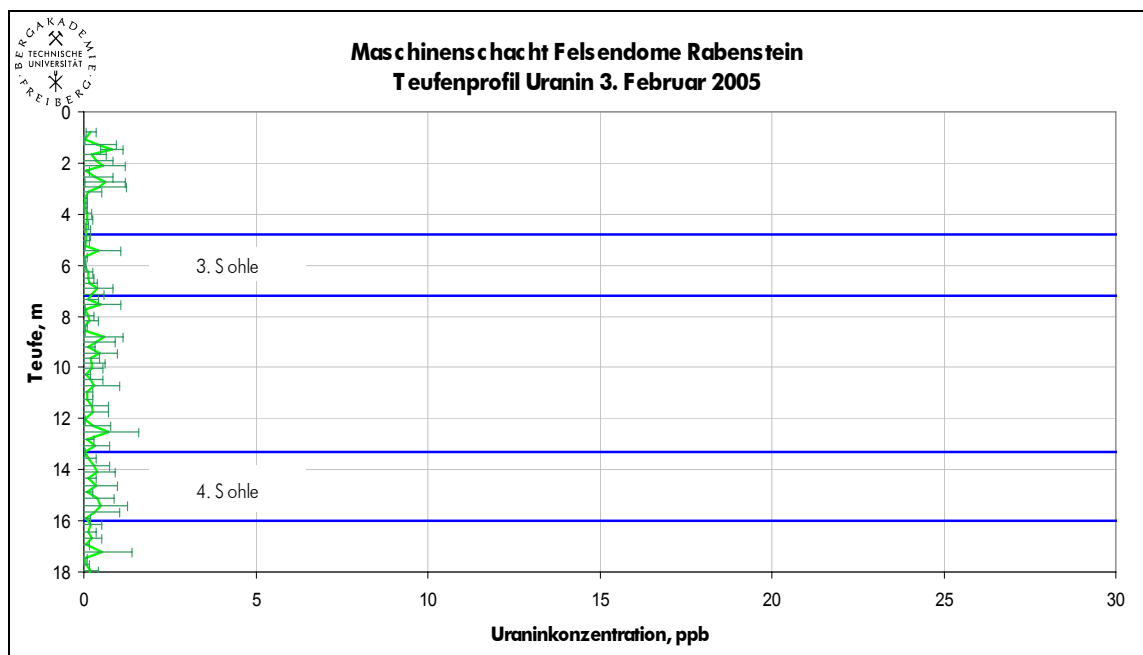
Anhang 8: Teufenprofil Uranin im Maschinenschacht am 16. März 2004



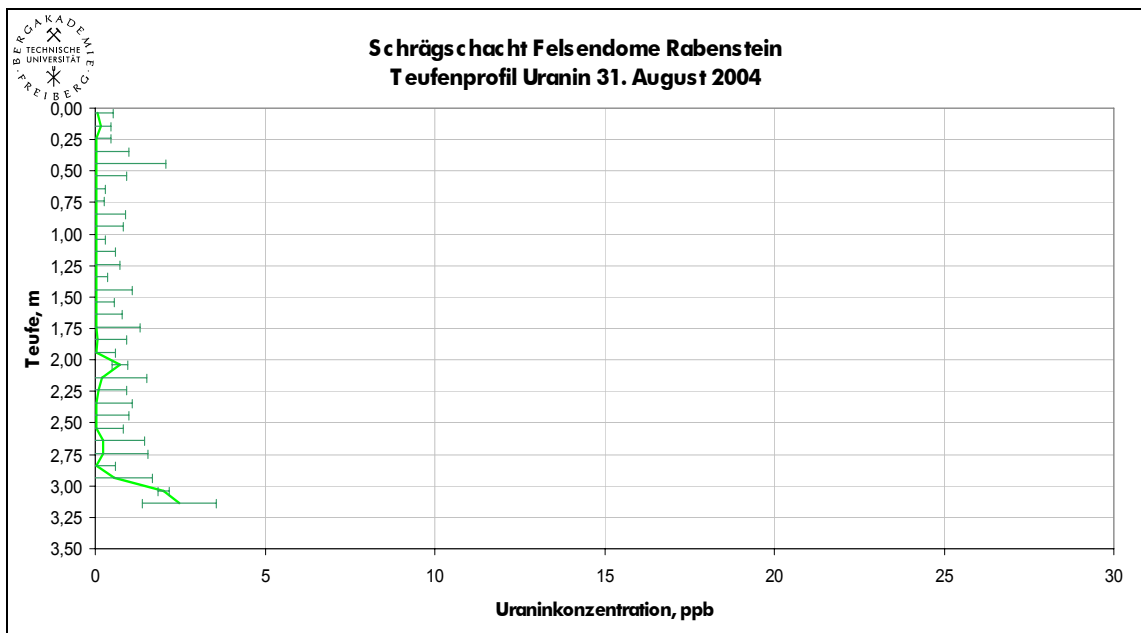
Anhang 9: Teufenprofil Uranin im Maschinenschacht am 8. Juli 2004



Anhang 10: Teufenprofil Uranin im Maschinenschacht am 31. August 2004



Anhang 11: Teufenprofil Uranin im Maschinenschacht am 3. Februar 2004



Anhang 12: Teufenprofil Uranin im Schrägschacht am 31. August 2004

Gewässergüteklassifikation nach LAWA

Wassein- haltsstoff	Einheit	Stoffbezogene chemische Gewässergüte						
		I	I – II	II	II – III	III	III – IV	IV
NO ₃	mg/L	≤ 1	1 ≤ 1,5	≤ 2,5	≤ 5	≤ 10	≤ 20	> 20
Cl	mg/L	≤ 25	≤ 50	≤ 100	≤ 200	≤ 400	≤ 800	> 800
SO ₄	mg/L	≤ 25	≤ 50	≤ 100	≤ 200	≤ 400	≤ 800	> 800
I	geogener Hintergrundwert							
I-II	sehr geringe Belastung							
II	mäßige Belastung							
II-III	deutliche Belastung							
III	erhöhte Belastung							
III-IV	hohe Belastung							
IV	sehr hohe Belastung							

Anhang 13: Gewässergüteklassifikation nach LAWA

Physiko-chemische Vor-Ort-Parameter (elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, TDS, Redoxpotential und ph-Wert)

Messpunkt	Bezeichnung	Datum	Lf ($\mu\text{S/cm}$)	Lf s	Lf n	T ($^{\circ}\text{C}$)	T s	T n	TDS (mg/L)	TDS s	TDS n	Eh _{korr.} (mV)	Eh _{korr.} s	Eh _{korr.} n	pH	pH s	pH n
MP 05	Grüne Grotte	04.09.2002	994	1,5	3	6,7	0,06	3	677	1,33	3	464	1,2	3	7,59	0,02	3
MP 06	Ablauf Marmorsaal	04.09.2002	788	10,2	3	7,0	0,00	3	531	8,86	3	469	0,6	3	7,65	0,01	3
MP 07	Maschinenschacht	04.09.2002	1226	0,9	3	7,7	0,00	3	843	0,26	3	471	2,0	3	7,27	0,02	3
MP 04	Zulaufsrohr Wasserstollen	04.09.2002	1197	1,2	3	8,0	0,06	3	822	1,03	3	466	1,0	3	7,30	0,02	3
MP 02	Ablauf Blauer Salon	04.09.2002	1072	39,3	4	8,2	0,13	4	732	31,67	4	463	1,3	4	7,40	0,01	4
MP 03	Wasserstollen	04.09.2002	1373	3,4	3	8,3	0,00	3	946	2,82	3	466	3,8	3	7,30	0,02	3
MP 01	Seitenstollen	04.09.2002	2294	6,1	3	9,7	0,17	3	1642	6,35	3	493	3,5	3	6,77	0,03	3
MP 06	Ablauf Marmorsaal	13.01.2003	810	9,1	4	2,7	0,19	4	549	6,84	4	459	0,0	4	8,36	0,01	4
MP 05	Grüne Grotte	13.01.2003	941	0,5	4	5,7	0,10	4	640	0,62	4	452	1,3	4	7,99	0,02	4
MP 04	Zulaufsrohr Wasserstollen	13.01.2003	1176	0,5	5	7,2	0,00	5	808	0,98	5	453	1,5	5	7,64	0,02	5
MP 02	Ablauf Blauer Salon	13.01.2003	1184	2,1	3	7,6	0,00	3	812	1,53	3	446	1,2	3	7,60	0,04	3
MP 07	Maschinenschacht	13.01.2003	1237	2,7	5	7,8	0,13	5	850	2,32	5	418	7,2	5	7,78	0,28	5
MP 03	Wasserstollen	13.01.2003	1357	7,0	4	7,8	0,00	4	936	5,70	4	453	1,3	4	7,48	0,02	4
MP 01	Seitenstollen	13.01.2003	2061	4,1	5	9,3	0,00	5	1463	3,29	5	465	0,8	5	7,16	0,02	5
MP 06	Ablauf Marmorsaal	20.01.2003	778	47,5	5	4,4	0,16	5	525	37,69	5	505	1,8	5	8,16	0,08	5
MP 05	Grüne Grotte	20.01.2003	953	0,7	4	5,6	0,20	4	649	0,59	4	511	0,8	4	7,84	0,01	4
MP 04	Zulaufsrohr Wasserstollen	20.01.2003	1191	0,8	3	7,4	0,06	3	817	0,68	3	510	1,5	3	7,57	0,04	3
MP 07	Maschinenschacht	20.01.2003	1240	0,4	5	7,5	0,04	5	852	0,16	5	507	1,2	5	7,45	0,04	5
MP 02	Ablauf Blauer Salon	20.01.2003	1175	26,5	4	7,7	0,06	4	805	21,69	4	515	1,4	4	7,45	0,03	4
MP 03	Wasserstollen	20.01.2003	1349	1,1	4	8,2	0,17	4	928	1,11	4	539	0,0	4	7,34	0,02	4
MP 01	Seitenstollen	20.01.2003	2023	3,9	5	9,3	0,00	5	1434	3,11	5	525	1,5	5	7,11	0,04	5
MP 06	Ablauf Marmorsaal	12.03.2003	769	1,5	4	4,4	0,14	4	519	1,17	4	416	0,0	4	8,17	0,04	4
MP 05	Grüne Grotte	12.03.2003	939	2,5	4	5,2	0,13	4	639	2,07	4	417	1,3	4	7,91	0,01	4
MP 01	Seitenstollen	12.03.2003	1310	119,3	5	7,6	0,05	5	901	91,97	5	441	1,1	5	6,99	0,17	5
MP 07	Maschinenschacht	12.03.2003	1239	1,2	4	7,7	0,10	4	850	1,08	4	410	9,1	4	7,78	0,12	4
MP 02	Ablauf Blauer Salon	12.03.2003	1126	13,7	4	7,7	0,10	4	771	11,39	4	412	2,1	4	7,59	0,03	4

Messpunkt	Bezeichnung	Datum	Lf (µS/cm)	Lf s	Lf n	T (°C)	T s	T n	TDS (mg/L)	TDS s	TDS n	Eh _{korr.} (mV)	Eh _{korr.} s	Eh _{korr.} n	pH	pH s	pH n
MP 06	Ablauf Marmorsaal	21.03.2003	733	2,1	5	4,2	0,17	5	493	1,63	5	429	1,8	5	8,20	0,01	5
MP 05	Grüne Grotte	21.03.2003	903	2,4	5	5,0	0,11	5	613	1,95	5	453	2,9	5	7,88	0,03	5
MP 07	Maschinenschacht	21.03.2003	1233	6,0	5	7,5	0,04	5	847	4,95	5	470	2,5	5	7,41	0,05	5
MP 02	Ablauf Blauer Salon	21.03.2003	990	38,3	5	7,5	0,00	5	678	34,05	5	477	1,9	5	7,51	0,05	5
MP 03	Wasserstollen	21.03.2003	1180	20,1	5	7,8	0,05	5	813	24,45	5	503	1,0	5	7,24	0,06	5
MP 01	Seitenstollen	21.03.2003	1925	20,3	5	9,2	0,05	5	1358	17,78	5	494	2,2	5	7,14	0,12	5
MP 06	Ablauf Marmorsaal	01.04.2003	696	6,5	3	4,9	0,10	3	468	5,55	3	468	0,6	3	8,07	0,05	3
MP 05	Grüne Grotte	01.04.2003	838	4,5	3	5,1	0,10	3	567	4,04	3	462	1,2	3	7,93	0,04	3
MP 07	Maschinenschacht	01.04.2003	1245	2,4	3	7,6	0,00	3	855	2,98	3	455	0,6	3	7,51	0,02	3
MP 02	Ablauf Blauer Salon	01.04.2003	1131	19,6	3	7,6	0,00	3	774	17,31	3	439	3,1	4	7,52	0,06	4
MP 03	Wasserstollen	01.04.2003	1192	12,0	3	7,8	0,12	3	818	10,30	3	457	17,3	3	7,53	0,03	3
MP 01	Seitenstollen	01.04.2003	2045	46,6	4	9,2	0,06	4	1450	41,68	4	447	4,9	4	7,08	0,07	4
MP 05	Grüne Grotte	07.07.2003	948	1,4	4	6,3	0,14	4	645	1,30	4	377	3,4	4	7,55	0,08	4
MP 06	Ablauf Marmorsaal	07.07.2003	700	304,5	3	6,5	0,06	4	482	12,31	4	392	3,2	4	7,40	0,05	4
MP 07	Maschinenschacht	07.07.2003	1261	3,8	4	8,0	0,18	4	866	3,33	4	394	2,9	4	6,71	0,02	4
MP 02	Ablauf Blauer Salon	07.07.2003	1246	2,2	4	8,0	0,13	4	856	1,95	4	399	0,5	4	7,04	0,01	4
MP 03	Wasserstollen	07.07.2003	1237	74,8	5	8,2	0,05	5	849	57,59	5	403	2,9	5	7,03	0,04	5
MP 01	Seitenstollen	07.07.2003	2258	32,2	4	9,5	0,06	4	1604	32,60	4	407	0,0	4	6,80	0,01	4
MP 05	Grüne Grotte	24.10.2003	906	4,2	4	6,7	0,10	4	634	3,53	4	366	0,8	4	7,08	0,02	4
MP 06	Ablauf Marmorsaal	24.10.2003	629	2,4	4	6,8	0,27	4	435	2,17	4	349	0,5	4	7,51	0,26	4
MP 02	Ablauf Blauer Salon	24.10.2003	1098	16,7	4	8,0	0,05	4	772	14,41	4	359	4,8	4	7,06	0,04	4
MP 03	Wasserstollen	24.10.2003	1255	3,8	4	8,3	0,08	4	885	2,90	4	362	1,3	4	7,07	0,02	4
MP 01	Seitenstollen	24.10.2003	2325	148,3	4	9,3	0,17	4	1709	134	4	366	1,5	4	6,77	0,02	4
MP 07	Maschinenschacht	24.10.2003	k.A.			k.A.			k.A.			k.A.			k.A.		
MP 06	Ablauf Marmorsaal	04.11.2003	745	148,9	4	5,4	0,10	4	412	2,10	4	363	2,4	4	8,29	0,06	4
MP 05	Grüne Grotte	04.11.2003	896	8,3	4	6,6	0,06	4	626	6,47	4	374	3,7	4	7,99	0,06	4
MP 07	Maschinenschacht	04.11.2003	1213	4,9	4	8,0	0,10	4	856	4,06	4	392	2,8	4	8,21	0,09	4
MP 02	Ablauf Blauer Salon	04.11.2003	1097	20,9	4	8,0	0,05	4	789	24,72	4	376	1,3	4	7,95	0,04	4
MP 03	Wasserstollen	04.11.2003	1400	145,8	4	8,4	0,05	4	994	126	4	381	2,9	4	7,68	0,02	4
MP 01	Seitenstollen	04.11.2003	2426	75,5	4	9,1	0,10	4	1790	69,46	4	386	2,4	4	7,41	0,04	4

Messpunkt	Bezeichnung	Datum	Lf ($\mu\text{S/cm}$)	Lf s	Lf n	T ($^{\circ}\text{C}$)	T s	T n	TDS (mg/L)	TDS s	TDS n	Eh _{korr.} (mV)	Eh _{korr.} s	Eh _{korr.} n	pH	pH s	pH n
MP 06	Ablauf Marmorsaal	03.02.2004	639	2,2	5	4,0	0,07	5	429	1,59	5	431	1,3	5	8,96	0,04	5
MP 05	Grüne Grotte	03.02.2004	828	0,7	5	4,8	0,05	5	561	0,47	5	431	0,0	5	8,66	0,03	5
MP 07	Maschinenschacht	03.02.2004	1200	3,1	3	7,6	0,06	3	824	3,01	3	438	0,0	3	8,03	0,00	3
MP 02	Ablauf Blauer Salon	03.02.2004	1125	2,2	5	7,6	0,04	5	770	1,71	5	432	0,4	5	8,36	0,03	5
MP 03	Wasserstollen	03.02.2004	1116	7,3	4	7,9	0,06	4	764	6,36	4	433	0,0	4	8,24	0,02	4
MP 01	Seitenstollen	03.02.2004	1817	143,1	5	8,9	0,08	5	1278	120	5	440	2,3	5	7,80	0,11	5
MP 06	Ablauf Marmorsaal	15.03.2004	638	1,3	4	4,2	0,17	4	443	0,98	4	340	0,8	4	7,70	0,01	4
MP 05	Grüne Grotte	15.03.2004	801	2,0	4	5,1	0,06	4	559	1,65	4	338	2,8	4	7,77	0,04	4
MP 07	Ablauf Blauer Salon	15.03.2004	1065	27,1	5	7,5	0,09	5	747	25,44	5	343	0,9	5	8,10	0,14	5
MP 02	Wasserstollen	15.03.2004	971	434,7	5	7,7	0,00	5	826	66,10	5	341	6,7	5	7,89	0,13	5
MP 03	Maschinenschacht	15.03.2004	1186	4,9	4	7,9	0,13	4	838	3,40	4	344	4,3	4	8,88	0,32	4
MP 01	Seitenstollen	15.03.2004	2198	40,8	4	9,0	0,10	4	1611	37,03	4	344	2,1	4	7,28	0,02	4
MP 05	Grüne Grotte	23.06.2004	938	1,9	4	6,2	0,13	4	655	1,97	4	389	7,9	4	7,76	0,03	4
MP 06	Ablauf Marmorsaal	23.06.2004	729	30,3	4	6,4	0,08	4	503	25,17	4	224	9,2	4	7,93	0,03	4
MP 03	Wasserstollen	23.06.2004	1237	27,2	4	8,1	0,13	4	869	22,53	4	400	0,8	4	7,28	0,03	4
MP 02	Ablauf Blauer Salon	23.06.2004	1108	23,4	4	8,2	0,33	4	775	20,78	4	404	0,6	4	7,31	0,02	4
MP 01	Seitenstollen	23.06.2004	1989	14,9	4	9,4	0,00	4	1438	12,87	4	409	0,8	4	6,90	0,02	4
MP 07	Maschinenschacht	23.06.2004	k.A.			k.A.			k.A.			k.A.		0	k.A.		
MP 05	Grüne Grotte	08.07.2004	960	0,7	5	6,2	0,07	5	671	0,61	5	360	0,5	5	7,64	0,01	5
MP 06	Ablauf Marmorsaal	08.07.2004	742	12,0	5	6,5	0,12	5	512	9,60	5	351	1,3	5	7,73	0,04	5
MP 03	Wasserstollen	08.07.2004	1222	56,0	5	8,1	0,11	5	858	45,15	5	350	4,5	5	7,49	0,08	5
MP 02	Ablauf Blauer Salon	08.07.2004	1068	20,1	4	8,1	0,22	4	748	18,37	4	350	4,8	4	7,53	0,08	4
MP 07	Maschinenschacht	08.07.2004	1200	14,4	3	8,7	0,62	3	839	16,77	3	349	0,6	3	7,25	0,00	3
MP 01	Seitenstollen	08.07.2004	2043	29,5	5	9,3	0,05	5	1479	25,44	5	364	3,8	5	7,02	0,08	5
MP 05	Grüne Grotte	15.09.2004	886	124,5	3	6,6	0,12	3	708	4,05	3	414	0,6	3	7,68	0,01	3
MP 06	Ablauf Marmorsaal	15.09.2004	698	12,1	4	6,8	0,00	4	499	10,27	4	405	1,7	4	7,87	0,03	4
MP 03	Ablauf Blauer Salon	15.09.2004	1094	59,8	3	8,0	0,00	3	796	54,65	3	401	1,0	3	7,62	0,03	3
MP 02	Wasserstollen	15.09.2004	1207	10,2	4	8,2	0,00	4	882	10,13	3	423	0,6	4	7,27	0,04	4
MP 07	Maschinenschacht	15.09.2004	1214	7,4	4	8,6	0,64	4	883	3,75	4	429	2,4	4	7,21	0,11	4
MP 01	Seitenstollen	15.09.2004	2128	98,2	4	9,2	0,06	4	1610	92,99	4	425	2,1	4	7,05	0,03	4

Messpunkt	Bezeichnung	Datum	Lf ($\mu\text{S/cm}$)	Lf s	Lf n	T ($^{\circ}\text{C}$)	T s	T n	TDS (mg/L)	TDS s	TDS n	Eh _{korr.} (mV)	Eh _{korr.} s	Eh _{korr.} n	pH	pH s	pH n
MP 05	Grüne Grotte	05.11.2004	939	4,8	3	6,8	0,12	3	680	4,46	3	420	2,0	3	7,15	0,00	3
MP 06	Ablauf Marmorsaal	05.11.2004	646	13,0	3	6,9	0,00	3	461	11,47	3	400	0,0	3	7,59	0,03	3
MP 07	Maschinenschacht	05.11.2004	1225	3,4	3	8,0	0,26	3	894	3	3	419	3,2	3	6,92	0,12	3
MP 02	Ablauf Blauer Salon	05.11.2004	1165	30,1	3	8,1	0,06	3	848	28	3	419	1,5	3	7,01	0,01	3
MP 03	Wasserstollen	05.11.2004	1474	169,3	3	8,4	0,17	3	1086	162	3	423	3,6	3	6,91	0,11	3
MP 01	Seitenstollen	05.11.2004	2300	201,5	4	9,3	0,10	4	1749	199	4	431	1,7	4	6,60	0,02	4
MP 06	Ablauf Marmorsaal	03.02.2005	645	7,6	4	4,1	0,36	4	464	5,68	4	378	4,5	4	7,87	0,13	4
MP 05	Grüne Grotte	03.02.2005	815	8,8	4	5,0	0,10	4	589	7,57	4	382	1,3	4	7,93	0,01	4
MP 07	Maschinenschacht	03.02.2005	1203	0,0	4	7,6	0,00	4	878	0,05	4	425	0,8	4	6,47	0,05	4
MP 02	Ablauf Blauer Salon	03.02.2005	963	6,3	4	7,6	0,08	4	697	6	4	390	0,5	4	7,65	0,01	4
MP 03	Wasserstollen	03.02.2005	1079	7,6	4	7,8	0,08	4	785	6,34	4	363	0,6	4	7,47	0,01	4
MP 01	Seitenstollen	03.02.2005	2023	10,4	4	9,0	0,08	4	1524	10	4	395	0,8	4	7,18	0,02	4

Anhang 14: physiko-chemische Vor-Ort-Parameter (elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, TDS, Redoxpotential und pH-Wert)

Physiko-chemische Vor-Ort Parameter (HCO_3^- , CO_2 , Fe_{tot} und O_2)

Datum	Messpunkt	Beschreibung	HCO_3^- (mg/L)	CO_2 (mg/L)	Fe_{tot} (mg/L)	O_2 (mg/L)	O_2 (%)
13.01.2003	MP 07	Maschinenschacht	219,05	3,3	0,01	k.A.	k.A.
	MP 05	Grüne Grotte	151,01	2,42	0	k.A.	k.A.
	MP 06	Ablauf Mamorsaal	172,37	0,66	k.A.	k.A.	k.A.
	MP 02	Ablauf Blauer Salon	214,47	4,62	0,01	k.A.	k.A.
	MP 01	Seitenstollen	456,09	31,03	0,01	k.A.	k.A.
	MP 03	Wasserstollen	263,59	7,04	0,11	k.A.	k.A.
	MP 04	Zulaufrohr Wasserstollens	221,49	k.A.	0,01	k.A.	k.A.
20.01.2003	MP 07	Maschinenschacht	229,12	7,92	0,03	k.A.	k.A.
	MP 05	Grüne Grotte	166,88	3,96	0,02	k.A.	k.A.
	MP 06	Ablauf Mamorsaal	170,84	1,54	0,02	k.A.	k.A.
	MP 02	Ablauf Blauer Salon	224,23	4,62	0,02	k.A.	k.A.
	MP 01	Seitenstollen	473,18	29,27	0,02	k.A.	k.A.
	MP 03	Wasserstollen	273,66	7,04	0	k.A.	k.A.
	MP 04	Zulaufrohr Wasserstollens	221,18	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
21.03.2003	MP 07	Maschinenschacht	216	11	0,03	2,57	22,10
	MP 05	Grüne Grotte	154,68	2,64	0,14	8,82	70,60
	MP 06	Ablauf Mamorsaal	151,32	1,32	0,61	8,43	66,20
	MP 02	Ablauf Blauer Salon	215,69	7,7	0,03	4,73	40,50
	MP 01	Seitenstollen	453,65	35,65	0,02	2,39	21,60
	MP 03	Wasserstollen	251,08	10,34	0,06	5,30	45,70
15.03.2004	MP 07	Maschinenschacht	225,45	6,16	0,01	2,45	21,20
	MP 05	Grüne Grotte	148,88	9,24	0	9,80	79,90
	MP 06	Ablauf Mamorsaal	131,18	0,44	0,03	10,73	83,70
	MP 02	Ablauf Blauer Salon	226,98	4,4	0	3,26	27,10
	MP 01	Seitenstollen	547,01	80,32	0,02	0,31	3,00
	MP 03	Wasserstollen	326,44	11,22	0,02	1,30	11,70
15.09.2004	MP 07	Maschinenschacht	222,12	9,54	0	k.A.	k.A.
	MP 05	Grüne Grotte	185,49	7,15	0	k.A.	k.A.
	MP 06	Ablauf Mamorsaal	155,44	0,11	0	k.A.	k.A.
	MP 02	Ablauf Blauer Salon	223,62	8,91	0	k.A.	k.A.
	MP 01	Seitenstollen	475,01	83,84	0	k.A.	k.A.
	MP 03	Wasserstollen	265,27	22,22	0	k.A.	k.A.

Anhang 15: physiko-chemische Vor-Ort-Parameter (HCO_3^- , CO_2 , Fe_{tot} und O_2)

Analyse der Hauptionen vom 20.01.2003

Messstelle	MP 02	MP 06	MP 05	MP 07	MP 01
Bezeichnung	Ablauf Blauer Salon	Ablauf Marmorsaal	Grüne Grotte	Maschinen- schacht	Seitenstollen Zulauf zum Wasserstollen
Li ⁺ (mg/L)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Na ⁺ (mg/L)	28,9	19,9	22,4	29	68,5
Na ⁺ (mmol(eq)/L)	1,3	0,9	1	1,3	3
K ⁺ (mg/L)	5,5	3,8	4,0	6,9	22,1
K ⁺ (mmol(eq)/L)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,6
Ca ²⁺ (mg/L)	165	120	135	184	351
Ca ²⁺ (mmol(eq)/L)	8,2	6	6,7	9,2	17,5
Mg ²⁺ (mg/L)	26,7	23,4	27,3	38,6	66,4
Mg ²⁺ (mmol(eq)/L)	2,2	1,9	2,2	3,2	5,5
F ⁻ (mg/L)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
F ⁻ (mmol(eq)/L)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cl ⁻ (mg/L)	66	43	43	38	83
Cl ⁻ (mmol(eq)/L)	1,9	1,2	1,2	1,1	2,3
NO ₃ ⁻ (mg/L)	52	47	63	63	54
NO ₃ ⁻ (mmol(eq)/L)	0,8	0,8	1	1	0,9
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	245	188	238	380	730
SO ₄ ²⁻ (mmol(eq)/L)	5,1	3,9	5	7,9	15,2
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	224,2	170,8	166,9	229,1	473,2
HCO ₃ ⁻ (mmol(eq)/L)	3,7	2,8	2,7	3,8	7,8
Ionenbilanz	3,0	2,1	1,4	0,3	1,4

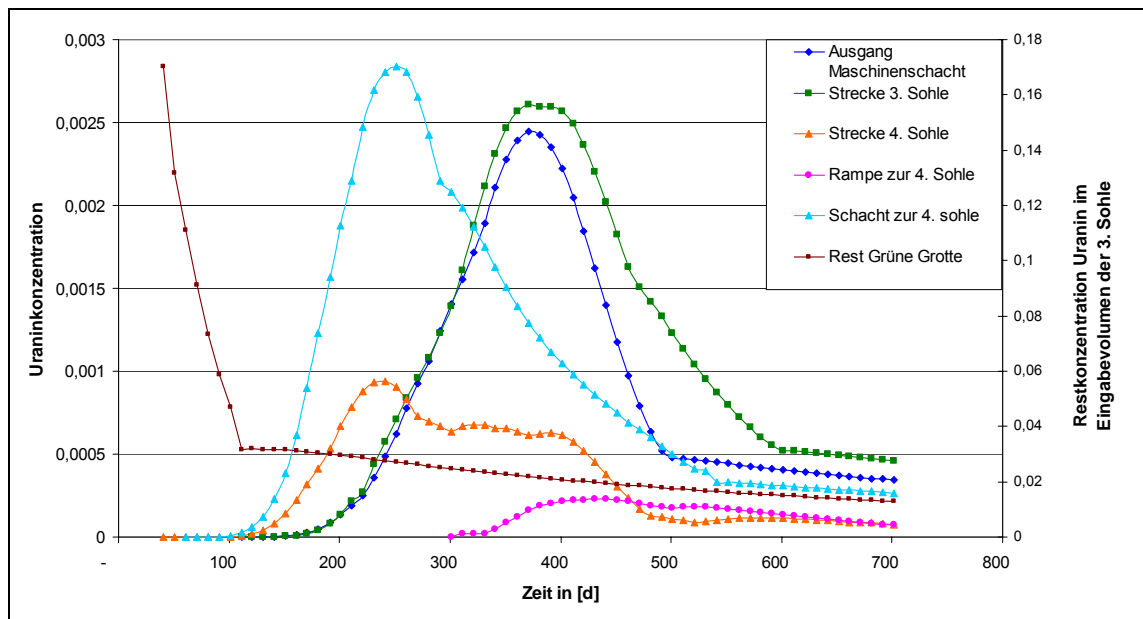
Anmerkung: für die Berechnung der Ionenbilanz wurde zusätzlich HCO₃⁻ aus den physikalisch-chemischen Vor-Ort-Untersuchungen hinzugefügt

Anhang 16: Hauptionenanalyse

Gesteinsanalysen 1867 bis 1975, aus NHUAN & GEISSLER (1986)

	LR [%]	CO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	SiO ₂ [%]	K ₂ O [%]	Na ₂ O [%]	Dolomit-mineral errechnet [%]	Cacit errechnet [%]
KFK	10,4	35	4,7	4,7	48,9						87,2
WHE	0,8	34	0,2	0,2	55,3	0,5				1	98,7
WHE	10,2	37,9	1,1	1,1	48,6	0,9				1,9	86,7
MI	6,5	40,4	n.B.	1,6	49,9	1,2				2,4	89
MI	3,8	41,3	n.B.	1,1	51,2	0,7				1,5	91,2
MI	6,3	41,3	n.B.	0,9	51,8						92,4
MI	1,5	44,5	n.B.	3,3	30,6	19,7				41,3	54,6
NHUAN	11,7		3,4	1,19	46,6	1,13	8,8	0,75	0,15	5,18	78,2
NHUAN	10,7		1,7	1,12	47,6	1,13	8,4	0,7	0,11	5,18	78,3
NHUAN	10,7		2,4	1,26	47,4	1,08	8	0,81	0,12	4,95	79,8
NHUAN	7,3		1,7	1,3	49,8	0,94	5,2	0,48	0,38	4,29	84,9
NHUAN	1		0,4	0,21	54,9	0,39	0,5	0,12	0,11	1,8	94,8
NHUAN	1,1		0,4	0,25	54,7	0,29	0,7	0,16	0,12	1,34	96,3
NHUAN	13,3		3	1,38	46	1,06	9,9	0,83	0,11	4,86	73,4
NHUAN	0,9		0,2	0,16	55,2	0,28	0,4	0,12	0,11	1,29	96,2
NHUAN	9,5		1	1,04	49	0,47	7,9	0,34	0,22	2,17	83,6
NHUAN	4		0,7	0,78	52,6	0,37	2,7	0,29	0,11	1,71	90,9
NHUAN	3,9		0,9	0,47	53,2	0,33	3	0,31	0,17	1,51	92,2
NHUAN	9,1		1,3	1,28	49,3	0,65	6,8	0,6	0,11	2,98	82,7
NHUAN	4,5		0,8	2,08	51	0,76	3,6	0,24	0,1	3,48	84,8
NHUAN	9,4		1,8	0,7	49	0,64	7,1	0,51	0,12	2,91	82,2
NHUAN	0,9		0,2	0,16	54,8	0,25	0,5	0,14	0,11	1,16	95,7
NHUAN	14,1		3	1,48	45,4	1,2	10,5	0,73	0,11	5,51	71,2
Mittelwert	6,6	39,2	1,5	1,2	49,7	1,6	5,3	0,4	0,1	4,7	85,4
LR	HCL unlösliches										
KFK	Ergebnisse von der Kommission für Kalkuntersuchung während der Jahre 1902 - 1906										
WHE	WUNDER, HERBIG und EULITZ 1867										
MI	BERNSTEIN 1955										
NHUAN	NHUAN 1975, VEB Geologische Forschung und Erkundung Halle, Betriebsteil Freiberg										

Anhang 17: ältere Gesteinsanalysen, aus NHUAN & GEISSLER (1986)



Anhang 18: Darstellung der Durchgangskurven von Maschinenschacht, Strecke der 3. Sohle, Restkonzentration im Eingabebereich und zusätzlich Tracerdurchgang durch Rampe und Schacht von 3. Sohle in 4. Sohle