

Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns



GLA

FACHBERICHTE

Nr. 21

Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns

von

B. WAGNER, C. TÖPFNER, G. LISCHIED, M. SCHOLZ, R. KLINGER, P. KLAAS

Herausgeber und Verlag:
Bayerisches Geologisches Landesamt, Heßstr. 128, D-80797 München

GLA Fachbericht 21	250 S.	107 Abb.	15 Tab.	München 2003
--------------------	--------	----------	---------	--------------

ISSN 0932 - 9269

Anschrift der Autoren:

Dr. Bernhard Wagner
Dr. Christoph Töpfer
Martin Scholz
Dr. Richard Klinger
Bayerisches Geologisches Landesamt
Heßstraße 128
D-80797 München

Dr. Gunnar Lischeid
Philipp Klaas
Bayreuther Institut für terrestrische Ökosystemforschung
(BITÖK)
Dr. Hans-Frisch-Str. 1-3
D-95448 Bayreuth

Das Bayerische Geologische Landesamt ist eine Fachbehörde im Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz.

Herausgeber: Bayerisches Geologisches Landesamt
Heßstraße 128, D-80797 München
Redaktion: Dr. Bernd Schilling
Druck: Weber Offset GmbH

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Schlüsselworte: Hydrogeochemie, Grundwasserbeschaffenheit, hydrogeologische Einheiten, Geostatistik

Kurzfassung

Neuere Umweltgesetze und -verordnungen wie das 1999 in Kraft getretene Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) mit den entsprechenden Länderregelungen und die im Jahr 2000 verabschiedete EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) weisen auf die Notwendigkeit einer Kenntnis der natürlichen Hintergrundwerte der hydrogeochemischen Grundwassereigenschaften für die Beurteilung von lokalen Belastungssituationen hin.

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Grundwassers werden wesentlich durch die Petrografie der Grundwasserleiter bestimmt und sind daher an die Geologie gekoppelt. Für die Ermittlung der charakteristischen Beschaffenheit des Grundwassers sind umfangreiche Messdaten erforderlich. Am Bayerischen Geologischen Landesamt werden seit längerem im Rahmen der Hydrogeologischen Landesaufnahme sowie weiterer Projekte Grundwasserproben analysiert. Die Messungen enthalten organoleptische, physikalische und anorganisch-chemische Parameter. Spurenstoffe können bis in den Ultraspurenbereich gemessen werden. Um einen möglichst umfassenden Überblick der hydrogeochemischen Eigenschaften der Grundwässer Bayerns zu gewinnen wurde im Auftrag und mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen der vorliegende Datenbestand durch über 600 Grundwasserproben ergänzt und anschließend eine statistische Auswertung des Gesamtdatensatzes von über 6.600 Wasseranalysen aus mehr als 5.700 Probenahmestellen vorgenommen.

Die untersuchten Grundwasserproben stammen durchwegs aus nicht durch Punktquellen belasteten Standorten und geben somit die Hintergrundwerte der jeweiligen Grundwasserlandschaften wieder. Insgesamt wurde das Probenkollektiv 32 unterschiedlichen hydrogeologischen Einheiten zugeordnet, die nach lithologischen, stratigrafischen und strukturellen Kriterien differenziert wurden. Die Einheiten werden in ihren wesentlichen hydrogeologischen und hydrogeochemischen Eigenschaften beschrieben. Die Darstellung der typischen Verteilung der Messwerte in den hydrogeologischen Einheiten erfolgt mit Hilfe von Piper- und Kreisdiagrammen sowie Tabellen und Spannweitendiagrammen (Perzentilwerte, Minima, Maxima und arithmetische Mittelwerte).

Anhand einer weiterführenden statistischen Untersuchung der Daten mit multivariaten Verfahren ließ sich die vorgenommene Klassifizierung der Grundwasserleiter in signifikant unterschiedliche Datenkollektive der Wasserbeschaffenheit bestätigen. Dabei erwiesen sich insbesondere die bisher in der Hydrogeologie wenig eingesetzten Verfahren der „Selbstorganisierenden Karten“ - eines Typs der künstlichen neuronalen Netzwerke - als hilfreich. Weiterhin konnten mit der Methode großräumige hydraulische Zusammenhänge unterschiedlicher benachbarter Grundwasserleiter identifiziert und hinsichtlich ihrer räumlichen Verbreitung eingegrenzt werden.

Grundwasserleiterspezifische geogene Überschreitungen von Grenzwerten der Trinkwasserverordnung (TrinkWV) bzw. von Prüfwerten nach Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) werden öfter für die Elemente Arsen, Quecksilber, Selen und Aluminium sowie nur vereinzelt für die Elemente Antimon, Blei, Cadmium, Cobalt, Kupfer, Nickel und Zink beobachtet.

Hydrogeochemical background values of groundwater in Bavaria

Key words: hydrogeochemistry, groundwater properties, hydrogeological units, geostatistics

Abstract

Newly established legislature and regulations such as the German Soil Protection Act (ratified in 1999) or the EU Water Framework Directive (effective since 2000) require a knowledge of the natural background values of hydrogeochemical groundwater properties. The aim is assessing the influence of local point sources of pollution on groundwater.

Physical and chemical properties of groundwater are mainly affected by the petrographic properties of aquifers and are therefore linked to geology. The determination of the characteristic properties of groundwater requires large datasets. At the Bavarian Geological Survey, groundwater samples have been analysed for a considerable time within the scope of hydrogeological survey and other related projects. The measurements comprise organoleptic, physical and anorganic chemical parameters. Trace elements can be measured with very high accuracy. In order to obtain an overview of the hydrogeochemical properties of groundwater in Bavaria as detailed as possible, the Bavarian State Ministry for Regional Development and Environmental Affairs (Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen) launched a project in which more than 600 groundwater samples were taken. Subsequently, a statistical analysis of the complete data set (more than 6.600 samples from more than 5.700 sampling locations) was performed.

The evaluated groundwater samples were taken only from locations considered as free from influences of local point sources of pollution. Therefore the samples represent the background values of the respective aquifers. The dataset was allocated to 32 different hydrogeological units which had been separated according to petrographic, stratigraphic and structural criteria. Hydrogeological and hydrogeochemical properties of the units are described. Characteristic distributions of measured values in the different hydrogeological units are presented by Piper and pie diagrams as well as by tables and boxplots (quantiles, minimum, maximum and arithmetic mean values).

Based on a detailed statistical investigation of the dataset with multivariate methods, it could be shown that the presented classification of hydrogeological units results in datasets with significant differences in water properties. In this respect, „Self Organizing Maps“ (SOM) - a type of artificial neural networks - proved to be an efficient tool. With this method it was also possible to identify local groundwater circulation systems in neighbouring hydrogeological units and define the respective areas.

The limit values given in the German Drinking Water Act (Trinkwasserverordnung), respectively the precautionary values of the German Soil Protection Act (Bodenschutzverordnung), are in many cases exceeded geogenically by the elements arsenic, mercury, selenium, aluminium and rather rarely by antimony, lead, cadmium, cobalt, copper, nickel and zinc.

Inhalt

1	Einleitung	7
2	Material und Methoden	8
	2.1 Probenahme und Probenbehandlung	8
	2.2 Analysemethoden	9
	2.3 Datenaufbereitung	16
	2.4 Statistik	17
	2.4.1 Univariate Statistik	18
	2.4.2 Multivariate Statistik	19
3	Hydrogeologische Einheiten	24
	3.1 Grundgebirge und Tertiäre Vulkanite	32
	3.1.1 Paläozoikum ohne Perm	32
	3.1.2 Marmore und Kalksilikatfelse des Kristallinen Grundgebirges	35
	3.1.3 Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges	37
	3.1.4 Tertiäre Vulkanite	42
	3.2 Schichtstufen- und Bruchschollenland	46
	3.2.1 Perm ohne „Zechstein in salinarer Fazies“	46
	3.2.2 Zechstein in salinarer Fazies	49
	3.2.3 Buntsandstein	51
	3.2.4 Muschelkalk	54
	3.2.5 Unterer Keuper	58
	3.2.6 Mittlerer Keuper in salinarer Fazies	60
	3.2.7 Mittlerer und Oberer Keuper in klastischer Fazies	63
	3.2.8 Trias der Bodenwöhrer Bucht	65
	3.2.9 Lias	68
	3.2.10 Dogger	70
	3.2.11 Malm	73
	3.2.12 Kreide	77
	3.2.13 Ries-Trümmermassen	80
	3.3 Braunkohlentertiär	82
	3.4 Quartärschotter mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung	84
	3.5 Alpenvorland	88
	3.5.1 Quartärschotter mit vorwiegend karbonatischer Zusammensetzung	88
	3.5.2 Quartäre Grundwasserleiter im Moränenbereich	91
	3.5.3 Vorlandmolasse	93
	3.6 Alpen	99
	3.6.1 Faltenmolasse	99
	3.6.2 Helvetikum	102
	3.6.3 Flysch	105
	3.6.4 Kalkalpen in vorwiegend karbonatischer Fazies	108
	3.6.5 Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies	113
4	Parameter der Grundwasserbeschaffenheit	117

5	Weiterführende statistische Untersuchungen	134
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	152
7	Danksagung	155
8	Literatur	156
9	Anhang	160
	Anhang 1: Statistische Maßzahlen	160
	Anhang 2: Spannweitendiagramme	193

1 Einleitung

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Grundwassers werden durch die Zusammensetzung des Infiltrationswassers, seine Veränderungen bei der Passage durch die ungesättigte Zone, die Petrografie des Grundwasserleiters sowie die Verweildauer des Wassers im Untergrund bestimmt. Die geogene Grundwasserbeschaffenheit ergibt sich durch die Herausbildung eines dynamischen Gleichgewichtszustands im Kontakt des Grundwassers mit der Gesteinsoberfläche, wobei hier komplexe chemische, physikalische und biologische Prozesse ablaufen (z.B. MATTHESS 1994). Ältere und damit meist tiefere Grundwässer sind praktisch ausschließlich geogen geprägt, während bei jüngeren Wässern zunehmend Oberflächeneinflüsse und damit auch anthropogene Faktoren die Grundwassereigenschaften bestimmen. In solchen Grundwasserleitern können häufig keine rein geogenen Grundwasserbeschaffenheiten mehr ermittelt werden. Die hier betrachteten Hintergrundwerte setzen sich somit aus dem geogenen Grundgehalt und einer je nach Grundwasservorkommen unterschiedlich bedeutsamen Komponente eines ubiquitären diffusen Eintrags in das Grundwasser zusammen.

Am Bayerischen Geologischen Landesamt (BayGLA) werden bereits seit längerem im Rahmen der Hydrogeologischen Landesaufnahme sowie weiterer Projekte Grundwasserproben analysiert, wobei anorganische Spurenstoffe mittels ICP-MS bis in den Ultraspurenbereich gemessen werden können. Für die vorliegende Untersuchung wurden in den Jahren 2001 und 2002 in bisher wenig beprobten Gebieten nochmals über 600 Wasserproben entnommen. Damit liegen inzwischen mehr als 10.000 Wasseranalysen von über 6.000 Probenahmepunkten vor, wobei an mehr als 3.000 Punkten eine Vollanalyse inklusive Spurenelementanalytik vorgenommen wurde. Das Probenkollektiv ermöglicht somit eine detaillierte statistische Betrachtung der Element- und Ionenverteilungen innerhalb der wesentlichen Grundwasserleiter Bayerns. Die Auswahl der für die Auswertung in diesem Fachbericht verwendeten Probenahmepunkte erfolgte durchweg nach dem Kriterium anthropogen möglichst unbelasteter Standorte, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der ausgewertete Datenpool die Hintergrundwerte in Abhängigkeit von der Probenzahl repräsentativ wiedergibt.

Die statistische Auswertung wurde nach hydrogeologischen Einheiten differenziert vorgenommen, die zunächst auf der Basis der hydrogeologischen Teilraumgliederung von Bayern (BÜTTNER et al. 2003) unterschieden wurden. Eine weitere Untergliederung in die 32 betrachteten Einheiten erfolgte zum Teil nach dem hydrogeologischen Bau (z.B. Malm unbedeckt und Malm überdeckt), nach der Tiefe und damit nach dem Grundwasseralter (z.B. Vorlandmolasse flach und Vorlandmolasse tief) sowie nach den geochemischen Eigenschaften der Speichergesteine (saure bis intermediäre und basische bis ultrabasische Gesteine des Kristallinen Grundgebirges).

Eine möglichst genaue Kenntnis der auf die hydrogeologischen Einheiten bezogenen hydrogeochemischen Hintergrundwerte des Grundwassers ermöglicht die Einordnung und Bewertung von vorliegenden Einzelanalysen im regionalen Zusammenhang. Damit können schnell Auffälligkeiten ermittelt und somit auch Hinweise auf lokal vorliegende anthropogene Belastungen gewonnen werden; ebenso können aber auch auffällige Werte unter Umständen als geogen bedingt erkannt werden.

Der vorliegende Fachbericht trägt damit auch Anforderungen Rechnung, die aus neueren Gesetzeswerken entstanden sind. Die in der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) von 1999 genannten Prüf- und Maßnahmenwerte im Zusammenhang mit der Abschätzung des Stoffeintrags aus Altlastenverdachtsflächen und Altstandorten in das Grundwasser können *durch Rückschlüsse oder Rückrechnung aus Untersuchungen im Grundwasserabstrom* erfolgen (BBodSchV 1999, Anhang 1 - Kap. 3.3). Dazu ist, wie in der BBodSchV Anhang 2 - Kap. 3.2 f aufgeführt, *die geogen bedingte Hintergrundsituation der jeweiligen Grundwasserregion (...) bei der Anwendung der Prüfwerte zu berücksichtigen*.

Die im Jahr 2000 verabschiedete EU-Wasserrahmenrichtlinie, deren Ziel u.a. eine Vermeidung der Verschlechterung des Zustands aller Grundwasserkörper und eine schrittweise Reduzierung der Verschmutzung des Grundwassers ist, erfordert ferner *die Beschreibung der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers, einschließlich der Beiträge aus menschlichen Tätigkeiten sowie die Festlegung der natürlichen Hintergrundwerte für die Grundwasserkörper* (Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates, Anhang II 2.2).

Ähnliche Untersuchungen wurden am BayGLA für die Kompartimente Boden (SUTTNER et al. 1998) und Gestein (LINHARDT & ZARBOK 2002) durchgeführt.

Der Auftrag für die vorliegende Studie erfolgte durch das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns“. Die Untersuchung stellt eine Ergänzung zu der von der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung wahrgenommenen Aufgabe der Überwachung der Grundwasserbeschaffenheit dar (z.B. KONARSKE et al. 1998).

Die Anwendungsbereiche liegen überwiegend in der Wasserwirtschaft und im Umwelt- und Bodenschutz, wobei der Nutzerkreis insbesondere aus den Fachbehörden, den Planungs- und Ingenieurbüros sowie den Hochschulen kommt.

2 Material und Methoden

2.1 Probenahme und Probenbehandlung

Die Qualität eines Messwerts der Grundwasserbeschaffenheit wird wesentlich durch die Technik der Probenahme bestimmt. Deshalb werden die Wasserproben am BayGLA in Brunnen, Grundwassermessstellen und nicht ausgebauten Bohrungen (Forschungsbohrungen) prinzipiell mittels Tauch-Motorpumpe über geeignete Probenahmeverrichtungen entweder unmittelbar aus dem Förderstrom der Pumpe oder aus einem Teilstrom des Förderstroms entnommen. Hierbei werden vor Entnahme der Probe auf die lokalen und hydraulischen Gegebenheiten abgestimmte Pumpzeiten und Förderraten eingehalten, um für den zu beprobenden Grundwasserkörper repräsentative Wasserproben zu erhalten. Die Probenahme erfolgt zumindest nach mehrfachem Austausch des Brunnenvolumens, in der Regel aber nach Einstellung der Konstanz der Leitparameter Temperatur, Sauerstoffgehalt, pH-Wert und spezifische elektrische Leitfähigkeit über einen Zeitraum von mindestens fünf Minuten. Während der Probenahme wird der Teilstrom

so gedrosselt, dass ein luft- und verwirbelungsfreies Einfüllen bzw. Unterschichten der Wasserprobe in die Probengefäße gewährleistet ist. Bei Quellen erfolgt die Probenahme in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten unmittelbar in die Probenahmegefäße oder es kommen geeignete Schöpfgeräte wie z.B. Schöpfemer, Kolbenprober etc. zum Einsatz. Die Probenahme wird hier nach Möglichkeit am natürlichen Auslauf der Quelle, unmittelbar in der Quelfassung oder aber am Einlauf in den der Quelle nächstgelegenen Quellsammler vorgenommen. Beim Einsatz der Probenahmegeräte und der Auswahl der zu beprobenden Objekte wird stets auf eine minimale Wechselwirkung zwischen dem Probengut und den Baumaterialien eventuell zu beprobender Wasserfassungen bzw. dem Material der Probenahmegeräte geachtet.

Die Proben werden im Gelände unterschiedlich vorbereitet und konserviert. Eine unbehandelte Probe (250 ml Braunglas mit Glasschliff-Stopfen) dient zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs TOC, eine weitere unbehandelte Probe (1.000 ml Polyethylenflasche) zur Bestimmung von Hydrogenkarbonat über die Säurekapazität bis pH 4,3. Eine mittels Stickstoff als Treibgas steril filtrierte Probe (100 ml Polyethylenflasche) wird zur Bestimmung der Anionen mittels Ionenchromatograph verwendet. Die Kationen der Haupt- und Nebenelemente sowie die Spurenelemente werden aus gleichermaßen mit Stickstoff steril filtrierten und mit 1 ml konz. HNO_3 (Ultrapur) angesäuerten Aliquoten (100 ml Polyethylenflasche) bestimmt. Als Filtermedium dient ein Cellulosenitrat-Membranfilter mit 0,45 μm Porenweite. Alle Proben werden kopfgasfrei in die Probenbehälter abgefüllt und bis zur Analytik im Labor lichtgeschützt und gekühlt transportiert.

2.2 Analysemethoden

Die Grundvoraussetzung für die Auswertung der behandelten Wässer ist die genaue Ermittlung der Wasserbeschaffenheit, die am BayGLA im Rahmen der standardmäßigen Wasseranalytik durchgeführt wird.

Die Bestimmung der Parameter und die Ermittlung der Kenngrößen erfolgt nach den einschlägigen DIN-Normen bzw. dem „Deutschen Einheitsverfahren zur Wasser-, Abfall- und Schlammuntersuchung“ (DEV). Diese Vorschriften sind in Standardarbeitsanweisungen (SOPs) für den täglichen Laborbetrieb genau spezifiziert.

Zur Kontrolle der Analysen wird eine Ionenbilanz durchgeführt. Die zulässige Abweichung beträgt $\leq 5\%$. Sollte der Fehler größer sein, wird ein Teil der Analytik wiederholt. Durch diese Qualitätssicherungsmaßnahme ist die Richtigkeit der Beschreibung der untersuchten Wässer sichergestellt. Bei den Spurenelementen werden zur Qualitätssicherung Kontrollproben untersucht (SRM 1643d, SRM 1640 bzw. diesen entsprechende synthetische Standards). Bei der TOC-Analytik erfolgt eine Überprüfung durch zwei synthetische Kontrollproben.

Im nachfolgenden Abschnitt werden die aktuellen Bestimmungsverfahren näher beschrieben. Die in den Tabellen aufgeführten Nachweis- und Bestimmungsgrenzen sind nach DIN 32 645 ermittelt worden. Je nach Messmethode wurde die Festlegung entsprechend dem Leerwertverfahren oder dem Kalibrierkurvenverfahren durchgeführt. Die Nachweisgrenze (NG) stellt den kleinsten Messwert dar, der mit einer vorgegebenen Sicherheit vom Blindwert zu unter-

scheiden ist. Als Bestimmungsgrenze (BG) wird die kleinste Konzentration (Menge) einer Substanz in einer Probe angegeben, oberhalb der eine quantitative Bestimmung mit einer vorgegebenen Ergebnisunsicherheit möglich ist. Im Konzentrationsbereich der Bestimmungsgrenze wird die Anwesenheit des Analyten vorausgesetzt.

Falls ein Parameter mit mehreren, unterschiedlichen Methoden bestimmt wird, sind die informativen Werte in den jeweiligen Tabellen kursiv grau dargestellt. In die Auswertung fließen die normal gedruckten Werte ein. Bei der Auswahl der jeweiligen Methode zur weiteren Auswertung wurden der lineare Bereich und die Nachweisgrenzen berücksichtigt.

Geländeparameter:

Organoleptik

Als organoleptische Parameter werden mittels sensorischer Prüfung Färbung, Trübung, Bodensatz, Geruch und Filtrerrückstand bestimmt.

pH-Wert

Der pH-Wert wird im Gelände mit einem Taschen-pH-Meter der Firma WTW (pH 340i und temperaturkompensierte Einstabmesskette SenTix 97 T) bestimmt. Es wird eine Zweipunktkalibrierung mit Pufferlösungen pH 4,01 und pH 7,00 bzw. 7,00 und 10,00 vor jeder Messserie durchgeführt. Die Genauigkeit beträgt hier gemäß Angabe des Herstellers ca. $\pm 0,01$ pH.

Spezifische elektrische Leitfähigkeit

Zur Messung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit wird das Cond 340i von WTW mit einer TetraCon 325-Messzelle eingesetzt. Das Ergebnis ist auf eine Referenztemperatur von 25 °C bezogen. Als Kontrollstandard dient eine 0,01 mol KCl-Lösung. Die Genauigkeit beträgt ca. $\pm 0,5\%$.

Sauerstoffgehalt

Zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts dient ein WTW Oximeter Oxi 340i mit einem CelloX 325-Sensor. Es verwendet einen membranbedeckten galvanischen Sensor. Die Kalibrierung erfolgt in wasserdampfgesättigter Luft. Das Gerät kompensiert automatisch den Luftdruck und führt eine Temperaturkorrektur auf 25 °C durch. Der Sauerstoffgehalt in mg/l und die Sauerstoffsättigung in % können für die jeweiligen Messbedingungen direkt abgelesen werden. Die Genauigkeit beträgt ca. $\pm 0,5\%$.

Temperatur

Die Messung der Temperatur erfolgt im Rahmen der Bestimmung der oben aufgeführten Vor-Ort-Parameter pH-Wert, spezifische elektrische Leitfähigkeit oder Sauerstoffgehalt mittels des jeweiligen Taschenmessgeräts der Fa. WTW. Die Genauigkeit beträgt laut Herstellerangaben $\pm 0,1$ K.

Freie Kohlensäure als CO₂

Das gelöste CO₂ wird bereits im Gelände durch Titration mit 0,02 N NaOH (Verbrauch +/- 0,1 ml) bis zum pH-Wert 8,2 bestimmt. Dieser Wert entspricht der Basekapazität bis pH 8,2 und dient zur Beurteilung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts. Für die Bestimmung des pH-Werts wird entweder ein Taschen-pH-Meter der Firma WTW (pH 340i und temperaturkompensierte Einstabmesskette SenTix 41 oder SenTix 81) eingesetzt oder aber der Farbumschlag von Phenolphthalein.

Laborparameter:

Organischer Kohlenstoff TOC/NPOC

Der gesamte organische Kohlenstoff TOC wird mit einem HighTOC der Fa. Elementar bestimmt. Im BayGLA wird die routinemäßige Direktmethode angewendet, da sie eine höhere Genauigkeit zulässt. In einem ersten Schritt wird die Probe mit 0,8% HCl angesäuert und das freigesetzte CO₂ in der Gasphase bestimmt. In der angesäuerten Lösung wird der organische Kohlenstoff bestimmt (Oxidation im Sauerstoffstrom unter Einsatz eines Katalysators). Das hier entstehende CO₂ entspricht i.d.R. dem Anteil an nicht karbonatischem Kohlenstoff. Es wird mittels IR-Detektor quantifiziert.

Tabelle 2.2-1: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen TOC in mg/l (NPOC: nicht austreibbarer, organisch gebundener Kohlenstoff (entspr. TOC); TIC: gesamter anorganischer Kohlenstoff; TC: Gesamtkohlenstoff)

Parameter	Nachweisgrenze	Bestimmungsgrenze
	Kalibriergerade	Kalibriergerade
NPOC	1,35	4,04
TIC	1,22	3,67
TC	2,52	7,57

Säurekapazität, HCO₃

Diese Parameter werden in einer Titrierstation der Fa. Metrohm automatisch bestimmt. Als erster Parameter wird in 100 ml vorgelegter Lösung die spezifische elektrische Leitfähigkeit gemessen. Anschließend bestimmt man den pH-Wert und titriert die Lösung mit 0,1 N HCl (Motorkolbenbürette) bis zu einem pH-Wert von 4,3. Dieser Wert entspricht der Säurekapazität bis pH 4,3 in mmol/l und dient zur Beurteilung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts. Die Hydrogenkarbonatkonzentration in mg/l wird aus der Säurekapazität bis pH 4,3 SK4.3 in mmol/l ermittelt:

$$\text{HCO}_3 \text{ [mg/l]} = \text{SK4.3 [mmol/l]} * 61,017$$

Ionenchromatographie

Es sind drei verschiedene Ionenchromatographen im Einsatz: Zwei Systeme der Fa. Dionex, die jeweils für Anionen und Kationen konfiguriert sind. Diese Ionenchromatographen arbeiten mit elektrischer Suppression.

Tabelle 2.2-2: Anionen Ionenchromatographie: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen bei Anionen in mg/l

Parameter	Nachweisgrenze DX100	Bestimmungsgrenze DX100	Nachweisgrenze Metrohm	Bestimmungsgrenze Metrohm
	Kalibriergerade	Kalibriergerade	Kalibriergerade	Kalibriergerade
Fluorid	0,33	0,99	0,07	0,20
Chlorid	0,48	1,45	0,20	0,60
Nitrit	0,32	0,97	0,16	0,47
Bromid	0,29	0,86	0,17	0,52
Nitrat	1,40	4,20	0,61	1,83
Phosphat	1,08	3,25	1,16	3,47
Sulfat	2,37	7,10	0,99	2,97

Tabelle 2.2-3: Kationen Ionenchromatographie: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen bei Kationen in mg/l

Parameter	Nachweisgrenze DX100	Bestimmungsgrenze DX100	Nachweisgrenze Metrohm	Bestimmungsgrenze Metrohm
	Kalibriergerade	Kalibriergerade	Kalibriergerade	Kalibriergerade
<i>Calcium</i>	0,68	2,05	4,10	12,3
<i>Magnesium</i>	0,42	1,25	1,75	5,26
<i>Kalium</i>	0,87	2,62	0,63	1,90
Ammonium	0,66	1,97	0,86	2,58
<i>Natrium</i>	0,30	0,89	1,34	4,02
<i>Lithium</i>	0,30	0,90	0,20	0,60

Das dritte System der Fa. Metrohm (IC Separation Center 733, IC Interface 762, IC Pump (für Anionen) 709, IC Pump (für Kationen) 709, Suppressor Modul 753, IC Detector 732, Valve Unit 812, Dialysis Unit 754, IC Sample Processor 766) ist umschaltbar für die Bestimmung von Kationen oder Anionen. Dem System ist zur Probenvorbereitung eine Dialyseeinheit vorgeschaltet, was die Untersuchung hoch belasteter Wässer ermöglicht. Bei den Anionen erfolgt eine chemische Suppression.

Das System von Metrohm verfügt über eine empfindlichere Leitfähigkeitsmesszelle, wodurch bei den Anionen bessere Nachweisgrenzen erreicht werden. Dagegen führt das Fehlen eines Suppressors bei der Kationenchromatographie zu einer Verschlechterung der Nachweisgrenzen. Da hier aber lediglich Ammonium zu weiteren Auswertungen herangezogen wird, ist dieser Effekt vernachlässigbar.

Im Einzelnen wurden für die Ionenchromatographen die folgenden Spezifikationen eingesetzt:

Anionen (PO_4^{3-} , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , Br^-)

Säulen:

Dionex: Vorsäule: AG 14A, Hauptsäule: AS 14A, 250 mm, IonPac Guard = Reinigungssäule

Metrohm: Hauptsäule: Metrosep A Supp 4 250 mm, Vorsäule: Metrosep A Supp4/5 mit vorgeschaltetem Dialysesystem

Eluenten:

Dionex: 1,8 mmol Na_2CO_3 , 1,5 mmol $NaHCO_3$

Metrohm: 1,0 mmol Na_2CO_3 und 4,0 mmol $NaHCO_3$

Kalibrierung:

Dionex: F 3,0 mg/l, Cl 12,0 mg/l, NO_2^- 2,0 mg/l, Br 2,0 mg/l, NO_3^- 24,0 mg/l, PO_4^{3-} 5,0 mg/l, SO_4^{2-} 60,0 mg/l

Metrohm: Zweipunktkalibration

Standard 1 : F 0,3 mg/l, Cl 1,2 mg/l, NO_2^- 0,2 mg/l, Br 0,2 mg/l, NO_3^- 2,4 mg/l, PO_4^{3-} 0,5 mg/l, SO_4^{2-} 6,0 mg/l

Standard 2: F 3 mg/l, Cl 12 mg/l, NO_2^- 2 mg/l, Br 2 mg/l, NO_3^- 24 mg/l, PO_4^{3-} 5 mg/l, SO_4^{2-} 60 mg/l

Kationen (NH_4^+ , Li^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})

Säulen:

Dionex: Vorsäule: CG 12A, Hauptsäule: CS 12A 250 mm, IonPac Guard= Reinigungssäule

Metrohm: Metrosep C2, Länge 100 mm, Vorsäule: Guard-Säule für Metrosep C2 mit vorgeschaltetem Dialysesystem

Eluenten:

Dionex: 20 mmol Methansulfonsäure

Metrohm: 4.0 mmol L(+)- Weinsäure und 0.75 mmol Pyridin-2,6-dicarbonsäure

Kalibrierung:

Dionex: Ca 80 mg/l, Mg 20 mg/l, Na 10 mg/l, K 5 mg/l, Li 0.5 mg/l, NH_4 2 mg/l

Metrohm: Zweipunktkalibration

Standard 1: Ca 8,0 mg/l, Mg 2,0 mg/l, Na 1,0 mg/l, K 0,5 mg/l, Li 0,005 mg/l, NH_4 0,2 mg/l

Standard 2: Ca 80 mg/l, Mg 20 mg/l, Na 10 mg/l, K 5 mg/l, Li 0,5 mg/l, NH_4 2 mg/l

Optische Emissionsspektrometrie (ICP-OES)

Die Haupt- und Nebenelemente Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Si, Al, Sr, Ba, Co, Ni, Zn werden routinemäßig mit der ICP-OES bestimmt. Dazu stehen ein Spectroflame (radiales Plasma) der Fa. Spectro und ein Thermo Elemental Iris II (Dual View) zur Verfügung. Beide Geräte sind mit Cross-Flow-Zerstäuber ausgestattet. Für die Kalibrierung werden zehn Standardlösungen verwendet. Sie decken die in den Tab. 2.2-4 und 2.2-5 aufgeführten Konzentrationsbereiche (in mg/l) ab.

Tabelle 2.2-4: ICP-OES: Konzentrationsbereiche der Standardlösungen, die für die Kalibrierung der Elemente Ca, Mg, Na, K, Sr und Fe eingesetzt werden

Kalibrierlösung	Elemente					
	Ca	Mg	Na	K	Sr	Fe
niedrigste Konzentration	0,1	0,02	0,01	0,01	0,025	0,025
höchste Konzentration	400	80	40	40	2,0	2,0

Tabelle 2.2-5: ICP-OES: Konzentrationsbereiche der Standardlösungen, die für die Kalibrierung der Elemente Mn, Al, Ba, Ni, Co und Zn eingesetzt werden

Kalibrierlösung	Elemente					
	Mn	Al	Ba	Ni	Co	Zn
niedrigste Konzentration	0,025	0,025	0,0125	0,0025	0,0025	0,0025
höchste Konzentration	2,0	10,0	1,0	0,2	0,2	0,2

Es werden meist quadratische Kalibrierkurven verwendet. Als Matrix/Leerwert dient eine ca. 0,6%-ige Salpetersäure (Suprapur). Die Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der mit ICP-OES gemessenen Elemente sind in Tabelle 2.2-6 angegeben. Bei den kursiv geschriebenen Elementen wurde für die Auswertungen der genauere Wert der ICP-MS verwendet.

Silicium wird am Spectroflame mit einer eigenen Methode gemessen. Um die Standardabweichungen zu optimieren, sind hier sechs Wiederholungen notwendig. Am IRIS II kann die Untersuchung in einen Messvorgang mit den anderen Kationen erfolgen. In beiden Fällen ist jedoch eine eigene Kalibrierlösung notwendig. Tabelle 2.2-7 gibt die Nachweis- und Bestimmungsgrenzen an.

Tabelle 2.2-6: Haupt- und Nebenelemente ICP-OES: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen bei Kationen in µg/l

Parameter	Nachweisgrenze Spectroflame	Bestimmungsgrenze Spectroflame	Nachweisgrenze IRIS 2	Bestimmungsgrenze IRIS 2
	Leerwertmethode	Leerwertmethode	Kalibriergerade	Kalibriergerade
<i>Al</i>	<i>18,19</i>	<i>72,75</i>	<i>0,11</i>	<i>0,33</i>
Ba	0,21	0,84	0,02	0,06
Ca	27,24	108,9	11,38	34,14
<i>Co</i>	<i>14,02</i>	<i>56,07</i>	<i>0,16</i>	<i>0,49</i>
Fe	2,69	10,78	0,04	0,13
K	57,39	229,5	0,96	2,87
Mg	25,58	102,3	3,12	9,36
<i>Mn</i>	<i>0,50</i>	<i>1,99</i>	<i>0,07</i>	<i>0,21</i>
Na	13,08	52,32	0,37	1,11
<i>Ni</i>	<i>11,71</i>	<i>46,84</i>	<i>0,34</i>	<i>1,02</i>
Sr	0,17	0,67	0,03	0,09
<i>Zn</i>	<i>6,55</i>	<i>26,21</i>	<i>0,13</i>	<i>0,38</i>

Tabelle 2.2-7: Silicium ICP-OES: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen in mg/l

Parameter	Nachweisgrenze Spectroflame	Bestimmungsgrenze Spectroflame	Nachweisgrenze IRIS 2	Bestimmungsgrenze IRIS 2
	Leerwertmethode	Leerwertmethode	Kalibriergerade	Kalibriergerade
Si	0,32	1,27	0,22	0,66

Massenspektrometrie (ICP-MS)

Die Spurenelemente lassen sich in der erforderlichen Empfindlichkeit nur mittels ICP-MS nachweisen.

Im BayGLA wird ein ELAN 600 der Fa. Perkin Elmer eingesetzt. Die Detektion erfolgt standardmäßig im Dual-Mode, so dass ein linearer Messbereich bis ca. 10^7 cps zur Verfügung steht. Kalibriert wird mittels Zweipunktkalibrierung: Als Leerwert dient eine 0,6%-ige Salpetersäure (Suprapur), der Hochstandard enthält die Elemente in den folgenden Konzentrationen:

Elementkonzentrationen (gemessenes Isotop in Klammern):

Li(7) 20 µg/l, Be(9) 20 µg/l, B(10) 1.020 µg/l, Al(27) 50 µg/l, Ti(47) 20 µg/l, V(51) 20 µg/l, Cr(52) 20 µg/l, Mn(55) 20 µg/l, Ni(58) 20 µg/l, Co(59) 20 µg/l, Cu(63) 40 µg/l, Zn(64) 40 µg/l, As(75) 40 µg/l, Se(78) 120 µg/l, Rb(85) 10 µg/l, Sr(87) 100 µg/l, Y(89) 10 µg/l, Mo(95) 20 µg/l, Ag(107) 20 µg/l, Cd(111) 20 µg/l, Sn(120) 20 µg/l, Sb(121) 20 µg/l, Cs(133) 10 µg/l, Ba(135) 20 µg/l, La(139) 10 µg/l, Ce(140) 10 µg/l, Au(197) 100 µg/l, Hg(202) 40 µg/l, Tl(205) 20 µg/l, Pb(208) 20 µg/l, Bi(209) 20 µg/l, Th(232) 20 µg/l, U(238) 20 µg/l, Ca(43) 40.000 µg/l.

Als interner Standard dienen ca. 10 µg/l Rhodium. Dies erfolgt durch Zupipettieren von 0.1 ml 10 mg/l Rh-Lösung. Die genaue Konzentration wird nach dem Auswiegen der Probe berechnet und das Messergebnis entsprechend korrigiert. Nach der Messung von sieben Proben wird eine neue Kalibration durchgeführt, um gerätespezifische Einflüsse (z.B. Drift) weitgehend auszuschließen.

Tabelle 2.2-8: Mit ICP-MS gemessene Spurenelemente: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der Kationen in µg/l

Parameter	Nachweisgrenze	Bestimmungsgrenze
	Leerwertmethode	Leerwertmethode
Ag	0,003	0,013
Al	0,211	0,846
As	0,013	0,051
Au	0,007	0,03
B	0,368	1,472
Ba	0,029	0,116
Be	0,013	0,05
Bi	0,002	0,008
Ca	1,646	6,583
Cd	0,002	0,009
Ce	0,001	0,006
Co	0,001	0,004
Cr	0,048	0,191
Cs	0,0003	0,001
Cu	0,013	0,053
Hg	0,007	0,027
La	0,0003	0,001
Li	0,011	0,043
Mn	0,004	0,015
Mo	0,015	0,06
Ni	0,035	0,14
Pb	0,005	0,021
Rb	0,001	0,006
Sb	0,002	0,007
Se	0,396	1,583
Sn	0,008	0,03
Sr	0,009	0,036
Th	0,002	0,01
Ti	0,048	0,194
Tl	0,001	0,004
U	0,0005	0,002
V	0,007	0,027
Y	0,0003	0,001
Zn	0,025	0,1

Berechnete Parameter

Freie Kohlensäure, Basekapazität 8,2

Die freie Kohlensäure CO₂ in mg/l und die Basekapazität bis pH 8,2 BK8.2 in mmol/l werden aus dem Verbrauch an 0.02 N NaOH (Titration im Gelände) berechnet:

$$\text{CO}_2 \text{ [mg/l]} = x \text{ ml NaOH} * 8,8$$

$$\text{BK8.2 [mmol/l]} = x \text{ ml NaOH} * 0,2$$

Gesamthärte

Die Gesamthärte in °dH wird aus den mit der ICP-OES bestimmten Ca- und Mg-Konzentrationen in mg/l berechnet:

$$\text{GH [°dH]} = ([\text{Ca}]/20,04 + [\text{Mg}]/12,153) * 2,8$$

Karbonathärte

Die Karbonathärte in °dH wird aus Säurekapazität bis pH 4,3 SK4.3 in mmol/l berechnet:

$$\text{KH [°dH]} = \text{SK4.3} * 2,8$$

Gesamtmineralisation

Die Gesamtmineralisation GM in mg/l wird als Summe aus den gemessenen Konzentrationen der folgenden Kationen und Anionen in mg/l berechnet:

$$\text{GM [mg/l]} = [\text{Na}] + [\text{K}] + [\text{Ca}] + [\text{Mg}] + [\text{HCO}_3] + [\text{SO}_4] + [\text{NO}_3] + [\text{Cl}] + [\text{F}] + [\text{Br}] + [\text{PO}_4] + [\text{Fe}] + [\text{Mn}] + [\text{NO}_2] + [\text{Si}] + [\text{NH}_4]$$

Die Analysen werden abschließend bilanziert: Die Summe der Moläquivalente der Kationen soll der Summe der Moläquivalente der Anionen (inkl. HCO_3) entsprechen. Eine Abweichung von maximal $\pm 5\%$ ist zulässig. Bei größeren Abweichungen wird die Analyse wiederholt.

Sättigungsindex (Calciumkarbonat)

Der dimensionslose Calciumkarbonat-Sättigungsindex SI ist ein Maß für die Ausbildung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts im Wasser. Negative Index-Werte zeigen aggressive Kohlensäure, positive Werte eine Calciumkarbonatübersättigung und Werte um Null Gleichgewichtswasser an (HÖLTING 1995). Der SI errechnet sich aus der Differenz des im Gelände gemessenen pH-Werts und dem Gleichgewichts-pH des Wassers:

$$\text{SI} = \text{pH Gelände} - \text{Gleichgewichts-pH}$$

Der Gleichgewichts-pH kann aus den Gehalten an Calcium und Hydrogenkarbonat sowie Korrekturfaktoren nach der TILLMANSSchen Formel (z.B. HÖLTING 1995) berechnet werden.

2.3 Datenaufbereitung

Das ausgewertete Datenkollektiv beruht auf einem Auszug aus der Zentralen Datenbank (ZDB) des BayGLA zum Stichtag 14.11.2002. Der Datensatz beinhaltet über Bayern verteilt insgesamt 6.021 Grundwasseraufschlüsse (Brunnen, Quellen, Grundwassermessstellen und nicht ausgebaute Bohrungen wie z.B. Forschungs- und Erkundungsbohrungen) zu denen 10.441 Grund- bzw. Quellwasserproben mit physikalisch-chemischen Analysedatensätzen unterschiedlichen Untersuchungsumfangs vorliegen. Die weit überwiegende Zahl der meist im Rahmen der hydro-

geologischen Landesaufnahme erhobenen Daten stammt aus den vergangenen beiden Jahrzehnten; die jüngsten Wasserproben datieren auf Juli 2002.

Grundwasserproben aus Bereichen mit bekannter anthropogener Belastung (Industrie- und Gewerbestandorte, Kläranlagen, Deponien etc.) wurden ausgesondert. Die ubiquitäre, diffuse Belastung der Grundwässer durch Landwirtschaft (z.B. Düngung, Bodenmelioration), Verkehr (z.B. Straßensalzung) und Eintrag aus der Luft wurde nicht als Ausschlusskriterium eingebracht und spiegelt sich in Form der jeweiligen ubiquitären Hintergrundbelastung in den Daten wieder. Eine Begrenzung dieser Einflüsse ist dadurch gewährleistet, dass die Proben fast ausnahmslos aus in der Regel gut überwachten und dokumentierten Wasserfassungen öffentlicher und privater Trinkwasserversorger, aus natürlichen Quellen abseits obiger zivilisatorischer Einflüsse oder aber aus tiefer gelegenen und entsprechend gut geschützten Grundwasserstockwerken stammen.

Der überprüfte Datensatz (insgesamt 5.746 Probenahmepunkte mit 6.635 Proben) wurde zunächst in eine ACCESS-Datenbank überführt, wo eine Bereinigung und Homogenisierung der Rohdaten erfolgte. Alle Messgrößen wurden einheitlich benannt und gegebenenfalls durch Umrechnung in einheitliche Maßeinheiten überführt. Messgrößen und abgeleitete bzw. berechnete Parameter wurden auf ihre Konsistenz überprüft und durch entsprechende Vorwärts-/Rückwärtsberechnungen im Falle eines Fehlens des komplementären Parameters (z.B. Säurekapazität bis pH 4,3, Hydrogenkarbonat und Karbonathärte) ergänzt.

Eine Ausreißerkontrolle fand in Form einer Sichtung der einzelparameterbezogenen Konzentrationsverteilungen statt, wobei erkennbar falsche oder unwahrscheinliche Werte verworfen wurden. Ferner erfolgte eine Plausibilitätskontrolle innerhalb des Datensatzes über die analysenbezogene Ionenbilanz sowie über die Betrachtung parameterbezogener Konzentrationsbereiche, die sich gegenseitig ausschließen (vgl. u.a. HÖTZL & WITTHÜSER 1999). Bei der Ionenbilanz wurde ein Fehler bis $\pm 5\%$ toleriert. Analysen außerhalb dieses Fehlerintervalls wurden verworfen.

Um die einzelnen Probenahmepunkte in der statistischen Auswertung gleichgewichtet zu berücksichtigen, erfolgte für mehrfach beprobte Objekte eine Zeitreiheneliminierung durch Mittelwertbildung. Hierfür wurde das arithmetische Mittel verwendet, da sich Mehrfachbeprobungen in der Regel auf zwei bis drei Proben pro Objekt beschränkten. Messwerte kleiner der analytischen Nachweisgrenze gingen in die Mittelwertbildung mit dem Wert Null ein, Messwerte kleiner der Bestimmungsgrenze mit dem halben Wert der jeweiligen Bestimmungsgrenze. Aufgrund der für einige Parameter über den gesamten Probenahmezeitraum veränderten (i.d.R. in neuerer Zeit verbesserten) Nachweis- und Bestimmungsgrenzen müssen hier im unteren Konzentrationsbereich gewisse Unschärfen der ermittelten Perzentilwerte in Kauf genommen werden.

2.4 Statistik

Primäres Ziel dieses Fachberichts ist es, typische Wertebereiche der Stoffkonzentrationen in nicht durch Punktquellen verunreinigten Grundwässern anzugeben. Da sich die Wässer unterschiedlicher lithologischer Einheiten hinsichtlich der Konzentrationsbereiche für die meisten Inhaltsstoffe z.T. deutlich unterscheiden, andererseits aber die Zugehörigkeit zur lithostratigra-

fischen Einheit vorliegt, liegt es nahe, die Konzentrationsbereiche getrennt für die einzelnen lithostratigrafischen Einheiten anzugeben.

Diese Einheiten wurden anhand des vorhandenen Erfahrungswissens nach lithologischen, stratigrafischen und strukturellen Gesichtspunkten ausgewiesen. Im Rahmen der statistischen Untersuchungen des vorliegenden Datensatzes wurde u.a. überprüft, inwiefern sich diese Unterteilung auch nach rein hydrochemischen Gesichtspunkten rechtfertigen lässt, d.h., ob sich die Werteverteilungen der untersuchten Parameter der unterschiedenen Einheiten auch signifikant unterscheiden, und welche Parameter am Besten zur Unterscheidung zwischen den verschiedenen Einheiten geeignet sind. Dabei ist es sinnvoll, nicht nur einzelne Parameter zu betrachten (univariate Analyse), sondern viele Parameter gleichzeitig (multivariate Analyse). So ist zu erwarten, dass sich verschiedene hydrogeologische Einheiten weniger deutlich hinsichtlich der Wertebereiche einzelner Parameter, als vielmehr hinsichtlich der Kombination der Werte verschiedener Parameter unterscheiden.

Darüber hinaus ist eine fundierte Abschätzung der anthropogenen Beeinträchtigung der Grundwasserqualität oftmals nur mittels multivariater Betrachtungen sinnvoll. Beispielsweise können hohe Sulfatgehalte des Grundwassers im Gipskeuper und in der salinaren Fazies des Muschelkalks geogen bedingt sein, während sie in den geringmächtigen Aquiferen der basenarmen Magmatite und Metamorphite des Fichtelgebirges und des Bayerischen Walds auf die langjährigen hohen luftbürtigen Einträge (SAGER et al. 1997) oder in quartären und tertiären Grundwasserleitern auf die Oxidierung geogener Sulfide durch Denitrifikation in landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten (GRISCHEK et al. 2003) zurückzuführen sind. Für jeden dieser drei Fälle ist jedoch das Spektrum der Begleitstoffe deutlich unterschiedlich und kann somit zur Identifizierung der Ursachen genutzt werden.

Im Folgenden werden die verwendeten Verfahren kurz dargestellt. Damit sollen einerseits die Grundprinzipien der Verfahren kurz und allgemein verständlich dargelegt werden. Andererseits werden für den kundigen Leser technische Details der verwendeten Methoden ohne weitergehende Erläuterungen genannt. Detailliertere Angaben zu den meisten hier beschriebenen Verfahren sind z.B. bei HÖTZL & WITTHÜSER (1999), BROWN (1998), SCHÖNWIESE (2000) oder BACKHAUS et al. (2003) zu finden. Verschiedene Typen künstlicher neuronaler Netze werden bei ZELL (1994) in verständlicher Form beschrieben. Das Standardwerk für die Selbstorganisierenden Karten und die Lernende Vektor-Quantisierung stellt KOHONEN (2001) dar.

2.4.1 Univariate Statistik

Die Angabe typischer Konzentrationsbereiche erfolgt über Maßzahlen, die die Verteilung charakterisieren. Dazu gehören die Perzentile, das sind die Messwerte, die von dem jeweils angegebenen Prozentsatz aller Messstellen unterschritten oder gerade erreicht werden. Der Median ist das 50%-Perzentil, also der Messwert, der von der Hälfte aller Messstellen unterschritten oder gerade erreicht wird. Der Median ist im Vergleich zum Mittelwert gegenüber Extremwerten („Ausreißer“) sehr unempfindlich. Die Angabe des Medians ist deshalb auch sinnvoll, wenn ein Großteil der Messwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze liegt.

Eine Vielzahl statistischer Verfahren, einschließlich der Mehrzahl der hier verwendeten Verfahren der multivariaten Statistik, beruht auf der Annahme, dass die betrachteten Werte einer bestimmten Form der Verteilung unterliegen. Daraus lässt sich dann die Wahrscheinlichkeit ableiten, dass ein Messwert innerhalb eines bestimmten Bereiches liegt, wie sie z.B. für die Angabe der Signifikanz eines korrelativen Zusammenhangs benötigt wird. Da diese Verfahren im Vergleich zu den verteilungsfreien (nichtparametrischen) Verfahren zusätzliche Informationen über die Form der Verteilung nutzen, sind sie trennschärfer, können also beispielsweise signifikante Korrelationen besser aufdecken.

In der Regel handelt es sich dabei um eine Normalverteilung, die eine symmetrische Verteilung der Werte um den Mittelwert, und unendlich weit vom Mittelwert entfernte Extrema annimmt. Diese Verteilung ist mit der Angabe von zwei Parametern, dem Mittelwert und der Varianz bzw. der Standardabweichung, eindeutig definiert. Für Stoffkonzentrationen kann eine solche Verteilung allerdings schon allein aus dem Grund nicht angenommen werden, als negative Konzentrationen nicht definiert sind. Darüber hinaus weisen Stoffkonzentrationen sehr oft eine linkssteile Verteilung auf, d.h., ein großer Anteil der Werte liegt in dem relativ engen Bereich zwischen Null und dem Mittelwert, während ein kleiner Prozentsatz der Werte den Mittelwert um ein Vielfaches übersteigt. In diesem Fall ist also der Mittelwert deutlich größer als der Median, wogegen sie bei Vorliegen einer Normalverteilung identisch wären.

Zur Überprüfung, ob die untersuchten Messwerte einer Normal- bzw. log-Normalverteilung unterliegen, wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test mit Lilliefors-Schranken verwendet. Dabei werden die Messwerte der Größe nach sortiert und anschließend die maximale Abweichung der gemessenen Werte von denen einer entsprechenden Normalverteilung als Prüfgröße ermittelt. Aufgrund der ausgeprägten linkssteilen Verteilung der meisten Messwerte wurde, mit Ausnahme des pH-Wertes, der dekadische Logarithmus der Werte verwendet, wodurch sich zumindest annähernd eine Normalverteilung erreichen ließ. Zur Untersuchung auf signifikante Unterschiede zwischen zwei empirischen Häufigkeitsverteilungen wurde der Kolmogorov-Smirnov-Z-Test verwendet.

2.4.2 Multivariate Statistik

Neben der Beschreibung der Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Parameter bildete die Untersuchung multivariater Zusammenhänge einen weiteren Schwerpunkt der statistischen Analyse. Die hierfür verwendeten Verfahren lassen sich im Wesentlichen zwei Zielen zuordnen: Verfahren der Dimensionsreduktion zielen darauf ab, den zahlreiche Parameter umfassenden, hochdimensionalen Datensatz, z.B. unter Ausnutzung von Korrelationen zwischen verschiedenen Messgrößen, so in einen niederdimensionalen Raum abzubilden, dass ein möglichst hoher Prozentsatz der Varianz des Datensatzes erklärt wird. Diese Reduzierung der Dimensionalität kann dann zu einer wesentlich übersichtlicheren Darstellung des Datensatzes genutzt werden, z.B. in Form einer zweidimensionalen Abbildung. Das zweite Ziel der multivariaten Analyse zielt darauf ab, den Datensatz so in Gruppen einzuteilen, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen möglichst groß, und die Unterschiede innerhalb der einzelnen Gruppen möglichst klein sind. Zu unterscheiden ist dabei zwischen dem „überwachten Lernen“, d.h. möglichst optimaler Aufteilung auf vorgegebene Einheiten, und dem „unüberwachten Lernen“ ohne Vorgabe von

Unterteilungen. Dies kann genutzt werden, um den Datensatz übersichtlicher darstellen, da nicht mehr sämtliche Einzelwerte für sämtliche Parameter, sondern nur noch Gruppen von Messstellen mit jeweils typischen Kombinationen der Parameterwerte betrachtet werden. Damit wurde auch die hydrochemische Relevanz der nach stratigrafisch-lithologischen Gesichtspunkten vorgenommenen Unterteilung in hydrogeologische Einheiten überprüft.

Die Wertebereiche der einzelnen Parameter unterscheiden sich z.T. um mehrere Zehnerpotenzen. Dies würde bei den verwendeten multivariaten Verfahren zu einer entsprechend stärkeren Gewichtung der Parameter hoher Zahlenwerte führen. Deshalb wurden die Daten jeweils vor der Analyse, z.T. nach Logarithmieren der Werte (s.o.), z-standardisiert: Für jeden Parameter wurde von den Zahlenwerten jeweils der Mittelwert des jeweiligen Parameters abgezogen und anschließend durch die Standardabweichung der Werte des Parameters geteilt.

Korrelationsanalyse

Zusammenhänge zwischen zwei Parametern lassen sich mittels des Korrelationskoeffizienten quantifizieren. Für lineare Zusammenhänge zweier normalverteilter Größen wird i.d.R. der Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient, auch Pearson-Korrelationskoeffizient genannt, verwendet. Er ist nahe 1 für einen sehr engen, gleichgerichteten Zusammenhang, -1 für einen sehr engen, entgegengesetzten Zusammenhang und nahe 0 für stochastische Unabhängigkeit zwischen den beiden Parametern. Das Quadrat des Pearson-Korrelationskoeffizienten wird als Bestimmtheitsmaß bezeichnet und gibt den Anteil der Varianz der beobachteten Werte an, der durch die Korrelation erklärt wird. Entsprechend wird die Differenz zwischen dem ermittelten Bestimmtheitsmaß und dem maximal möglichen Wert von 1 als nicht erklärte Varianz bezeichnet.

Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse ist ein weithin verwendetes Verfahren der Dimensionsreduktion, das auf den oft beobachteten vielfältigen Korrelationen zwischen einzelnen Parametern beruht. Das Verfahren ist eine Verallgemeinerung der linearen Regression zwischen zwei eng korrelierten Variablen, die sich in einer zweidimensionalen Grafik in dem engen Bereich nahe der Regressionsgeraden anordnen, also im Wesentlichen einer eindimensionalen Verteilung unterliegen. Entsprechend lässt sich ein viele Parameter umfassender, hochdimensionaler Datensatz oftmals in guter Näherung durch einige wenige Hauptkomponenten beschreiben, die sich, ähnlich wie die Regressionsgerade, durch die Summe der mit jeweils unterschiedlichen Faktoren multiplizierten Parameterwerte ergibt. Die Korrelationen zwischen einzelnen Variablen und Hauptkomponenten werden als Ladungen bezeichnet. Die Bestimmung der Hauptkomponenten erfolgt mittels Eigenwertanalyse auf Basis der Kovarianzmatrix, also der korrelativen Zusammenhänge zwischen sämtlichen Parametern. Gemäß des Kaiser-Guttman-Kriteriums wurden nur Hauptkomponenten betrachtet, die einen Eigenwert größer als eins aufwiesen. Um die Unterschiede zwischen den einzelnen Hauptkomponenten möglichst deutlich herauszuarbeiten, wurde die Varimax-Rotation verwendet.

Clusteranalyse

Ziel der Clusteranalyse ist es, den Datensatz so in Gruppen (= „Cluster“) aufzuteilen, dass die Unterschiede zwischen den Gruppen möglichst groß und innerhalb der Gruppen möglichst gering sind. Bei der hierarchischen Clusteranalyse werden entweder die einzelnen Messstellen bzw. Cluster schrittweise zu neuen Clustern zusammengefasst, oder, ausgehend von einem alle Probenahmestellen umfassenden Cluster, sukzessive in immer mehr Cluster aufgeteilt. Bei der Clusterzentrenanalyse wird hingegen der Datensatz in eine vorgegebene Anzahl von Clustern aufgeteilt. Da die Einteilung in Cluster u.U. von wenigen, aber miteinander eng korrelierten Parametern dominiert werden würde, empfiehlt es sich, den Datensatz vorher entsprechend aufzubereiten. Deshalb wurden die Clusteranalysen nicht direkt mit den Messwerten, sondern mit den extrahierten Hauptkomponenten durchgeführt.

Die Klassenbildung erfolgte mit dem Verfahren nach Ward, wobei die Streuung in den Clustern, gemessen als quadrierte euklidische Distanz der Objekte zum jeweiligen Klassenmittelpunkt, minimiert wird. Mit abnehmender Zahl der Cluster wird einerseits die Interpretation der Ergebnisse erleichtert, andererseits nimmt die Streuung zu. Die Entscheidung, welche Clusterzahl als optimal angesehen wird, wurde auf der Grundlage der relativen Zunahme der Streuung getroffen.

Korrespondenzanalyse

Ähnlich wie bei der Hauptkomponentenanalyse handelt es sich bei der Korrespondenzanalyse um ein Verfahren der Dimensionsreduktion. Im Unterschied zu ersterer geht es aber nicht primär um die Identifizierung dominierender Prozesse, sondern darum, Ähnlichkeiten und Gruppierungen in großen, multidimensionalen Datensätzen zweidimensional darstellen zu können. Die Projektion des hochdimensionalen Datensatzes in einen niedrigdimensionalen Raum geschieht durch schrittweise Projektion in einen Unterraum, die so optimiert ist, dass die einzelnen Achsen einen möglichst großen Beitrag zur Erklärung der Varianz leisten.

Voraussetzung für die Korrespondenzanalyse ist, dass keine negativen Werte auftreten. Deshalb wurden die z-standardisierten Daten um den Summand 10 erhöht. Dagegen setzt das Verfahren keine Normalverteilung voraus. Als Entfernungsmaß wurde die nach relativer Häufigkeit gewichtete quadrierte euklidische Distanz (χ^2 c-Distanz) verwendet.

Diskriminanzanalyse

Das Ziel der Diskriminanzanalyse ist es, einen hochdimensionalen Datensatz möglichst gut entsprechend einer vorab vorgenommenen Unterteilung in Klassen aufzuteilen. Damit ist die Diskriminanzanalyse als ein überwachtes Klassifizierungsverfahren einzuordnen. Das Verfahren wurde hier zur Überprüfung verwendet, inwieweit sich die anhand stratigrafisch-lithologischer Kriterien vorgenommene Einteilung in hydrogeologische Einheiten auch in den Beschaffenheitsdaten widerspiegelt, und um zu ermitteln, welche Parameter dabei als Leitstoffe dienen können.

Hier wurde die gebräuchliche lineare Diskriminanzanalyse verwendet. Dabei wird die Unterteilung des Datensatzes mittels linearer Diskriminanzfunktionen vorgenommen. Diese sind Funk-

tionen der Datenwerte, die so optimiert werden, dass die Werte der Funktionen eine möglichst eindeutige Zuordnung zu einzelnen Klassen erlauben. In einem zweidimensionalen Fall könnte eine solche Diskriminanzgerade z.B. zwei Klassen trennen, deren Werte sich in einer zweidimensionalen Grafik links oberhalb bzw. rechts unterhalb der trennenden Geraden anordnen. Da für die Bestimmung der Diskriminanzfunktionen die Mittelwerte der einzelnen Klassen, sowie Varianzen und Kovarianzen zwischen verschiedenen Parametern verwendet werden, sollten die Daten normalverteilt sein. Als Abstandsmaß wurde die euklidische Distanz verwendet.

Selbstorganisierende Karten

Ziel der Selbstorganisierenden Karten ist, wie bei der Korrespondenzanalyse, die Dimensionsreduktion zum Zwecke der grafischen Darstellung. Das Verfahren unterscheidet sich allerdings grundlegend von dem der Korrespondenzanalyse; insbesondere ermöglicht es, auch nicht-lineare Projektionen vorzunehmen. Die Selbstorganisierenden Karten stellen einen Typ künstlicher neuronaler Netze dar. Anders als der Name suggeriert, spielt die Anordnung der abgebildeten Objekte im Raum keine Rolle.

Da dieses Verfahren nicht nur für die Analyse des Datensatzes, sondern auch für die Visualisierung der Ergebnisse der anderen multivariaten Verfahren verwendet wurde, andererseits im Bereich der Hydrogeologie bisher aber weitgehend unbekannt ist, sei es an dieser Stelle etwas eingehender beschrieben. Interessierte Leser seien darüber hinaus an KOHONEN (2001) verwiesen.

Das Verfahren ist in Anlehnung an KOHONEN (2001) in Abb. 2.4.2-1 schematisch dargestellt. Zunächst wird ein Netz erstellt, das aus einer Vielzahl einzelner Einheiten, genannt Knoten, besteht, die in einem regelmäßigen Verband angeordnet sind (Abb. 2.4.2-1a). Jeder Knoten stellt einen Vektor dar, dessen Dimensionalität der Dimensionalität des Datensatzes, d.h. der Anzahl der Parameter, entspricht. Die Knoten werden zu Beginn zufällig initialisiert. Die Säulendiagramme in Abb. 2.4.2-1 symbolisieren die Parameterwerte (hier: 3-dimensionale Vektoren). Das Netz wird „trainiert“, indem nacheinander einzelne Datenvektoren mit den Knotenvektoren des Netzes verglichen werden. Der Knotenvektor, der dem jeweiligen Datenvektor am ähnlichsten ist, wird ein Stück weit diesem Datenvektor angeglichen. Das Gleiche gilt auch für die benachbarten Knotenvektoren, wobei das Ausmaß der Veränderung der Knotenvektoren mit zunehmendem Abstand von dem ähnlichsten Knotenvektor abnimmt (Abb. 2.4.2-1a). Dieses Training wird mit dem kompletten Datensatz durchgeführt und, abhängig von der Größe des Datensatzes und des Netzes, u.U. einige 1.000 mal oder öfter wiederholt.

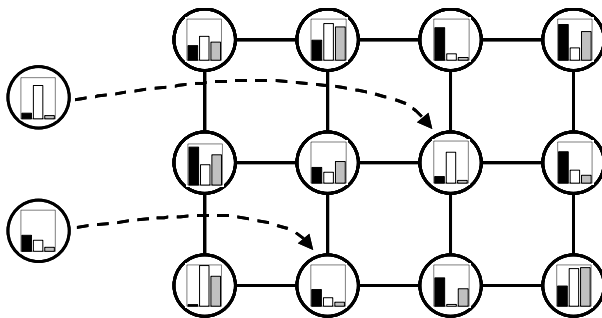
Nach Beendigung des Trainings (Abb. 2.4.2-1b) haben sich einerseits die Knotenvektoren sehr stark den Datenvektoren angepasst, so dass jeder Datenvektor mindestens einem Knotenvektor sehr ähnlich ist. Umgekehrt gibt es aber nach wie vor Knotenvektoren, denen während des Trainings nie ein Datenvektor zugeordnet wurde. Die Knotenvektoren sind jetzt so im Netz angeordnet, dass benachbarte Knotenvektoren einander sehr ähnlich sind. Dadurch werden relativ glatte Strukturen erzeugt, die gut zu interpretieren sind.

Anschließend werden die Koordinaten der Knotenvektoren iterativ verändert, so dass die Abstände zwischen einzelnen Knotenvektoren möglichst umgekehrt proportional zu dem Grad der Ähnlichkeit sind. Dieses Verfahren wird Sammon's Mapping genannt (SAMMON 1969). Dabei

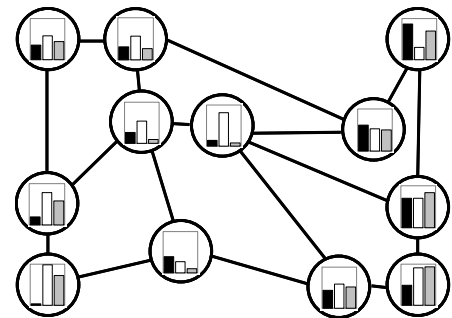
werden die bis dahin in einem regelmäßigen Muster angeordneten Knoten wie in einem elastischen Netz so gegeneinander verschoben, dass die Abstände zwischen den Knoten möglichst proportional den Ähnlichkeiten zwischen den Knotenvektoren sind (Abb. 2.4.2-1c). Als Abstandsmaß wurde die euklidische Distanz verwendet. Für die grafische Darstellung der Ergebnisse wurden schließlich die Knoten, denen im letzten Trainingszyklus kein Datenvektor zugeordnet wurde, sowie die Verbindungen zwischen den Knoten weggelassen (Abb. 2.4.2-1d). Farbig oder durch verschiedene Symbole kodiert lassen sich dann in der grafischen Darstellung die Werte der Knotenvektoren für einzelne Parameter darstellen („Komponentenebene“), oder auch z.B. die Zuordnung der entsprechenden Datenvektoren zu den einzelnen hydrogeologischen Einheiten. Dabei wurden zwar teilweise mehrere Datenvektoren dem gleichen Knotenvektor zugeordnet. Bis auf wenige Ausnahmen handelte es sich dabei aber jeweils um Daten der gleichen hydrogeologischen Einheiten.

Die unterschiedlichen Wertebereiche für die verschiedenen Parameter wurden durch z-Standardisierung ausgeglichen. Ähnlich wie die Korrespondenzanalyse stellt das Verfahren keine Ansprüche an die Verteilung der Werte, so dass die nicht logarithmierten Werte verwendet wurden. Einzelne Fehlstellen werden toleriert, indem die entsprechenden Parameter bei der Berechnung der Distanz zwischen jeweils zwei Vektoren nicht berücksichtigt werden.

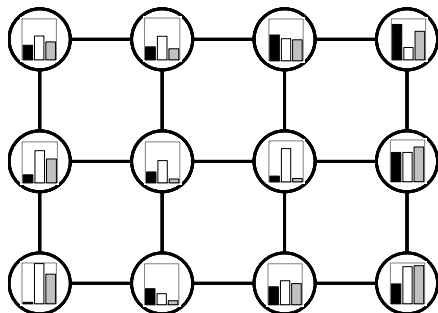
a) Initialisierung und Training



c) Sammon's Mapping



b) Abschluss des Trainings



d) Grafische Darstellung

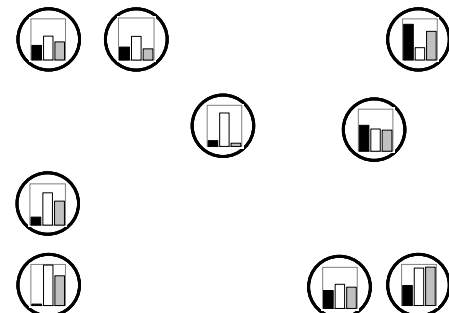


Abb. 2.4.2-1: Prinzip der Erstellung der Selbstorganisierenden Karte und Sammon's Mapping

Lernende Vektorquantisierung

Im Gegensatz zur Selbstorganisierenden Karte dient die Lernende Vektorquantisierung primär der überwachten Klassifizierung, d.h. der Zuordnung der Daten zu vorab definierten Klassen. Insofern handelt es sich um ein nicht-lineares Gegenstück zur linearen Diskriminanzanalyse. Vom Prinzip her entspricht die Lernende Vektorquantisierung allerdings weitgehend der Selbstorganisierenden Karte. Sie unterscheidet sich davon lediglich dadurch, dass während des Trainings Datenvektoren nur jeweils den Knotenvektoren der gleichen Klasse zugeordnet werden, wodurch eine möglichst optimale Repräsentierung der Datenvektoren der Klasse durch relativ wenige Knotenvektoren angestrebt wird.

Verwendete Software

Für die Datenaufbereitung, Ermittlung der Perzentile, Logarithmierung, z-Standardisierung, und für einen Teil der grafischen Darstellungen wurde Microsoft Excel 2000 verwendet. Der überwiegende Teil der multivariaten statistischen Analyse wurde mittels SPSS 10.0.5 (SPSS Inc.) durchgeführt. Für die Erstellung der Selbstorganisierenden Karte, Sammon's Mapping und die Lernende Vektorquantisierung wurden die für wissenschaftliche Zwecke frei verfügbaren Software-Pakete SOM_PAK und LVQ_PAK des Neural Networks Research Center der Helsinki University of Technology, Finnland, verwendet (<http://www.cis.hut.fi/research/som-research/>). Die Aufbereitung der Ausgabe dieser Programme erfolgte mittels eigens erstellter Fortran-Routinen und in Microsoft Excel 2000. Für die grafische Darstellung eines Teils der Ergebnisse sowie für die geostatistische Analyse wurde Surfer 8.00 (Golden Software Inc., Colorado, USA) verwendet.

3 Hydrogeologische Einheiten

Die natürliche physiko-chemische Beschaffenheit des Grundwassers variiert räumlich und zeitlich. Sie ist das Resultat zahlreicher physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse und Reaktionen, wobei der lithologisch-petrografischen Beschaffenheit der Gesteine sowohl in der ungesättigten als auch in der gesättigten Zone eine tragende Rolle zukommt (vgl. u.a. MATTHESS 1994 sowie HÖLTING 1991). Wenn aus den Wechselwirkungen zwischen dem Löse- und Transportmittel Grundwasser und den Gesteinen der hydrogeologischen Einheiten Wässer charakteristischer hydrogeochemischer Eigenschaften resultieren, spricht GERB (1958) von Grundwassertypen.

Dementsprechend wurden die beprobten Grundwässer für die statistische Auswertung der Analysenergebnisse nach hydrogeologischen Einheiten sortiert, die hinsichtlich ihrer lithologisch-petrografischen Ausprägung und damit der zu erwartenden hydrogeochemischen Eigenschaften der Wässer als möglichst homogen anzusehen sind. Dabei wurden lediglich Grundwässer einbezogen, die nur einer der unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten zugeordnet werden konnten (keine Auswertung von Mischwässern).

Maßstabsbedingt sowie in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Probendichte mussten dabei hydrogeologische Einheiten gebildet werden, die sich aus Gruppen von Grundwasserleitern zusammensetzen. In der Auswertung schlägt sich dies insofern nieder, als Gruppen

heterogenerer Gesteinszusammensetzung (z.B. Paläozoikum) in der Regel eine höhere Bandbreite der Variation der Eigenschaften aufweisen als homogenere Einheiten (z.B. Malmkalke der Frankenalb).

Grundlage für die Gruppierung war zunächst die Gesamtliste der hydrogeologischen Einheiten Bayerns, die flächendeckend in der Hydrogeologischen Übersichtskarte von Deutschland (HÜK 200) vorliegen. Die in Bayern vorkommenden hydrogeologischen Einheiten dieses Kartenwerks sind in BÜTTNER et al. (2003) mit ihren wesentlichen hydrogeologischen Eigenschaften aufgelistet. Dort wird weiterhin für den bayerischen Anteil die hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland vorgestellt, die sich in zunehmendem Detaillierungsgrad aus den Ebenen der hydrogeologischen Großräume, Räume und Teilräume zusammensetzt.

Die in den folgenden Kartendarstellungen als Hintergrundlayer verwendeten hydrogeologischen Teilräume Bayerns sind darin als einzelne oder mehrere hydrogeologische Einheiten definiert, die einen regional einheitlichen Bau aufweisen.

Die Gruppierung der hydrogeologischen Einheiten folgt im Wesentlichen der hydrogeologischen Teilraumgliederung, wobei innerhalb dieser Bereiche zum einen eine Zusammenfassung kleinerer lithologisch ähnlich aufgebauter Teilräume (z.B. im Paläozoikum Nordbayerns) und teilweise eine weitere Differenzierung erfolgte. Diese wurde z.B. nach der hydrogeologischen Struktur (z.B. Malm unbedeckt bis teilbedeckt vs. Malm vollständig überdeckt), nach der Tiefe und damit dem Grundwasseralter (z.B. seichte Vorlandmolasse vs. tiefe Vorlandmolasse) sowie nach den geochemischen Eigenschaften der Speichergesteine vorgenommen (z.B. saure bis intermediäre vs. basische bis ultrabasische Gesteine des Kristallinen Grundgebirges bzw. Muschelkalk in karbonatisch-klastischer vs. Muschelkalk in salinarer Fazies).

Die Abb. 3-1 zeigt die Lage der ausgewerteten Probenahmepunkte vor dem Hintergrund der hydrogeologischen Teilraumgliederung Bayerns. Insgesamt wurden 32 hydrogeologische Einheiten unterschieden. Einen Überblick dieser Einheiten, ihrer Zugehörigkeit innerhalb der hydrogeologischen Großräume Bayerns nach BÜTTNER et al. (2003) und der jeweils vorliegenden Anzahl von Probenahmepunkten und Analysen gibt die Tab. 3-1. In Tab. 3-2 sind die Gesteinseinheiten der HÜK 200 aufgelistet, die den jeweiligen hydrogeologischen Einheiten zugeordnet wurden sowie deren Datenbank-ID, Stratigrafie und Petrografie.

Die Beschreibung der hydrogeologischen Einheiten erfolgt einheitlich nach den Kriterien räumliche Verbreitung (mit Abbildungen der jeweiligen Probenahmepunkte als Auszug aus der Abb. 3-1), wesentliche lithologische und hydrogeologische Eigenschaften, Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung und Beschreibung der hydrogeochemischen Eigenschaften. Die Verteilung der Hauptelemente wird durch Piper-Diagramme und Kreisdiagramme dargestellt. In die Rauten der Piper-Diagramme ist die klassifikatorische Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) eingetragen. In die Diagramme gehen die Stoffmengenkonzentrationen als prozentuale molare Äquivalentkonzentrationen ($\text{mmol}(\text{eq})\%$; in den Grafiken abgekürzt als $\text{meq}\%$) ein. Die Kreisdiagramme geben die in $\text{meq}\%$ umgerechneten Medianwerte der Konzentrationen der Parameter über den jeweiligen Gesamtdatensatz wieder und sind damit hinsichtlich der Bilanz von Kationen und Anionen nicht zwangsläufig ausgeglichen. Insofern sind die angegebenen Werte im Sinne eines Gesamttrends und nicht einer Einzelanalyse zu interpretieren.

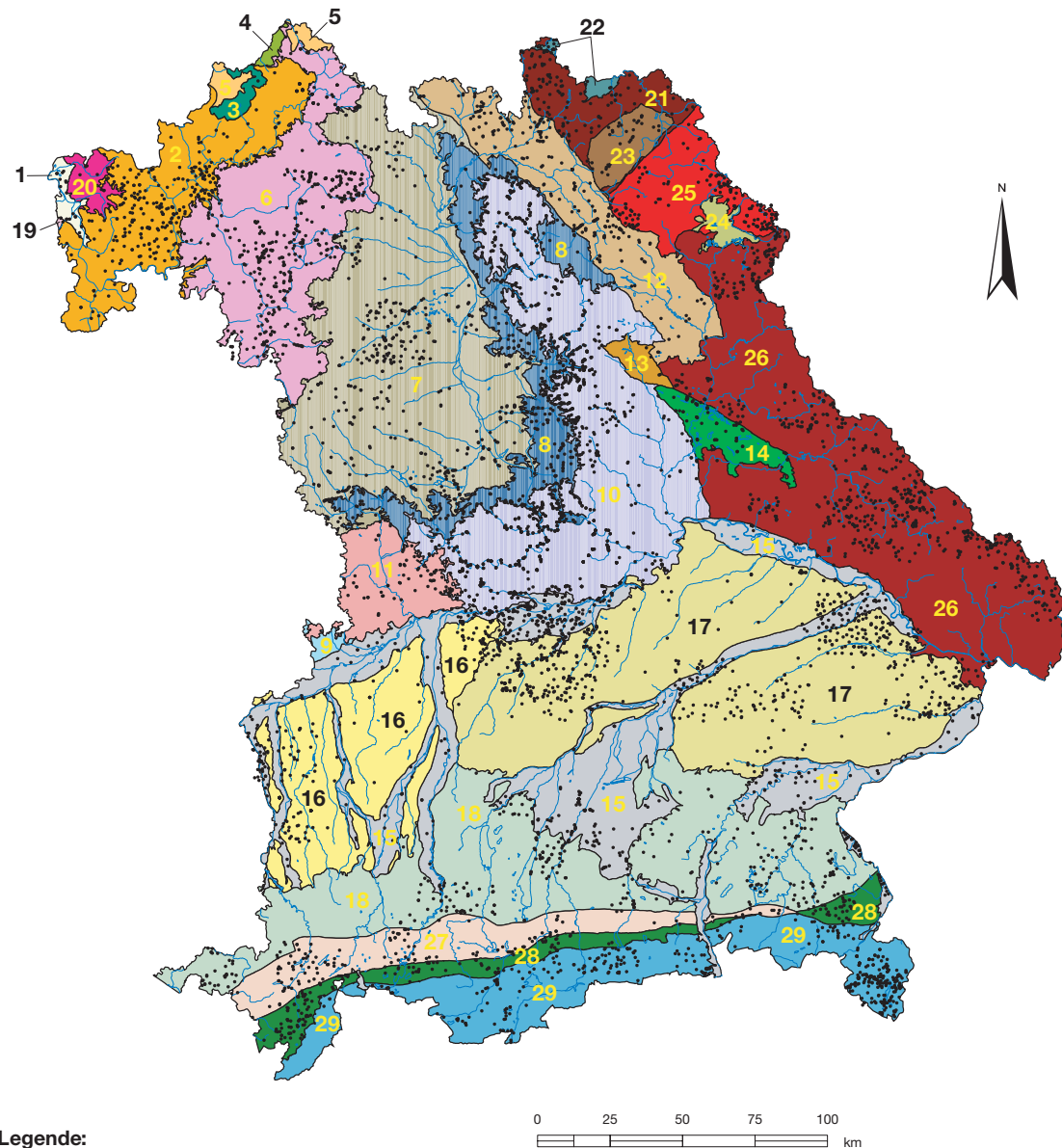


Abb. 3-1: Lage der ausgewerteten 5.746 Probenahmepunkte vor dem Hintergrund der hydrogeologischen Teilraumgliederung von Bayern nach BÜTTNER et al. (2003)

Tabelle 3-1: Die 32 differenzierten hydrogeologischen Einheiten, deren Zugehörigkeit zu den hydrogeologischen Großräumen nach BÜTTNER et al. (2003) und die jeweilige Anzahl von Probenahmepunkten bzw. Proben mit Haupt- bzw. Spurenelementanalytik

Hydrogeologischer Großraum	Hydrogeologische Einheit	Hauptelementanalytik		Spurenelementanalytik	
		Anzahl Probenahme- punkte	Anzahl Proben	Anzahl Probenahme- punkte	Anzahl Proben
Südostdeutsches und Südwestdeutsches Grundgebirge	1.1 Paläozoikum ohne Perm	101	104	42	42
	1.2 Marmore und Kalksilikatfelse des Kristallinen Grundgebirges	8	8	8	8
	1.3 Saure bis intermediäre Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges	733	737	493	495
	1.4 Basische bis ultrabasische Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges	60	61	57	58
	2 Tertiäre Vulkanite	5	5	5	5
Mitteldeutsches und Süddeutsches Schichtstufen- und Bruchschollenland	3.1 Perm ohne „Zechstein in salinarer Fazies“	29	29	16	16
	3.2 Zechstein in salinarer Fazies	11	11	8	8
	3.3 Buntsandstein	338	377	167	174
	3.4 Muschelkalk in karbonatisch-klastischer Fazies	173	192	71	75
	3.5 Mittlerer Muschelkalk in salinarer Fazies	83	86	36	36
	3.6 Unterer Keuper	195	198	56	57
	3.7 Mittlerer Keuper in salinarer Fazies	70	73	29	29
	3.8 Mittlerer und Oberer Keuper in klastischer Fazies	546	577	204	206
	3.9 Trias der Bodewöhrer Bucht	11	14	7	8
	3.10 Lias	31	31	3	3
	3.11 Dogger	253	263	73	77
	3.12 Unbedeckter bis teilbedeckter Malm	657	1.102	271	567
	3.13 Vollständig überdeckter Malm	71	146	64	139
	3.14 Kreide	35	39	19	21
	3.15 Ries-Trümmerrmassen	45	47	44	46
Alpenvorland	4 Braunkohlentertiär	14	14	6	6
	5 Quartärschotter mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung	115	117	45	45
	6.1 Quartärschotter mit vorwiegend karbonatischer Zusammensetzung	724	765	344	369
	6.2 Quartäre Grundwasserleiter im Moränenbereich	261	272	122	123
Alpen	6.3 Seichte Vorlandmolasse	280	340	183	242
	6.4 Tiefe Vorlandmolasse	465	554	320	367
	7.1 Faltenmolasse	60	68	36	37
	7.2 Helvetikum	33	42	28	30
	7.3 Flysch	64	69	47	47
	7.4 Kalkalpen in vorwiegend kalkiger Fazies	139	146	121	122
	7.5 Kalkalpen in vorwiegend dolomitischer Fazies	70	80	43	43
	7.6 Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies	66	68	35	35
Summe über alle 32 hydrogeologischen Einheiten		5.746	6.635	3.003	3.536

Tabelle 3-2: Zuordnung der 32 differenzierten hydrogeologischen Einheiten zu den Gesteinseinheiten der Hydrogeologischen Übersichtskarte 1 : 200.000 (HÜK 200)

Hydrogeologische Einheit	Gesteinseinheit HÜK 200	Datenbank-ID	Stratigrafie	Petrografie
1.1 Paläozoikum ohne Perm	Paläozoische Kalksteine des thür. Schiefergebirges u. Frankenwalds	P FW-Kal	Ordovizium-Karbon	Kalksteine
	Metamorphes Paläozoikum des thür. Schiefergebirges u. Frankenwalds	P FW-Pal	Ordovizium-Karbon	Phyllit, Glimmerschiefer, tlw. in Wechsellagerung mit Quarzit
	Gering durchlässiges Paläozoikum des thür. Schiefergebirges u. Frankenwalds	P FW-Pal-	Kambrium-Karbon	Tonschiefer, Grauwacke, z.T. mit Sandstein wechsellagernd; Quarzit, Phyllit
	Geringfügig durchlässigeres Paläozoikum des thür. Schiefergebirges u. Frankenwalds	P FW-Pal+	Ordovizium-Karbon	Grauwacke, Sandsteine, Konglomerat, Quarzit
	Quarzite des Fichtelgebirges	P FG-Qz	Paläozoikum	Quarzit
1.2 Marmore und Kalksilikatfelse des Kristallinen Grundgebirges	Wunsiedler Marmorzug im Fichtelgebirge	P FG-M	Oberproterozoikum - Altpaläozoikum	Kalksilikatfels, Kalksilikatmarmor, Phyllit
	Paläozoische Kalksteine des Oberpfälzer- und Bayerischen Walds	P BW-Kal	Präkambrium-Paläozoikum	Marmor, Kalksilikatfels
	Paläozoische Metasedimente des Fichtelgebirges	P FG-Pal	Kambrium - Ordovizium	Phyllit, Glimmerschiefer, tlw. in Wechsellagerung mit Quarzit
1.3 Saure bis intermediäre Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges	Metamorphite des Fichtelgebirges	P FG-Gn	Paläozoikum	Gneis, untergeordnet Glimmerschiefer, Phyllit, Quarzit
	Granite des Fichtelgebirges	P FG-Gr	Kambrium-Perm	Granit
	Hoch metamorphe Einheiten der Münchberger Gneismasse	P MGM-Gn	Kambrium - Ordovizium	Gneis, Diorit
	Paläozoische Metasedimente des Oberpfälzer- und Bayerischen Walds	P BW-Pal	Kambrium - Ordovizium	Phyllit, Glimmerschiefer, tlw. in Wechsellagerung mit Quarzit
	Metamorphe Einheiten des Oberpfälzer- und Bayerischen Walds	P BW-Gn	Paläozoikum	Gneis, untergeordnet Glimmerschiefer, Phyllit, Quarzit
	Magmatite des Oberpfälzer- und Bayerischen Walds	P BW-Gr	Paläozoikum	Granit
	Metamorphe Einheiten des Kristallinen Vorspessarts und Odenwalds	P KVS-Gn	Proterozoikum + Devon - Karbon	Gneis, Quarzit, Schiefer
	Pfahl-Quarz des Bayerischen Walds	P BW-Qz	Paläozoikum	Gangquarz, Pfahlquarz
	Granite des Kristallinen Vorspessarts und Odenwalds	P KVS-Gr	Proterozoikum + Devon - Karbon	Granit
	Permische Vulkanite des thür. Schiefergebirges u. Frankenwalds	P FW-PV	Perm	Rhyolithische - andesitische Tuffe, Porphyrbrekie
	Paläozoische bas. Vulkanite des thür. Schiefergebirges u. Frankenwalds	P FW-BV	Altpaläozoikum	Diabas und Vulkanite
1.4 Basische bis ultrabasische Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges	Hoch metamorphe Einheiten der Münchberger Gneismasse	P MGM-Gn	Kambrium - Ordovizium	Amphibolit, Eklogit
	Permische Vulkanite des Fichtelgebirges	P FG-PV	Rotliegend	Rhyolith
	Paläozoische bas. Vulkanite des Fichtelgebirges	P FG-BV	Altpaläozoikum	Diabas und Vulkanite
	Metamorphite des Fichtelgebirges	P FG-Gn	Paläozoikum	Amphibolit
	Permische Vulkanite des Bayerischen Walds	P BW-PV	Rotliegend	Rhyolith
	Magmatite des Oberpfälzer- und Bayerischen Walds	P BW-Gr	Paläozoikum	Gabbro
	Permische Vulkanite des Kristallinen Vorspessarts	P KVS-PV	Rotliegend	Rhyolith
	Vulkanite der Heldburger Gangschar (nur größere Vorkommen)	KV HG	Miozän	Basalt und Tuff
	Tuffe der Rhön	KV R-T	Eozän-Miozän	Basalt-Tuffit und Ton; Basaltdecken-Reste
	Basalte der Rhön	KV R-B	Eozän-Miozän	Basaltische Gesteine
2 Tertiäre Vulkanite	Tuffe des Egergrabens	KV FG-T	Tertiär	Basalttuff, Basaltlehm
	Vulkanite des Egergrabens	KV FG-B	Tertiär	Olivinnephelinit, Nephelinbasanit
	Bröckelschiefer	M 24	Zechstein	Tonstein, Schluffstein, Sandstein, z.T. Geröll führend, Eisensandstein
	Zechstein in karbonatischer Fazies	M 25.1	Zechstein	Kalkstein, Dolomitstein, Mergelstein, Tonstein, Schluffstein, Arkosesandstein
	Zechstein in silikatisch-karbonatischer Fazies	M 25.2	Zechstein	Dolomitstein, Tonstein
3.1 Perm ohne „Zechstein in salinarer Fazies“	Oberrotliegend	M 26	Oberrotliegend	Konglomerat, Sand-, Siltstein, Tuffeinschaltungen
	Unterrotliegend in kohliger Fazies	M 27	Unterrotliegend	Sandstein, Tonstein, Konglomerat, Fanglomerat, Tuffit, Steinkohle
	nicht in HÜK200	-	Zechstein	Dolomitstein, Kalkstein, Gips, Anhydrit, Steinsalz, Kalisalz
3.2 Zechstein in salinarer Fazies	Oberer Buntsandstein in sandig-toniger Fazies	M 21.1	Oberer Buntsandstein	Sandstein, Tonstein, Schluffstein, Quarzit
	Oberer Buntsandstein in sandiger Fazies	M 21.2	Oberer Buntsandstein	Sandstein, Ton- u. Schluffstein; Kaolinsand
	Oberer Buntsandstein in tonig-gipshaltiger Fazies	M 21.3	Oberer Buntsandstein	Tonstein, Sandstein- und Gipslagen
	Mittlerer Buntsandstein in sandig-toniger Fazies	M 22.1	Mittlerer Buntsandstein	Sandstein, fein- bis grobkörnig, Geröll führend; Tonstein, Schluffstein

Hydrogeologische Einheit	Gesteinseinheit HÜK 200	Datenbank-ID	Stratigraphie	Petrografie
	Mittlerer Buntsandstein in sandiger Fazies	M 22.2	Mittlerer Buntsandstein	Sandstein, fein- bis grobkörnig, Geröll führend
	Unterer Buntsandstein	M 23	Unterer Buntsandstein	Sandstein, Ton- und Schluffsteinlagen
3.4 Muschelkalk in karbonatisch-klastischer Fazies	Oberer Muschelkalk in kalkiger Fazies	M 18.1	Oberer Muschelkalk	Kalkstein, Mergelstein, Tonstein
	Oberer Muschelkalk in sandiger Fazies	M 18.2	Oberer Muschelkalk	Sandige Sedimente
	Oberer Muschelkalk in kalkiger Karstfazies (Quaderkalk)	M 18.3	Oberer Muschelkalk	Kalkstein, Mergelstein, Tonstein
	Mittlerer Muschelkalk in sandiger Fazies	M 19.2	Mittlerer Muschelkalk	Sandige Sedimente
	Unterer Muschelkalk in kalkiger Fazies	M 20.1	Unterer Muschelkalk	Kalkstein, Mergelstein, Tonstein
	Unterer Muschelkalk in sandiger Fazies	M 20.2	Unterer Muschelkalk	Sandige Sedimente
	Mittlerer Muschelkalk in verkarsteter Salinarfazies	M 19.1	Mittlerer Muschelkalk	Mergelstein, Mergelkalkstein, Kalkstein, zellig, Dolomitstein; unter Bedeckung Steinsalz, Gips, Anhydrit
3.5 Mittlerer Muschelkalk in salinarer Fazies				
3.6 Unterer Keuper	Unterer Keuper in silikatisch-karbonatischer Fazies	M 17.1	Unterer Keuper	Ton- und Sandstein, z.T. Dolomit- bzw. Kalkstein-Bänke
	Unterer Keuper in karbonatischer Fazies (Grenzdolomit)	M 17.2	Unterer Keuper	Kalkstein, dolomitisch
	Unterer Keuper in silikatischer Fazies (Werksandstein)	M 17.3	Unterer Keuper	Sandstein
3.7 Mittlerer Keuper in salinarer Fazies	Lehrberg-Schichten in toniger Fazies	M 13.1	Mittlerer Keuper	Tonstein, oben Steinmergelbänke; Gips
	Lehrberg-Schichten in sandiger Fazies	M 13.2	Mittlerer Keuper	Sandstein, dolomitische und sandige Lagen, Gips
	Estherien-Schichten	M 15	Mittlerer Keuper	Mergel, Tonmergel- und Tonstein, tlw. Gips führend; Sandsteinlagen
	Unterer Gipskeuper in sulfatischer Fazies (Grundgips)	M 16.3	Mittlerer Keuper	Gips
3.8 Mittlerer und Oberer Keuper in klastischer Fazies	Oberer Keuper (Rhät und Rhät-Lias)	M 09	Oberer Keuper	Sandstein, untergeordnet Tonstein
	Feuerletten	M 10	Mittlerer Keuper	Tonstein; dolomitische u. sandige Lagen
	Burgsandstein in toniger Fazies (Heldburg-Fazies)	M 11.1	Mittlerer Keuper	Wechsel Sand- und Tonstein, einzelne Dolomit-Ausscheidungen
	Burgsandstein in sandiger Fazies	M 11.2	Mittlerer Keuper	Sandstein; Tonsteinlagen (Letten), tlw. Dolomitausscheidungen
	Blasensandstein und Coburger Sandstein	M 12	Mittlerer Keuper	Sandstein, fein- bis grobkörnig mit Tonsteinlagen
	Lehrberg-Schichten in toniger Fazies	M 13.1	Mittlerer Keuper	Tonstein, oben Steinmergelbänke; Gips
	Lehrberg-Schichten in sandiger Fazies	M 13.2	Mittlerer Keuper	Sandstein, dolomitische und sandige Lagen, Gips
	Schilfsandstein	M 14	Mittlerer Keuper	Meist feinkörniger Sandstein, übergehend in Tonstein und Tonsteinlagen
	Estherien-Schichten	M 15	Mittlerer Keuper	Mergel, Tonmergel- und Tonstein, tlw. Gips führend; Sandsteinlagen
	Unterer Gipskeuper in toniger Fazies (Myophorien-Schichten)	M 16.1	Mittlerer Keuper	Tonstein, Mergelstein
	Unterer Gipskeuper in sandiger Fazies (Benker-Sandstein)	M 16.2	Mittlerer Keuper	Wechsel Sandstein u. Tonstein
3.9 Trias der Bodenwöhrer Bucht	Trias (ungegliedert)	M 09-23	Trias	Arkose, Tonsteinlagen
3.10 Lias	Obere Pliensbach- und Toarc-Schichten	M 07	Oberes Pliensbach - Toarc	Tonstein u. Schiefer bituminös, Kalksteinbänke, Mergelstein
	Hettang- bis Untere Pliensbach-Schichten in sandig-kalkiger Fazies	M 08.1	Hettang - Unteres Pliensbach	Sandstein, Tonstein, Mergelstein, Kalkstein
3.11 Dogger	Mittlerer Jura (Eisensandstein - Ornatenton)	M 05	Oberes Aalen-Callov	Sandstein, meist feinkörnig (Eisensandstein), oben Ton-, Mergel- und Kalkstein
	Mittlerer Jura (Opalinuston)	M 06	Unteres Aalen	Mergelstein, Tonstein, bituminöse Ölschiefer und Kalksteinbänke
3.12 Unbedeckter bis teilbedeckter Malm und 3.13 vollständig überdeckter Malm (Differenzierung nach Überdeckung)	Mittlere Kimmeridge- bis Tithon-Schichten	M 02	Kimmeridge-Tithon	Bankkalkstein, Mergelstein, Platten- und Bankkalkstein
	Unteres Kimmeridge in kalkiger Fazies	M 03.1	Kimmeridge	Bankkalkstein, Mergelkalkstein, Mergelstein
	Unteres Kimmeridge in mergeliger Fazies (Lacunosamergel-Formation)	M 03.2	Kimmeridge	Mergelstein mit Kalk- und Kalkmergelsteinbänken
	Oxford-Schichten	M 04	Oxford	Gebankter Kalkstein und Mergelstein; Schwammriff-Kalkstein und basaler Tonstein
3.14 Kreide	Cenoman-Campan (Normalfazies)	M 01.1	Cenoman - Campan	Sandstein; Tonstein, Feinsandstein, tlw. kieselig
	Cenoman-Campan (südl. Albgegend); Kieselkreide	M 01.2	Cenoman - Campan	Sand; Ton, Feinsand, kieselig
	Cenoman-Campan (E Regensburg), Kalkfazies	M 01.3	Cenoman - Campan	Mergel-, Mergelkalk- und Kalkstein
	Cenoman-Campan (Bodenwöhrer Bucht)	M 01.4	Cenoman - Campan	Sandstein; Tonstein, Feinsandstein, tlw. kieselig

Hydrogeologische Einheit	Gesteinseinheit HÜK 200	Datenbank-ID	Stratigraphie	Petrografie
3.15 Ries-Trümmermassen	Seesedimente (randlich) des Ries-Sees	KN 04.1	Miozän	Süßwasserkalk, Kalksand; Konglomerat
	Seesedimente (zentral) des Ries-Sees	KN 04.2	Miozän	Mergel, Ton
	Metamorphes Grund- u. Deckgebirge des Nördlinger Rieses	KN 05	Miozän	Schockmetamorphes Grund- u. Deckgebirge
4 Braunkohlentertiär	Braunkohlen-Tertiär der Rhön	KN 03.1	Miozän	Sand, Schluff, Ton; Kies; Braunkohle; tlw. mit Tuffen
	Braunkohlen-Tertiär des Naab-Gebiets, des Bayerischen Walds und Fichtelgebirges	KN 03.2	Miozän	Ton, Schluff, Sand, Kies, Braunkohle
	Tertiär des Naab-Gebiets, des Bayerischen Walds und Fichtelgebirges	KN 03.3	Miozän	Schluff, Sand, Kies
5 Quartärschotter mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung	Quartäre Flussschotter (silikatisch) der Haupttäler in Nordbayern	KN 01.1	Holozän, z. T. Pleistozän	Kies und Sand, schluffig; tlw. Geröll
	Quartäre Flussschotter (silikatisch) der Nebentäler in Nordbayern	KN 01.2	Holozän, z. T. Pleistozän	Kies und Sand, schluffig; tlw. Geröll
	Quartäre Flusssedimente (silikatisch) in Nordbayern	KN 01.3	Holozän	Ton; Sand und Kies; Schluff
	Quartäre feinkörnige Flusssedimente (silikatisch-karbonatisch) in Nordbayern	KN 01.4	Holozän, z. T. Pleistozän	Ton; Sand und Kies; Schluff
	Quartäre Flussschotter (silikatisch-karbonatisch) der Nebentäler in Nordbayern	KN 01.6	Holozän, z. T. Pleistozän	(Karbonat-)Kies und Sand unter Schluff, tlw. tonig-sandig
	Quartäre Fluss- u. Seesedimente (silikatisch-karbonatisch) in Südbayern	KS 01.1	Holozän, z. T. Pleistozän	Ton; Sand und Kies; Seeton; Schluff
	Quartäre Flussschotter (silikatisch-karbonatisch) der Nebentäler in Südbayern	KS 02.2	Holozän, z. T. Pleistozän	(Karbonat-)Kies und Sand unter Schluff, tlw. tonig-sandig
	Altquartäre - jungtertiäre Höhenschotter (silikatisch)	KS 18.1	Pliozän, Ältestpleistozän	Kies, Sand; tonig
	Quartäre feinkörnige Flusssedimente (karbonatisch) in Nordbayern	KN 01.5	Holozän	Ton; Sand und Kies; Schluff
6.1 Quartärschotter mit vorwiegend karbonatischer Zusammensetzung	Quartäre Flussschotter (karbonatisch) der Nebentäler in Nordbayern	KN 01.7	Holozän, z. T. Pleistozän	(Karbonat-)Kies und Sand unter Schluff, tlw. tonig-sandig
	Quartäre Fluss- u. Seesedimente (karbonatisch) in Südbayern	KS 01.2	Holozän	Ton; Sand und Kies; Seeton; Schluff
	Quartäre Flussschotter (karbonatisch) der Haupttäler in Südbayern	KS 02.1	Holozän, z. T. Pleistozän	(Karbonat-)Kies und Sand unter Schluff, tlw. tonig-sandig
	Quartäre Flussschotter (karbonatisch) der Nebentäler in Südbayern	KS 02.3	Holozän, z. T. Pleistozän	(Karbonat-)Kies und Sand unter Schluff, tlw. tonig-sandig
	Glaziale Schotter (Würm)	KS 03	Würm-Kaltzeit	(Karbonat-)Kies, Sand, schluffig
	Glaziale Schotter (Riß)	KS 06	Riß-Kaltzeit	(Karbonat-)Kies, Sand, Nagelfluh
	Glaziale Schotter (Mindel)	KS 09	Mindel-Kaltzeit	Kies, Sand, Nagelfluh
	Glaziale Deckenschotter (Haslach)	KS 12	Haslach-Kaltzeit	Kies, sandig, mit Nagelfluh
	Glaziale Schotter (Günz)	KS 13	Günz-Kaltzeit	Kies, sandig, mit Nagelfluh
	Glaziale Schotter (Donau)	KS 16	Donau-Kaltzeit	(Karbonat-)Kies, Sand, Nagelfluh
	Glaziale Schotter (Biber)	KS 17	Biber-Kaltzeit	Karbonatkies, sandig-schluffig; Nagelfluh
	Altquartäre - jungtertiäre Höhenschotter (karbonatisch)	KS 18.1	Pliozän, Ältestpleistozän	Kies, Sand; tonig
	Glaziale Moränenablagerungen (Würm)	KS 05	Würm-Kaltzeit	Geschiebemergel, Schluff, Sand, Kies und Steine
	Glaziale Moränenablagerungen (Riß)	KS 08	Riß-Kaltzeit	Kies, Sand, Schluff, Mergel; Geschiebemergel
6.2 Quartäre Grundwasserleiter im Moränenbereich	Glaziale Moränenablagerungen (Mindel)	KS 11	Mindel-Kaltzeit	Kies, Sand, Schluff; Mergel
	Glaziale Moränenablagerungen (Günz)	KS 15	Günz-Kaltzeit	Kies, Sand, Schluff, Mergel, Nagelfluh
	Hangendserie der OSM	KS 19	Miozän	Kies, Sand, Schluff; mergelig
	Vollschotter der OSM	KS 20	Miozän	Sandiger Fein-Grobkies mit eingeschalteten Feinsedimenten
6.3 Seichte Vorlandmolasse, und 6.4 tiefe Vorlandmolasse (Differenzierung nach Tiefenlage)	Fluviatile Süßwasserschichten der OSM	KS 21	Miozän	Sand, Ton, Schluff, Mergel
	Limnische Untere Serie der OSM	KS 22	Miozän	Ton, Schluff, Mergel, Sand, humos-tonige Einschaltungen
	Pitzenbergschotter, Steinbergschotter, Liegendsande, Ortenburger Schotter der OSM	KS 23	Miozän	Kies und Sand, meist aus Quarz, oben Quarzkonglomerat
	Obere Brackwassermolasse und Oncophora-Schichten	KS 24	Miozän	Ton, Schluff, Mergel, Sand, Süßwasser-Kalkstein
	Treibacher Sande der OMM	KS 25	Miozän	Feinsand, glimmerig, glaukonitisch
	Braunauer Schlier der OMM	KS 26	Miozän	Schluff - Ton, feinsandig, mergelig, dünne Feinsandlagen

Hydrogeologische Einheit	Gesteinseinheit HÜK 200	Datenbank-ID	Stratigraphie	Petrographie
	Glaukonitsande, Rieder Schichten der OMM	KS 27.1	Miozän	Sand und Mergel, dünnsschichtig; Feinsandlagen und Sand, glaukonitreich; Feinkies, Sand, Schluff, Mergel; Kalkstein
	Mehrnbacher Sande der OMM	KS 27.2	Miozän	Sand, dünne Schlufflagen, mergelig
	Neuhofener Schichten der OMM	KS 28	Miozän	Schluff, Sandmergel, Mergel
	USM und Hauchenbergsschichten (ungegliedert)	KS 29.1	Eger-Eggenburg	Konglomerat, Sandstein, Mergelstein
	UBM (ungegliedert)	KS 29.2	Eger	Tonstein, Mergelstein, Sandstein, z.T. mit Kohleflözchen
7.1 Faltenmolasse	UMM (ungegliedert)	KS 29.3	Eger	Sandstein, Tonmergelstein
	Tonig-mergelige Schichten der Faltenmolasse	AM 01.1	Tertiär	Tonmergelstein, Mergelstein
	Sandige und konglomeratische Schichten der Faltenmolasse	AM 01.2	Tertiär	Sandstein, Mergelstein, Konglomerat
7.2 Helvetikum	Cyrenenschichten der Faltenmolasse	AM 01.3	Tertiär	Mergelstein, z.T. Kohleflöze
	Alttertiär des Helvetikums	AH 01	Eozän	Sandstein, Mergelstein, Kalkstein
	Wang-, Dreiangelschichten, Gerhardsreuther Schichten, Pattenauer- und Pinswanger Schichten	AH 02	Maastricht	Mergelstein, Kalkstein
	Amdener Schichten	AH 03	Coniac	Mergelstein
	Seewerkalk	AH 04	Oberapt-Turon	Kalkstein
	Grünsand-Schichten	AH 05	Oberapt-Turon	Sandstein
	Schraffenkalk	AH 06	Unterapt	Kalkstein
	Drusberg-Schichten	AH 07	Barreme-Unterapt	Mergelstein und Kalkstein
	Kieselkalk	AH 08	Obervaleud-Hauterive	Kalksandstein, Kieselkalkstein, Kalkstein
7.3 Flysch	Bleicherhorn-, Hällritzer-, Piesenkopf-, Zementmergelserie	AF 01	Obere Kreide	Sandstein, Mergelstein, Kalkstein
	Reiselsberger Sandstein	AF 02	Cenoman-Turon	Sandstein, Mergelstein
	Oferschwanger Schichten	AF 03	Alb-Cenoman	Sandstein, Mergelstein, Kalkstein
	Quarzit-Serie	AF 04	Apt-Alb	Quarzsandstein, Mergelstein, Tonstein
	Tristel-Schichten	AF 05	Barreme-Apt	Sandstein, Mergelstein, Kalkstein
7.4 Kalkalpen in vorwiegend kalkiger Fazies	Gosau	AK 01	Coniac-Paläozän	Sandstein, Konglomerat, Brekzie, Kalkstein
	Neokom-Aptychen-Schichten, Tannheimerschiefer	AK 03	Valangin-Alb	Mergelkalkstein, Kalkstein, Tonmergelstein
	Malm-Aptychen-Schichten und Oberalm-Schichten	AK 04.1	Malm	Kalkstein, Mergelstein
	Malm-Radiolarit	AK 04.2	Malm	Kieselgestein
	Lias-Dogger in Beckenfazies (Allgäuschichten)	AK 05.1	Lias-Dogger	Mergelkalkstein, Kieselkalkstein, Tonmergelstein
	Lias-Dogger in Schwellenfazies - Bunte Kalke (z.B. Hierlatzkalk, Adneter Kalk, Geiselsteinkalk)	AK 05.2	Lias-Dogger	Kalkstein
	Kössener Schichten	AK 06	Rhät	Tonmergelstein
	Obertrias-Kalke (Oberrhätalk, Plattenkalk)	AK 07.2	Nor-Rhät	Kalkstein
	Obertrias-Kalke (Dachsteinkalk)	AK 07.3	Nor-Rhät	Kalkstein
	Wettersteinkalk	AK 10.1	Ladin	Riff-Kalkstein
	Partnachschichten	AK 11	Ladin	Tonstein mit Kalk- und Mergelbänken
	Hallstätter Kalk	AK 12	Ladin-Nor	Kalkstein
	Alpiner Muschelkalk	AK 13	Anis-Ladin	Kies und Sand, schluffig; tlw. Geröll
	Obertrias-Dolomite (Hauptdolomit, Dachsteindolomit)	AK 07.1	Nor-Rhät	Dolomitstein
	Wettersteindolomit, Ramsaudolomit	AK 10.2	Ladin	Riff-Dolomitstein
7.5 Kalkalpen in vorwiegend dolomitischer Fazies				
7.6 Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies	Raibler Schichten	AK 08	Karn	Sandstein und sandiger Tonschiefer, tlw. kohlige Lagen, Kalkstein, örtlich Gips
	Reichenhaller Schichten	AK 14.1	Anis	Dolomitstein, Dolomitbrekzien, Rauwacke, örtlich Gips

Der Anhang 1 enthält die Tabellen mit den statistischen Maßzahlen der Beschaffenheitsparameter der differenzierten hydrogeologischen Einheiten (Anzahl der Probenahmestellen und Proben, Anzahl der gemessenen Werte kleiner Nachweisgrenze, Minimum, 10%-Quantil, 25%-Quantil, Median, 75%-Quantil, 90%-Quantil, Maximum, arithmetischer Mittelwert). Die Aufbereitung der Daten ist in Kap. 2.3 beschrieben.

Im Anhang 2 wird für die unterschiedlichen Beschaffenheitsparameter mit Spannweiten- diagrammen („Boxplots“) eine grafische Übersicht der charakteristischen Verteilung der Werte innerhalb der unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten gegeben; im Kap. 4 erfolgt eine Kurzbeschreibung der Verteilungsmuster der Werte in den hydrogeologischen Einheiten.

3.1 Grundgebirge und Tertiäre Vulkanite

Innerhalb der hydrogeologischen Großräume Südostdeutsches und Südwestdeutsches Grundgebirge (vgl. BÜTTNER et al. 2003) werden die folgenden hydrogeologischen Einheiten unterschieden:

- *Paläozoikum ohne Perm*
- *Marmore und Kalksilikatfelse des Kristallinen Grundgebirges*
- *saure bis intermediäre sowie*
- *basische bis ultrabasische Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges*

Aus systematischen Gründen wurden in diese Gruppe die Tertiären Vulkanite aufgenommen, deren räumliche Verbreitung sich aber außer auf das Grundgebirge auch auf das Süddeutsche Schichtstufen- und Bruchschollenland sowie das Mitteldeutsche Bruchschollenland erstreckt. Ferner finden sich in den Großräumen Probenahmepunkte aus dem Braunkohlentertiär (Kap. 3.3) sowie den Quartärschottern mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung (Kap. 3.4).

3.1.1 Paläozoikum ohne Perm

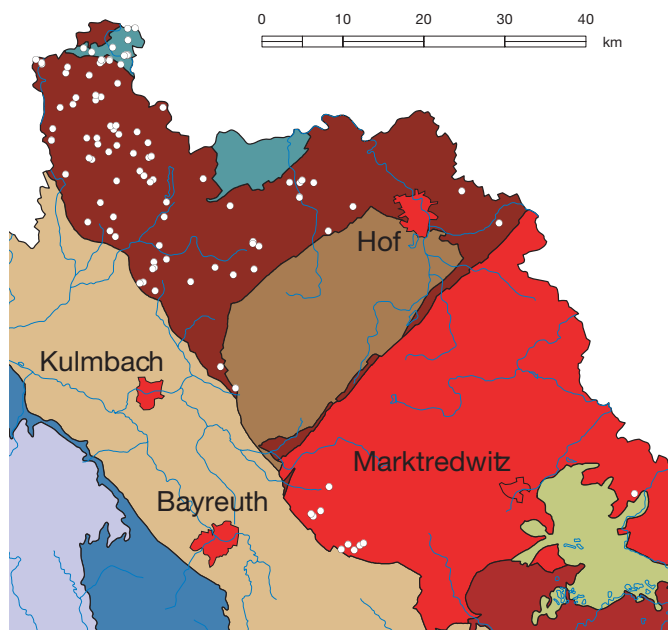


Abb. 3.1.1-1 Lage der 101 Probenahmepunkte aus dem Paläozoikum ohne Perm

Die hydrogeologische Einheit Paläozoikum ohne Perm umfasst im Wesentlichen das Südostdeutsche Schiefergebirge, das sich aus dem Ostthüringisch-fränkisch-vogtländischen Synklinalbereich (Fränkisches Schiefergebirge) und dem Antiklinalbereich des Thüringischen Schiefergebirges zusammensetzt. Ferner zugehörig sind die niedrig metamorphen Paragesteinsserien am SW-Rand des Fichtelgebirgs-Erzgebirgs-Paläozoikums. Die lithologischen Glieder im Fränkischen Schiefergebirge sind im Wesentlichen Grauwacken, Konglomerate und Tonschiefer, im Fichtelgebirge niedergradig metamorphe Quarzite. Der Gesteinschemismus ist allgemein silikatisch. Insgesamt handelt es sich im paläozoischen Grundgebirge primär um Grund-

wasser gering leitende, silikatische Einheiten mit je nach Lithologie geringen bis äußerst geringen Durchlässigkeitsbeiwerten. Die Grundwasserergiebigkeit ist allgemein gering und von den lokalen Kluftverhältnissen abhängig (Kluft-Grundwasserleiter). Aufgrund des Fehlens mächtigerer bindiger Deckschichten ist das Grundwasser generell als sehr verschmutzungsempfindlich zu bewerten. Die Grundwasservorkommen sind meist ungespannt und in wasserwirtschaftlicher Hinsicht lediglich für die lokale Wasserversorgung von Bedeutung.

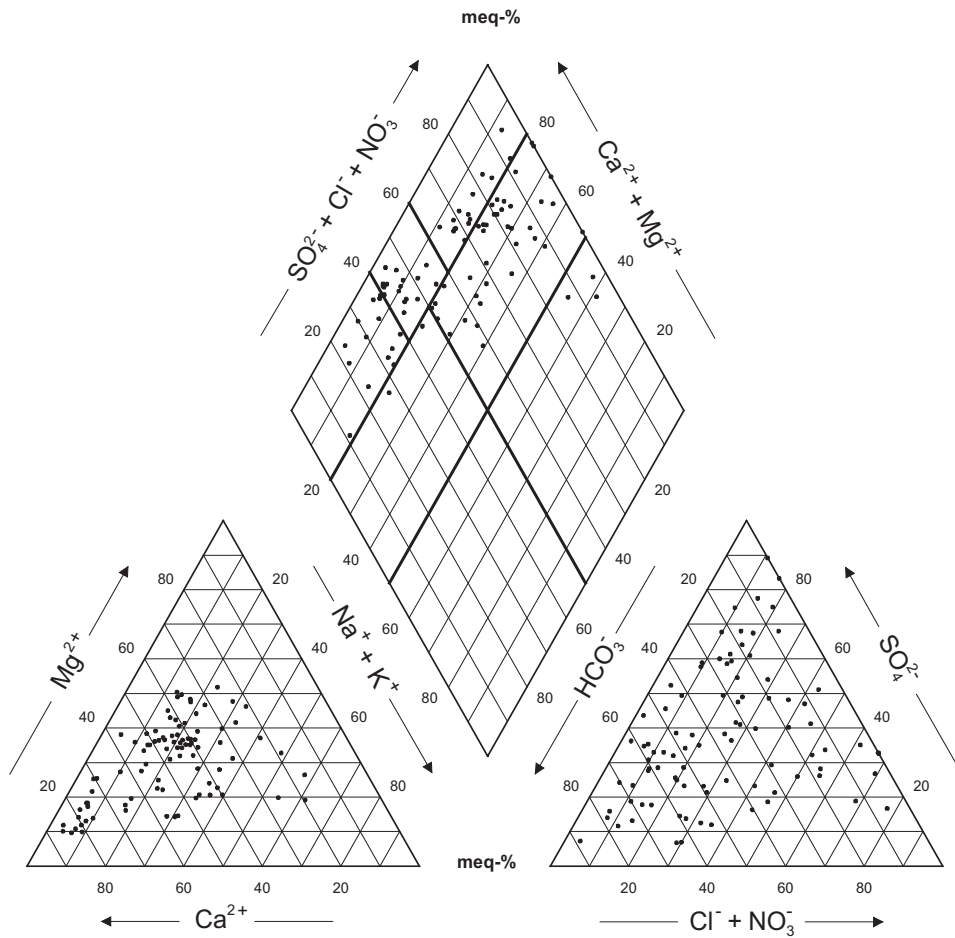


Abb. 3.1.1-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Paläozoikum ohne Perm im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (90 Probenahmestellen)

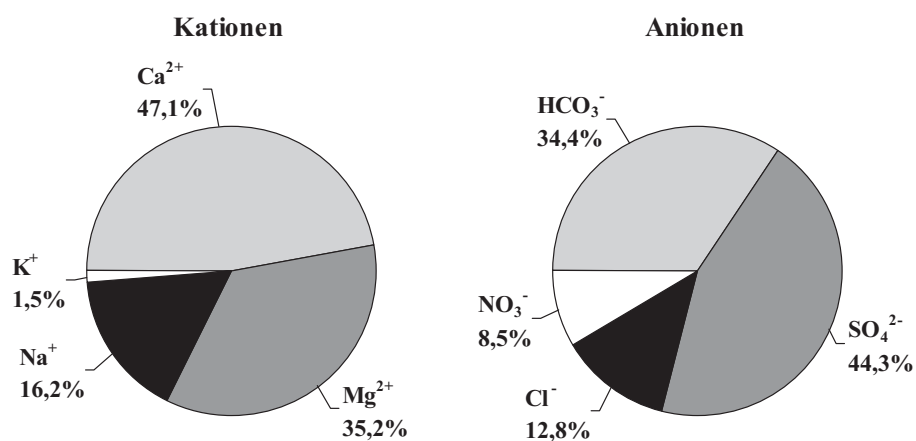


Abb. 3.1.1-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Paläozoikum ohne Perm

Von den Grundwässern aus dem Paläozoikum ohne Perm liegen Analysenergebnisse aus 101 Probenahmestellen mit 42 Vollanalysen vor (vgl. Abb. 3.1.1-1).

Die Verteilung der Hauptkationen ist in den untersuchten Wässern ausgesprochen variabel, wobei aber generell eine Vormacht der Erdalkalimetalle, und hier vor allem von Calcium, über die Alkalimetalle Natrium und Kalium festzustellen ist. In einzelnen Wässern erreichen jedoch auch die Alkalielemente relative Anteile bis über 60 meq-%, die dann in der Regel auf erhöhte Natriumgehalte zurückzuführen sind (Abb. 3.1.1-2 und Abb. 3.1.1-3). Die Verhältnisse der Hauptanionen sind extrem variabel und streuen im gesamten Anionendreieck, so dass die Wässer im Vierstoff-Diagramm nach der Klassifikation von FURTAKE & LANGGUTH (1967) ein breites Band von „normal erdalkalischen Wässern, überwiegend hydrogenkarbonatisch“ über „erdalkalische Wässer, hydrogenkarbonatisch-sulfatisch“ bzw. „erdalkalische Wässer, überwiegend sulfatisch“ sowie „erdalkalische Wässer mit höherem Alkaligehalt, überwiegend sulfatisch (untergeordnet auch sulfatisch-chloridisch)“ bis hin zu „alkalischen Wässern, überwiegend sulfatisch-chloridisch“ belegen. Die Ursachen hierfür sind die hohe Variation der Grundwasserleitergesteine, aber auch eine anthropogene Beeinflussung vor dem Hintergrund des allgemein sehr geringen Lösungsinhalts.

Die Wässer aus dem Paläozoikum ohne Perm sind, wie für silikatisch geprägte Wässer üblich, generell sehr niedrig mineralisiert. Die Gesamtmineralisation von 80% der Wässer liegt zwischen 55 und 310 mg/l (Median: 108 mg/l), die spezifische elektrische Leitfähigkeit beträgt im Median 13,4 mS/m. Die Gesamthärten von 80% der Wässer betragen zwischen 1,2 und 9,2°dH, was den Härtestufen „sehr weich“ bis „mittelhart“ bzw. einem Härtebereich nach Waschmittelgesetz von 1 bis 2 entspricht. Der pH-Wert, der sich für 80% der Wässer in einem auffällig breiten Intervall zwischen 4,8 und 7,5 bewegt, liegt generell überwiegend im sauren Bereich, was sich im Medianwert von pH 6,7 widerspiegelt. Die Spannbreite des Sättigungsindex für Calciumkarbonat (80% der Wässer zwischen -5,4 und -0,9) ist vergleichsweise groß und weist, wie auch das Spektrum der Hauptelemente, auf eine meist deutlich ausgeprägte Karbonatuntersättigung in den überwiegend silikatischen Gesteinseinheiten des Paläozoikums hin. Deutlich untergeordnet zeigen sich aber auch Tendenzen in Richtung karbonatisch beeinflusster Wässer, was auf das teilweise Vorkommen von Kalksteinen zurückzuführen ist. Die Sauerstoffgehalte bzw. die relative Sauerstoffsättigung belegen bei einer allgemein geringen Streubreite das generelle Überwiegen oxidierter Wässer, wobei sich die gemessenen Eisen- und Mangangehalte infolge des niedrigen pH-Werts geringfügig über dem Durchschnitt aller Grundwässer bewegen. Die Gehalte an freier Kohlensäure als CO₂ liegen deutlich unter dem Durchschnitt der übrigen Grundwässer.

Hinsichtlich der Spurenelemente dominieren mit Gehalten im Median von über 10 µg/l in der Reihenfolge abfallender Konzentration Strontium und Barium, mit Werten über 1 µg/l die Elemente Zink, Bor, Titan, Aluminium und Lithium. Auffällig sind ferner die Gehalte an Thorium, die mit einem Medianwert von 0,06 µg/l neben dem salinaren Zechstein die höchste Konzentration innerhalb aller Einheiten erreichen. Weitere Spurenstoffe mit im Vergleich zu den übrigen betrachteten Einheiten erhöhten Konzentrationen sind die Elemente Gold, Cadmium, Antimon und Yttrium.

3.1.2 Marmore und Kalksilikatfelse des Kristallinen Grundgebirges

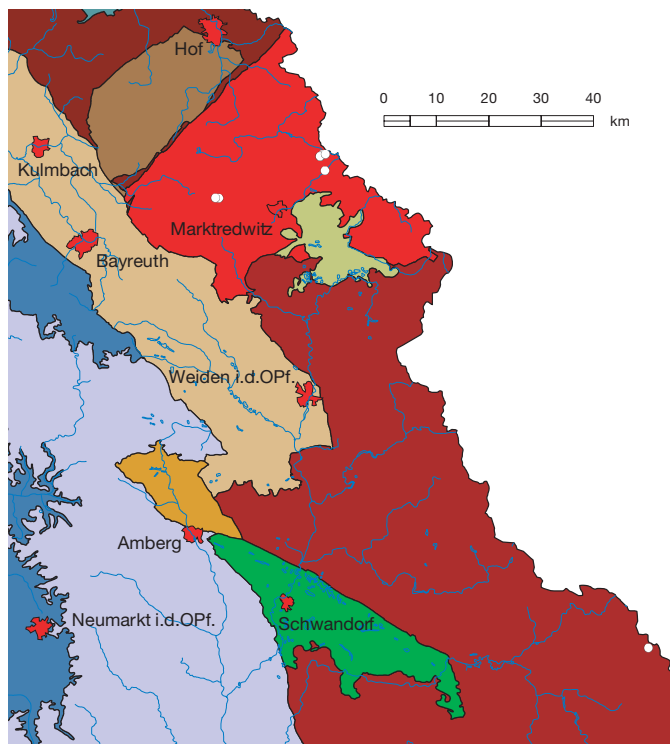


Abb. 3.1.2-1: Lage der 8 Probenahmepunkte aus den Marmoren und Kalksilikatfelsen des Kristallinen Grundgebirges

Die hydrogeologische Einheit Marmore und Kalksilikatfelse des Kristallinen Grundgebirges beinhaltet im Wesentlichen Grundwässer aus dem Bereich des Wunsiedler Marmorzugs im hydrogeologischen Teilraum Fichtelgebirgs-Erzgebirgs-Paläozoikum. Vereinzelte Marmor- und Kalksilikatfelsvorkommen finden sich aber auch in den Teilräumen Kristalliner Vorspessart sowie Oberpfälzer-Bayerischer Wald. Die Grundwässer aus diesen karbonatischen und gemischt karbonatisch-silikatischen Gesteinseinheiten wurden jedoch im Falle des Kristallinen Vorspessarts nicht und im Falle des Oberpfälzer-Bayerischer Walds nur sehr unrepräsentativ erfasst (vgl. Abb. 3.1.2-1).

Die Marmore und Kalksilikatfelse des Kristallinen Grundgebirges sind allgemein als Festgesteins-Kluft-Grundwasserleiter mit mittlerer Durchlässigkeit anzusehen. Je nach Karbonatgehalt und

lokalen Verhältnissen tritt auch Karstbildung auf (z.B. Wunsiedler Marmorzug). Die Einheiten sind aufgrund ihrer im Vergleich zum umgebenden gering leitenden Grundgebirge besseren Wasserleitfähigkeiten von lokaler wasserwirtschaftlicher Bedeutung. Aufgrund des Fehlens mächtigerer bindiger Deckschichten ist das Grundwasser generell als sehr verschmutzungsempfindlich zu bewerten; dies gilt insbesondere für die verkarsteten Bereiche.

Von den Grundwässern aus den Marmoren und Kalksilikatfelsen des Kristallinen Grundgebirges liegen Analysenergebnisse aus acht Probenahmestellen mit acht Vollanalysen vor. Aufgrund der geringen Probenzahl wurden die Daten nur eingeschränkt statistisch ausgewertet und die angegebenen Bandbreiten der Werte sind daher mit einer entsprechenden Unsicherheit behaftet.

Das überwiegend vertretene Kation in den untersuchten Wässern aus den Marmoren und Kalksilikatfelsen ist Calcium, das mit einem relativen Anteil von durchwegs mehr als 60 meq-% an den Hauptkationen beteiligt ist (Abb. 3.1.2-2). Magnesium variiert zwischen 10 und 30 meq-%, die Alkalimetalle Natrium und Kalium in der Summe zwischen 5 und 15 meq-%. Ähnliche klar differenzierte Verhältnisse finden sich bezüglich der Hauptanionen, unter denen Hydrogenkarbonat vor Sulfat und der Summe aus Chlorid und Nitrat das mengenmäßig bei weitem vorherrschende Anion ist. Entsprechend klar begrenzt ist die Lage der Wasseranalysen im Vierstoff-Diagramm, wo sie nach der Nomenklatur von FURTA & LANGGUTH (1967) im Feld für „normal erdalkalische Wässer, überwiegend hydrogenkarbonatisch“ zu liegen kommen. Die Ge-

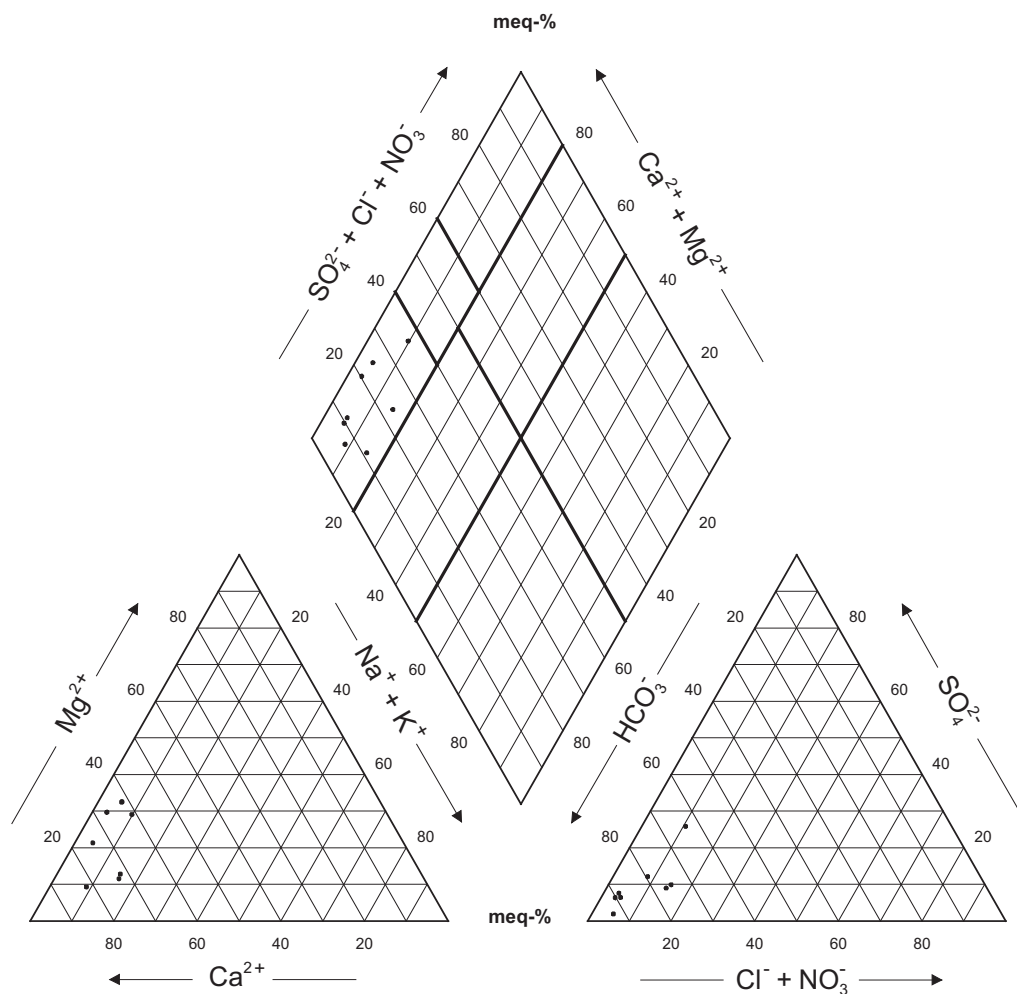


Abb. 3.1.2-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus den Marmoren und Kalksilikatfelsen des Kristallinen Grundgebirges im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (8 Probenahmestellen)

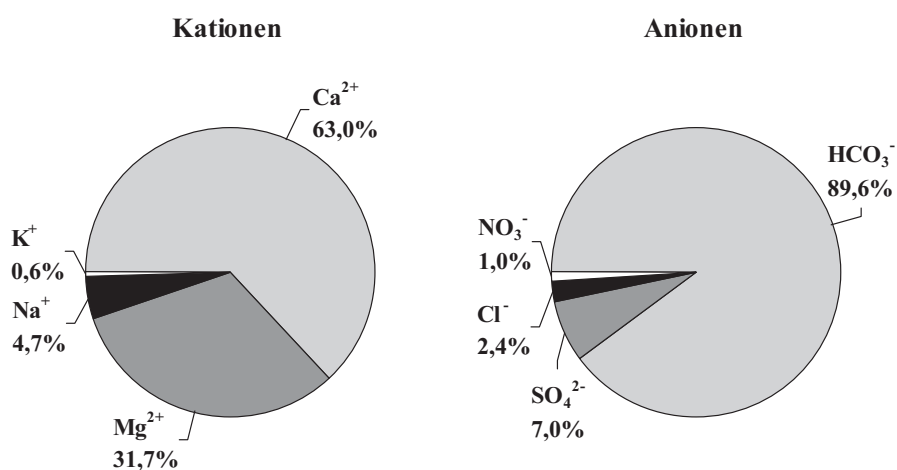


Abb. 3.1.2-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus den Marmoren und Kalksilikatfelsen des Kristallinen Grundgebirges

halte der Anionen Nitrat und Chlorid sind mit Medianwerten von 2,9 mg/l bzw. 3,9 mg/l ausgesprochen niedrig und weisen auf eine vernachlässigbar geringe anthropogene Beeinflussung hin.

Die untersuchten Wässer sind im Vergleich zu den übrigen Wässern aus dem Kristallinen Grundgebirge relativ hoch mineralisiert. Mit einer Gesamtmineralisation von 365 mg/l im Median bzw. einer spezifischen elektrischen Leitfähigkeit von 41 mS/m (Median) liegen sie jedoch unter dem Mittel aller untersuchten hydrogeologischen Einheiten.

Die Gesamthärte der Wässer beträgt im Median 11,8°dH und entspricht somit annähernd dem Medianwert der Karbonathärte in Höhe von 11,4°dH (Härtestufe „mittelhart“, Härtebereich 2 nach Waschmittelgesetz). Der pH-Wert liegt mit einem Median von 7,45 bereits im schwach basischen Bereich und somit bei einem Wert wie er für karbonatisch geprägte Grundwässer zu erwarten sind. Ebenso weist der Median des Sättigungsindex in Höhe von -0,5 auf eine lediglich geringe Untersättigung der untersuchten Grundwässer bezüglich Calciumkarbonat hin. Sowohl die Sauerstoffgehalte als auch die temperaturabhängige Sauerstoffsättigung sind mit Medianwerten von 6,1 mg/l bzw. rund 60% vergleichsweise niedrig, die Wasserbeschaffenheit entspricht aber noch weitgehend dem oxidierten Typus. Die gemessenen Mangangehalte sind mit einem Medianwert von 7 µg/l deutlich über dem Durchschnitt, die Eisengehalte liegen hingegen mit einem Median von 18 µg/l im Durchschnitt aller Wässer. Die Gehalte an freier Kohlensäure als CO₂ liegen unter dem Durchschnitt.

Hinsichtlich der Spurenelemente dominieren mit Gehalten im Median von über 10 µg/l in der Reihenfolge abfallender Konzentration lediglich Strontium und Barium, mit Gehalten über 1 µg/l die Elemente Bor, Zink, Rubidium, Titan, Cäsium, Chrom und Arsen. Überdurchschnittliche Konzentrationen weist ferner Silicium auf, das mit einem Mediangehalt von 13,6 mg/l neben den tertiären Vulkaniten die höchsten Konzentrationen in allen betrachteten Einheiten hat.

3.1.3 Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges

Unter den Silikatgesteinen des Kristallinen Grundgebirges werden alle metamorphen und magmatischen Silikatgesteine aus den hydrogeologischen Teilräumen Kristalliner Vorspessart, Ostthüringischer-fränkischer-vogtländischer Geosynklinalbereich, Münchberger Gneismasse, Fichtelgebirgs-Paläozoikum und Oberpfälzer-Bayerischer Wald zusammengefasst. Hiervon ausgenommen sind jedoch karbonatisch-silikatische Metamorphite (vgl. Kap. 3.1.2) sowie quarzitisches Gesteine des südwestlichen Fichtelgebirgs-Paläozoikums und die niedergradig metamorphen Metaklastite des Fränkischen Schiefergebirges bzw. Ostthüringisch-fränkisch-vogtländischen Geosynklinalbereichs (vgl. Kap. 3.1.1).

Aufgrund hydrogeochemischer Überlegungen erfolgte eine weitere Unterteilung in die hydrogeologischen Einheiten saure bis intermediäre Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges und basische bis ultrabasische Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges bei einem SiO₂-Gehalt von ca. 50 Gew.-% in der geochemischen Analyse, wobei die Trennung zwischen beiden Einheiten, letztendlich auch wegen der Lagerungsverhältnisse im Gelände, naturgemäß nicht scharf sein kann.

Die wesentlichen Gesteine in erstgenannter Einheit sind Granitoide i.w.S., also Gneise, Glimmerschiefer, Phyllite, Meta-Sandsteine und -Konglomerate und saure bis intermediäre Metavulkanite. In der Einheit der basischen bis ultrabasischen Gesteine finden sich Gabbroide i.w.S., also überwiegend Pikrite, Peridotite, Eklogite, Amphibolite, Serpentinite und basische Metavulkanite. Die Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges stellen in den tieferen Bereichen durchwegs Festgesteins-Kluft-Grundwasserleiter mit einer nach der Tiefe hin abnehmenden Durchklüftung dar.

Die Durchlässigkeiten und somit auch die Ergiebigkeiten variieren je nach Gesteinstyp und lokalen Verhältnissen abseits tektonischer Zerrüttung zwischen gering und äußerst gering. Lediglich im Bereich von Störungszonen wie z.B. dem Pfahl-Quarzit des Bayerischen Walds werden aufgrund intensiver Klüftung mittlere bis mäßige Durchlässigkeiten und örtlich bedeutende Ergiebigkeiten erreicht. In den oberflächennahen Bereichen speziell der Granitoide und Gneise bilden sich aufgrund von in-situ-Verwitterung Zersatz- oder Vergrusungszonen mit lokal unterschiedlichen Mächtigkeiten. Hier herrschen die Bedingungen eines Lockergestein-Poren-Grundwasserleiters mit entsprechend höheren Durchlässigkeiten bzw. Speichervermögen. Deshalb haben die Grundwasservorkommen im Zersatz für die örtliche Wasserversorgung in diesen hydrogeologischen Räumen zum Teil große Bedeutung (vgl. u.a. KONARSKE et al. 1998). Der Übergang zwischen dem Poren- und dem Kluft-Grundwasserleiterbereich ist graduell, die Sohle des kristallinen Grundwasserstockwerks bildet die weitgehend kluftfreie Zone im tieferen Untergrund.

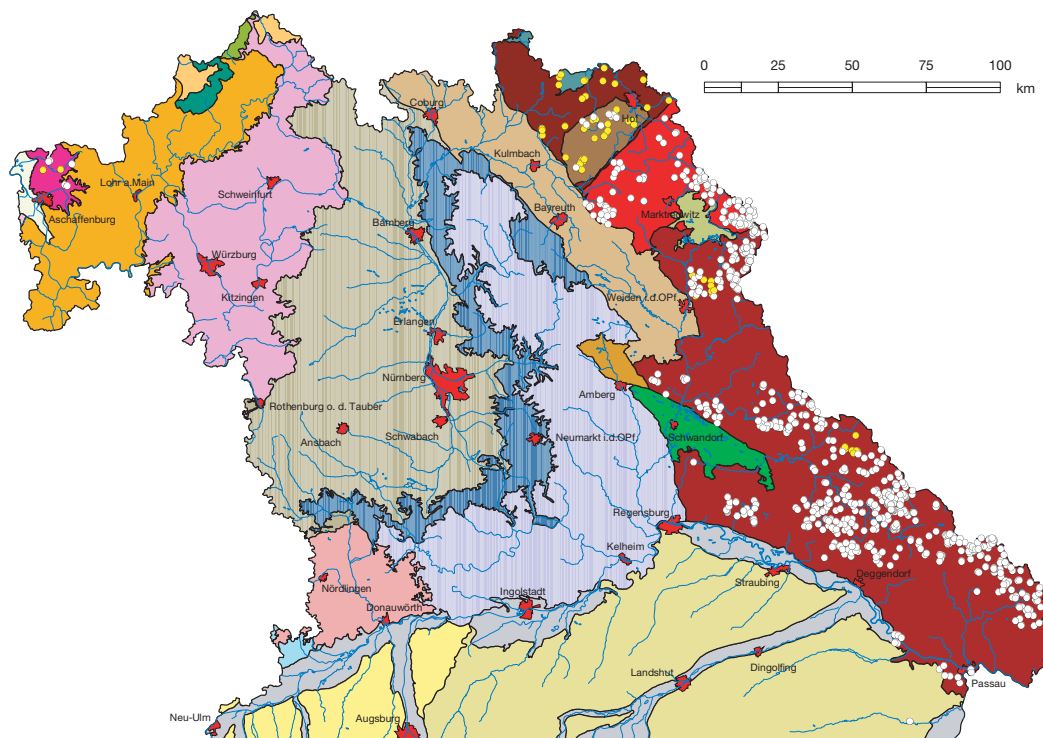


Abb. 3.1.3-1: Lage der Probenahmepunkte aus den sauren bis intermediären Silikatgesteinen des Kristallinen Grundgebirges (weiße Punkte, n = 733) und den basischen bis ultrabasischen Silikatgesteinen des Kristallinen Grundgebirges (gelbe Punkte, n = 60)

Da das Rückhaltevermögen insbesondere der sauren und intermediären Kristallingesteine gegenüber Schadstoffen sehr gering ist, sind die Grundwasservorkommen in den Silikatgesteinen des Kristallinen Grundgebirges generell sehr empfindlich gegenüber Schadstoffeinträgen, wenn mächtigere bindige Zersatzdecken fehlen.

Von den Grundwässern aus den sauren bis intermediären Silikatgesteinen des Kristallinen Grundgebirges liegen Analysenergebnisse aus 733 Probenahmepunkten mit 493 Vollanalysen vor, aus den basischen bis ultrabasischen Silikatgesteinen des Kristallinen Grundgebirges Analysenergebnisse aus 60 Probenahmestellen mit 57 Vollanalysen (Abb. 3.1.3-1).

Die Verteilung der Hauptkationen in der Gruppe der sauren bis intermediären Kristallingesteine ist mit ähnlichen Gehalten der Hauptelemente relativ ausgewogen, so dass im Kationendreieck eine relativ scharf begrenzte Punktwolke entsteht (Abb. 3.1.3-2). Häufigstes Kation ist Calcium vor Magnesium und der Summe aus Natrium und Kalium (Abb. 3.1.3-3). Die Verhältnisse der Hauptanionen sind sehr variabel und streuen flächig im gesamten Anionendreieck, weshalb die Wässer im Vierstoff-Diagramm gemäß der Klassifikation von FURTAK & LANGGUTH (1967) ein breites Band im Feld der „erdalkalischen Wässer mit höherem Alkaligehalt, überwiegend hydrogenkarbonatisch und überwiegend sulfatisch-chloridisch“ belegen (Abb. 3.1.3-2). Insgesamt zeigt sich eine deutliche Tendenz hin zu den „erdalkalischen Wässern“. Die Ursache der Streuung speziell der Anionen ist wie bei den Wässern aus dem Paläozoikum neben der stofflichen Heterogenität der Grundwasserleitergesteine im Vorhandensein einer anthropogenen Beeinflussung vor dem Hintergrund einer allgemein sehr geringen Mineralisation zu suchen. Deutlich wird dies am vergleichsweise großen relativen Anteil von Sulfat, Chlorid und Nitrat am Spektrum der Anionen (Abb. 3.1.3-3) bei eher niedrigen Absolutgehalten (5 mg/l bzw. 2,3 mg/l im Median).

In der Gruppe der basischen bis ultrabasischen Kristallingesteine sind die Proportionen der Hauptkationen in Richtung höherer Anteile von Calcium auf Kosten der Anteile an Natrium und vor allem Kalium verschoben (Abb. 3.1.3-4 und Abb. 3.1.3-5), während der relative Anteil an Magnesium gegenüber den Wässern aus den sauren bis intermediären Kristallingesteinen annähernd gleich ist. Hinsichtlich der Hauptanionen ist für die Wässer aus den SiO₂-armen Kristallingesteinen eine tendenziell ähnliche, wenngleich auch bei weitem nicht so stark ausgeprägte Variabilität zu erkennen, wie bei den Wässern aus den SiO₂-reicheren Gesteinen. Hierbei ist jedoch der unterschiedliche Umfang der Probenkollektive zu berücksichtigen. Im Vierstoff-Diagramm von FURTAK & LANGGUTH (1967) fallen die Wässer aus den basischen bis ultrabasischen Kristallingesteinen hauptsächlich in die Felder der „normal erdalkalischen Wässer, hydrogenkarbonatisch-sulfatisch bzw. überwiegend sulfatisch“, doch sind auch Tendenzen zu höheren Hydrogenkarbonatgehalten bzw. Alkaligehalten erkennbar (Abb. 3.1.3-4). Nitrat und Chlorid haben an den Hauptanionen mit zusammen knapp 30 meq-% einen nennenswerten Anteil (Abb. 3.1.3-5); die Konzentrationen betragen im Median jeweils rund 13 mg/l.

Die Wässer aus den sauren bis intermediären Kristallingesteinen sind unter allen betrachteten Einheiten die am geringsten mineralisierten Wässer. Die Gesamtmineralisation variiert für 80% aller Wässer zwischen 21 und 199 mg/l, die korrespondierende spezifische elektrische Leitfähigkeit zwischen 2,4 und 27,4 mS/m. Entsprechend gering ist auch die Gesamthärte, die für 80% aller Wässer zwischen 0,3 und 5,3°dH liegt. Dies entspricht den Härtestufen „sehr weich“

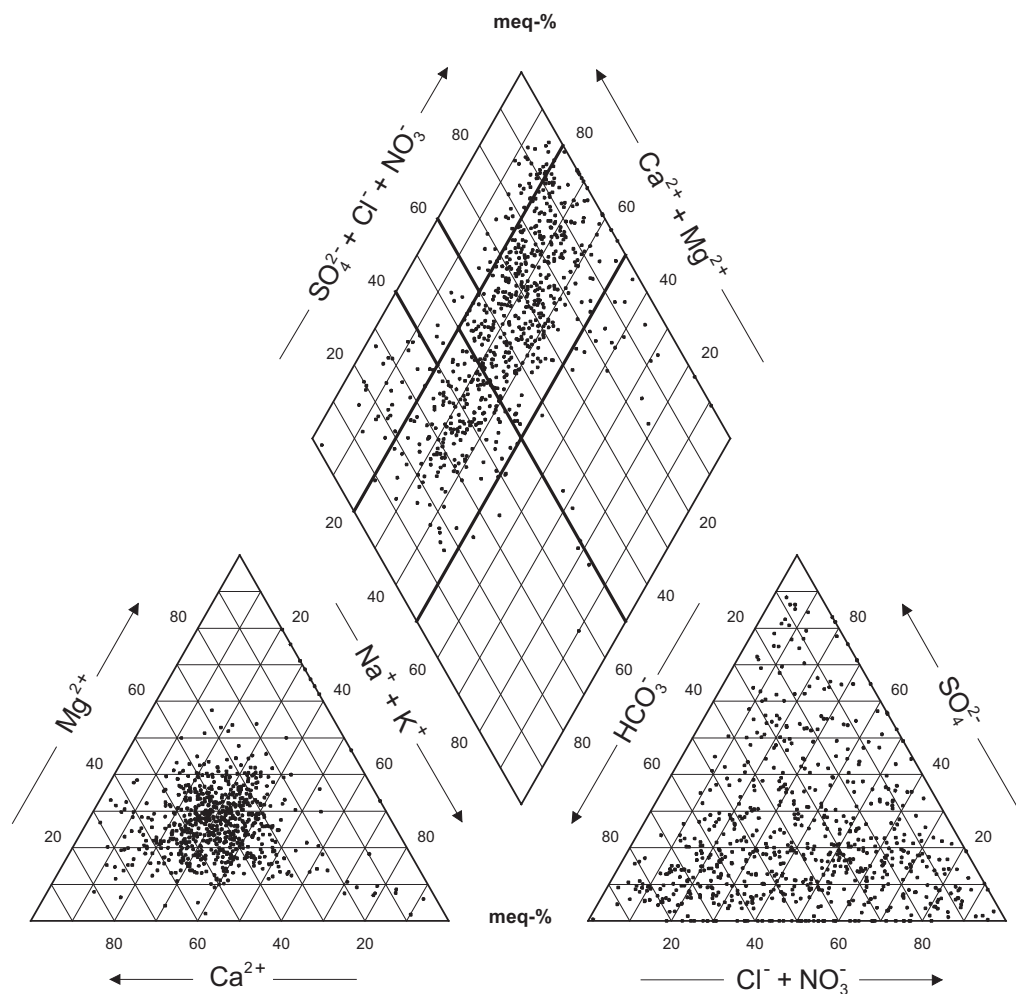


Abb. 3.1.3-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus den sauren bis intermediären Silikatgesteinen des Kristallinen Grundgebirges im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (707 Probenahmestellen)

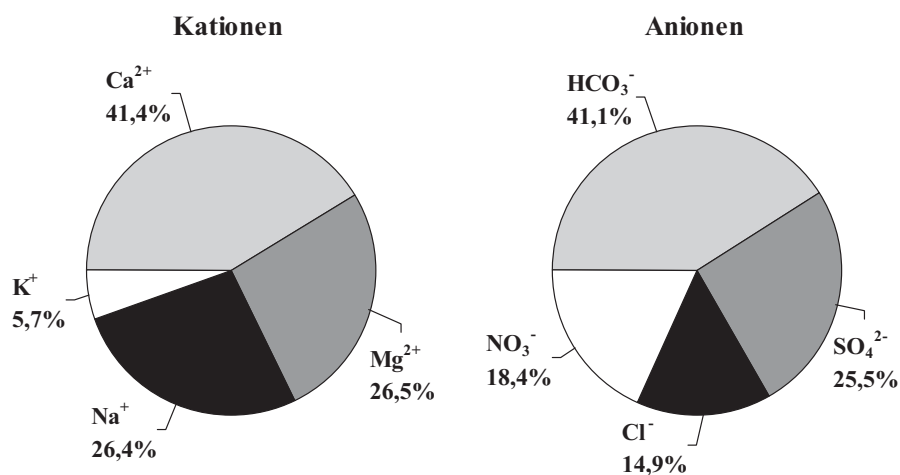


Abb. 3.1.3-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus den sauren bis intermediären Silikatgesteinen des Kristallinen Grundgebirges

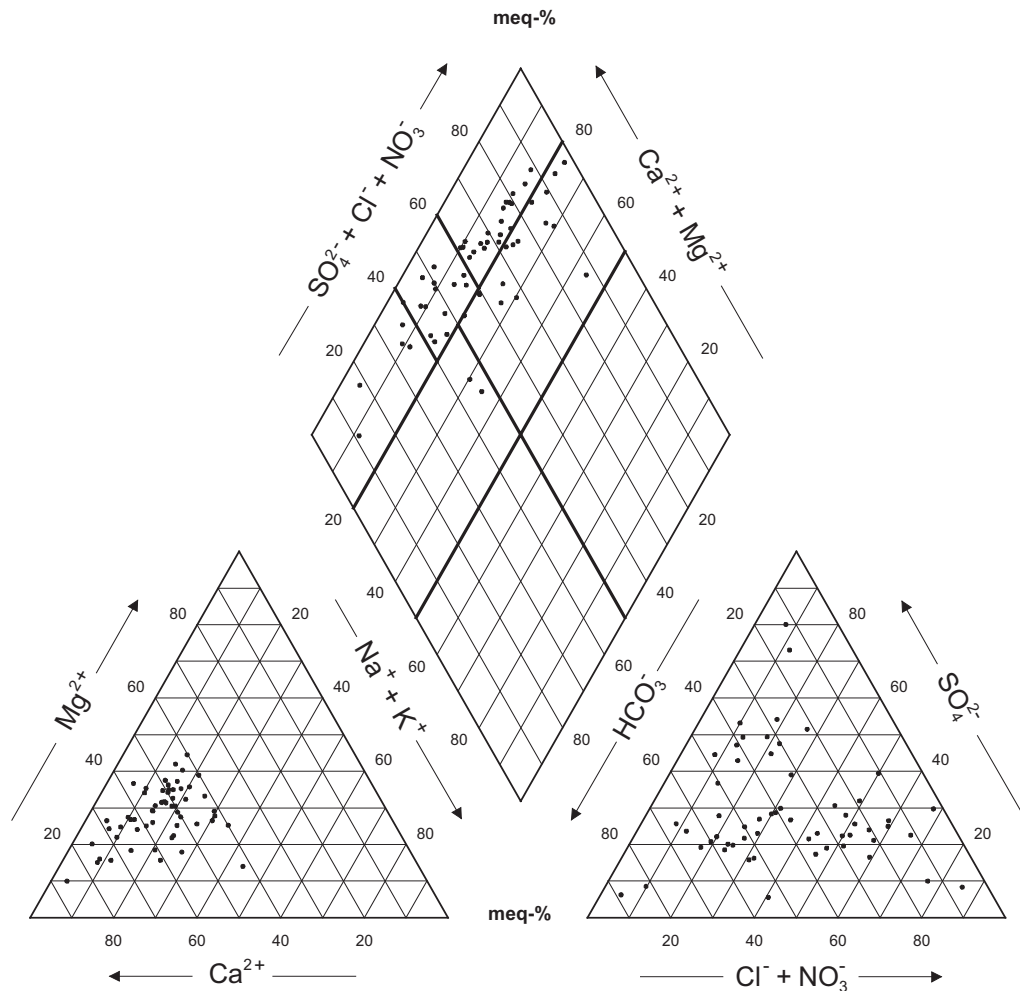


Abb. 3.1.3-4: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus den basischen bis ultrabasischen Silikatgesteinen des Kristallinen Grundgebirges im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (57 Probenahmestellen)

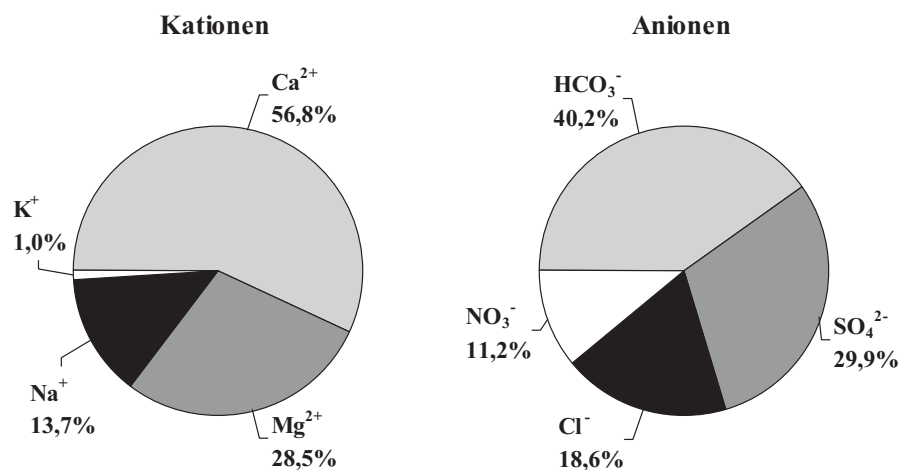


Abb. 3.1.3-5: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus den basischen bis ultrabasischen Silikatgesteinen des Kristallinen Grundgebirges

bis „weich“ bzw. dem Härtebereich 1 nach Waschmittelgesetz. Ebenso niedrig ist der pH-Wert, der für 80% der Wässer im Intervall zwischen 5,1 und 6,5 und somit generell im sauren Bereich liegt. Der Sättigungsindex bezüglich Calciumkarbonat bewegt sich für 80% aller Wässer zwischen -5,9 und -2,9 und belegt somit deutlich die Kalkaggressivität. Die Sauerstoffgehalte (Median: 9,1 mg/l) bzw. die relative Sauerstoffsättigung (Median: 79%) zeigen bei einer allgemein geringen Streubreite das generelle Überwiegen oxidierten Wässers, wobei die gemessenen Eisen- und Mangangehalte im Median unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen liegen.

In der Gruppe der basischen bis ultrabasischen Kristallingesteine variiert die Gesamtmineralisation für 80% aller Wässer zwischen 55 und 244 mg/l, die korrespondierende spezifische elektrische Leitfähigkeit zwischen 5,8 und 32,6 mS/m. Somit zeigen diese Wässer einen merklich höheren Mineralisierungsgrad als die Wässer aus den SiO₂-reicheren Gesteinen. Dies korrespondiert auch mit einer deutlich höheren Härte dieser Wässer im Vergleich zu denen aus den SiO₂-reicheren Kristallingesteinen. Die Gesamthärte von 80% aller Wässer bewegt sich zwischen 1,4 und 7,9°dH, was den Härtestufen „sehr weich“ bis „weich“ bzw. den Härtebereichen 1 und 2 nach Waschmittelgesetz entspricht. Der pH-Wert variiert für 80% der Wässer im Intervall von 5,9 bis 7,5 und erreicht somit schon den neutralen bis mild alkalischen Bereich. Der Sättigungsindex bezüglich Calciumkarbonat liegt für 80% aller Wässer zwischen -4,4 und -1, was auf eine immer noch deutlich ausgeprägte Kalkaggressivität hinweist. Die Sauerstoffgehalte (Median: 7,6 mg/l) bzw. die relative Sauerstoffsättigung (Median: 70%) zeigen mit einer gewissen Streubreite neben dem vorherrschend oxidierten Typus eine lokale Tendenz zu teilreduzierten Wässern. Die ermittelten Eisen- und Mangangehalte liegen überwiegend unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen.

Hinsichtlich der Spurenelementgehalte finden sich in den Wässern aus den sauren bis intermediären Kristallingesteinen mit Gehalten im Median von über 10 µg/l lediglich Strontium, mit Konzentrationen über 1 µg/l in der Reihenfolge abfallender Konzentration die Elemente Barium, Zink, Aluminium, Lithium und Bor. Vergleichsweise erhöhte Konzentrationen weisen ferner die Elemente Cadmium, Beryllium, Cer, Yttrium und Lanthan sowie Silicium auf.

Eine insgesamt sehr ähnliche Verteilung der Spurenelemente zeigen die Wässer aus der Einheit der basischen bis ultrabasischen Kristallingesteine. Mit Gehalten im Median von über 10 µg/l findet sich lediglich Strontium, mit Konzentrationen über 1 µg/l finden sich in der Reihenfolge abfallender Konzentration die Elemente Barium, Zink, Lithium und Titan. In überdurchschnittlichen Konzentrationen liegen ferner die Elemente Vanadium, Yttrium und Lanthan sowie Silicium vor.

3.1.4 Tertiäre Vulkanite

Die hydrogeologische Einheit Tertiäre Vulkanite findet sich relativ kleinräumig verbreitet in Form von Decken und Basaltstöcken vor allem in den hydrogeologischen Teilräumen Lange Rhön und Fichtelgebirgs-Tertiär (Egergraben, Großer Teichelberg), untergeordnet auch in der Kuppenrhön. Die übrigen Vorkommen beschränken sich auf meist kleine Einzelvorkommen von Gängen (Heldburger-Gangschar, Oberleinleiter) oder Schloten (Rauer Kulm bei Neustadt;

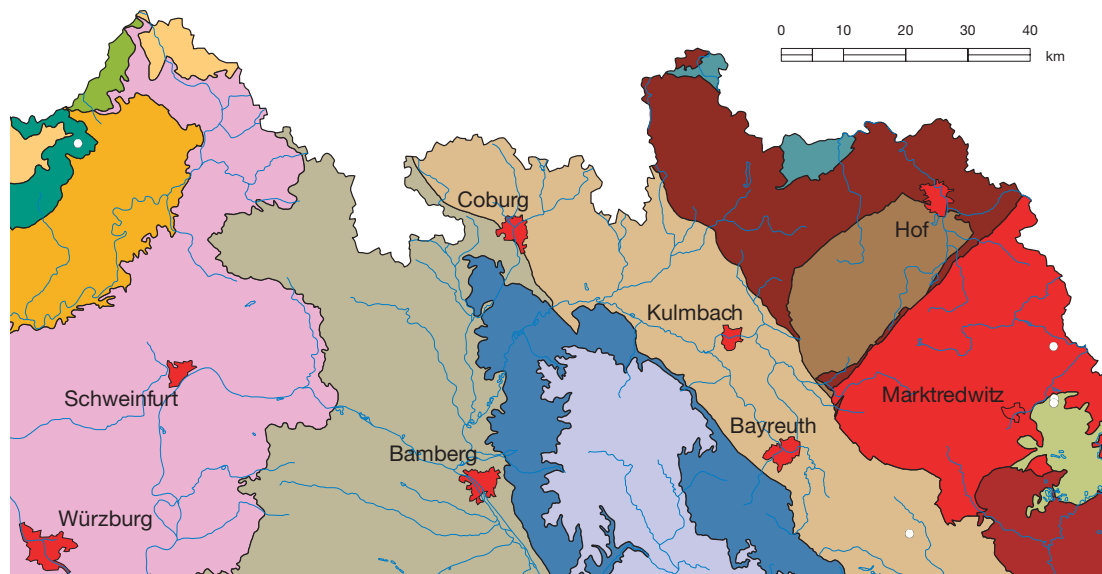


Abb. 3.1.4-1: Lage der fünf Probenahmepunkte aus den Tertiären Vulkaniten

Parkstein bei Weiden). Unter petrografischen Gesichtspunkten handelt es sich um basaltische Gesteine im weiteren Sinne sowie untergeordnet auch um basische Tuffe.

Die tertiären Vulkanite sind durchwegs Festgesteins-Kluft-Grundwasserleiter, mit allgemein geringen, im Bereich von Tuffiten sogar äußerst geringen Durchlässigkeiten. Ein ausgeprägter Grundwasserstockwerksbau ist innerhalb der Basalte nicht ausgebildet, lokal können aber schwebende Grundwasservorkommen auftreten. Die allgemein geringen Ergiebigkeiten werden von der lokalen Kluftsituation bestimmt; die wasserwirtschaftliche Bedeutung ist nur von lokalem Charakter.

Ein Schutz der Grundwasservorkommen vor Schadstoffeinträgen ist im Bereich einer Überdeckung durch Fließerden gewährleistet und somit stark abhängig von den jeweiligen lokalen Gegebenheiten.

Von den Grundwässern aus den Tertiären Vulkaniten liegen Analysenergebnisse aus lediglich fünf Probenahmestellen mit fünf Vollanalysen vor (vgl. Abb. 3.1.4-1). Die Daten wurden aufgrund der geringen Probenzahl nur eingeschränkt statistisch ausgewertet und die angegebenen Bandbreiten der Werte sind mit entsprechend hohen Unsicherheiten behaftet.

Die Wasserproben zeigen im Kationendreieck (Abb. 3.1.4-2) ein lediglich in engen Grenzen variierendes, nahezu ausgewogenes Calcium-Magnesium-Verhältnis von jeweils 40-50 meq-%, bei einem Anteil der Alkalimetalle Natrium und Kalium von knapp über 10 meq-%. Unter den Hauptanionen (Abb. 3.1.4-3) dominiert deutlich Hydrogenkarbonat, wobei eine Probe eine erhöhte Nitrat-Chlorid-Komponente (bei gleichzeitig geringer Mineralisation) zeigt (Abb. 3.1.4-2). Nitrat und Chlorid sind in allgemein moderaten Anteilen von rund 3 bzw. 4 meq-% im Median vorhanden (Abb. 3.1.4-3). Im Vierstoff-Diagramm belegen die Proben nach der Klassifikation von FURTAK & LANGGUTH (1967) das Feld der „normal erdalkalischen Wässer, hydrogenkarbonatisch-sulfatisch“.

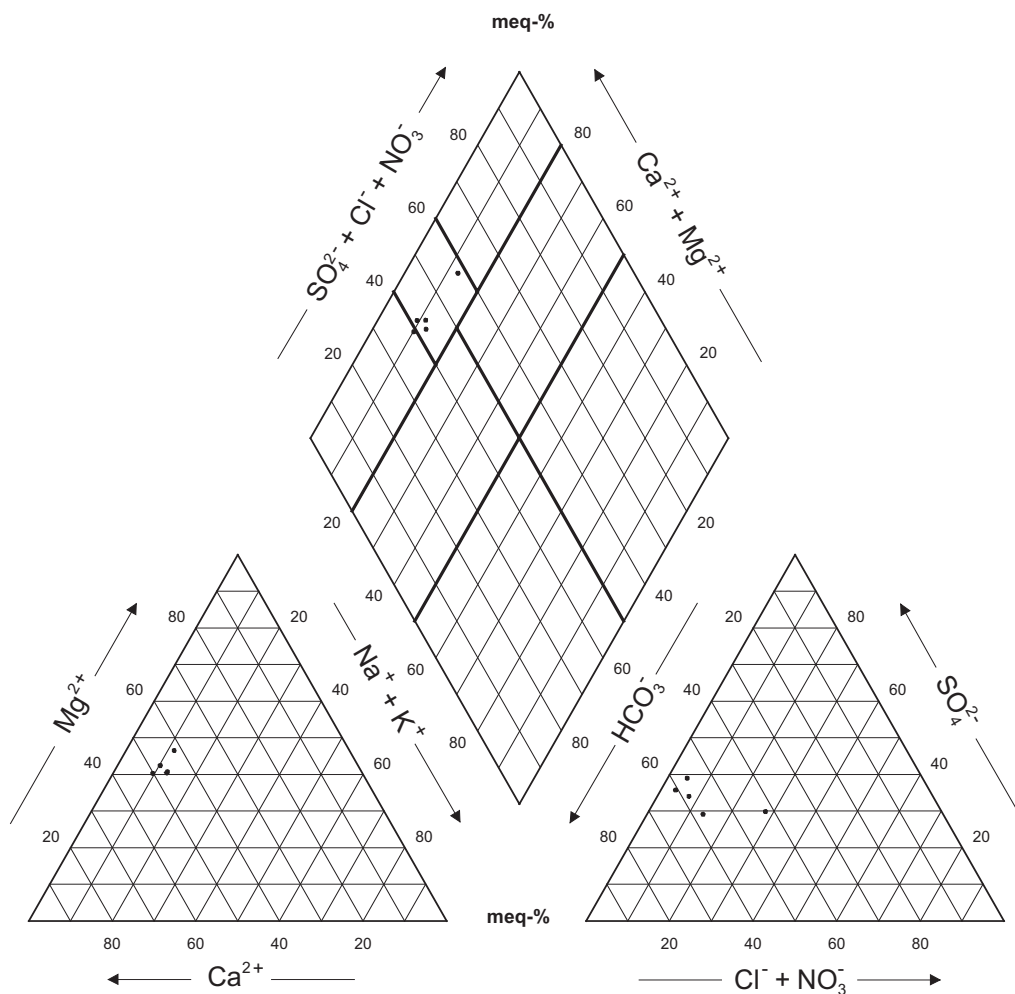


Abb. 3.1.4-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus den Tertiären Vulkaniten im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (5 Probenahmestellen)

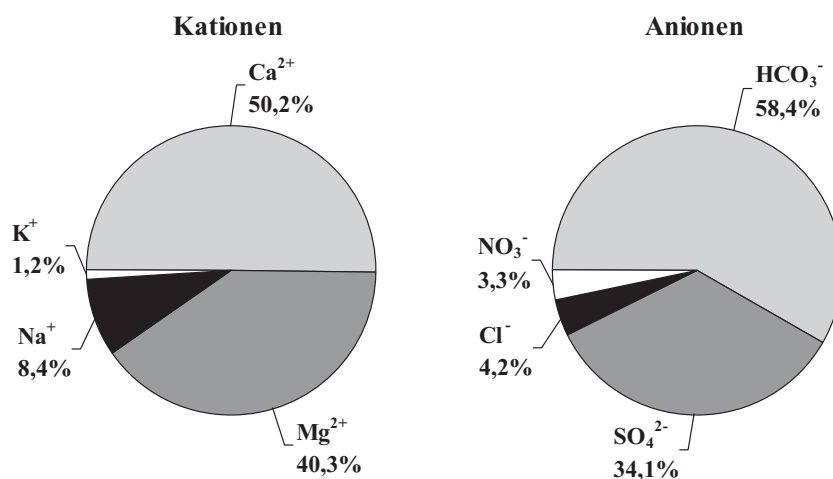


Abb. 3.1.4-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus den Tertiären Vulkaniten

Der Mineralisierungsgrad der Wässer aus den Tertiären Vulkaniten ist dem der basischen bis ultrabasischen Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges vergleichbar. Die Gesamtmineralisation liegt im Median bei 221 mg/l, die spezifische elektrische Leitfähigkeit bei rund 28 mS/m. Die Gesamthärte beträgt im Median rund 7°dH. Dies entspricht der Härtestufe „weich“ und der Grenze zwischen den Härtebereichen 1 und 2 nach Waschmittelgesetz. Der pH-Wert streut in engen Grenzen um den Neutralpunkt; der Median beträgt 7,0. Der Sättigungsindex bezüglich Calciumkarbonat liegt im Median bei -1,7, was eine eher moderate Kalkaggressivität bedeutet. Die Sauerstoffgehalte von rund 9 mg/l im Median und die relative Sauerstoffsättigung von 75% im Median zeigen, dass es sich durchwegs um oxidierte Wässer handelt. Die Eisen- und Mangangehalte liegen, wie schon bei den hydrogeochemisch vergleichbaren Wässern aus den basischen bis ultrabasischen Kristallingesteinen, überwiegend unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen.

Auch die Spurenelementverteilungen zeigen deutliche Parallelen zu den Wässern aus den basischen bis ultrabasischen Kristallingesteinen. Mit Gehalten im Median von über 10 µg/l findet sich lediglich Strontium, mit Konzentrationen über 1 µg/l finden sich in der Reihenfolge abfallender Konzentration die Elemente Barium, Zink, Titan, Bor, Rubidium, Vanadium und Aluminium. Silicium weist im Median die höchsten Gehalte aller untersuchten Einheiten auf.

3.2 Schichtstufen- und Bruchschollenland

Innerhalb der hydrogeologischen Großräume des Schichtstufen- und Bruchschollenlands (BÜTTNER et al. 2003) werden die folgenden hydrogeologischen Einheiten unterschieden:

- *Perm ohne „Zechstein in salinarer Fazies“ sowie Zechstein in salinarer Fazies*
- *Buntsandstein*
- *Muschelkalk in karbonatisch-klastischer Fazies sowie Mittlerer Muschelkalk in salinarer Fazies*
- *Unterer Keuper, Mittlerer Keuper in salinarer Fazies sowie Mittlerer und Oberer Keuper in klastischer Fazies*
- *Trias der Bodenwöhrer Bucht*
- *Lias*
- *Dogger*
- *unbedeckter bis teilbedeckter Malm sowie vollständig überdeckter Malm*
- *Kreide*
- *Ries-Trümmermassen*

Ferner finden sich in den oben genannten Großräumen Probenahmepunkte aus den Tertiären Vulkaniten (Kap. 3.1.4) sowie den Quartärschottern mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung (Kap. 3.4).

3.2.1 Perm ohne „Zechstein in salinarer Fazies“

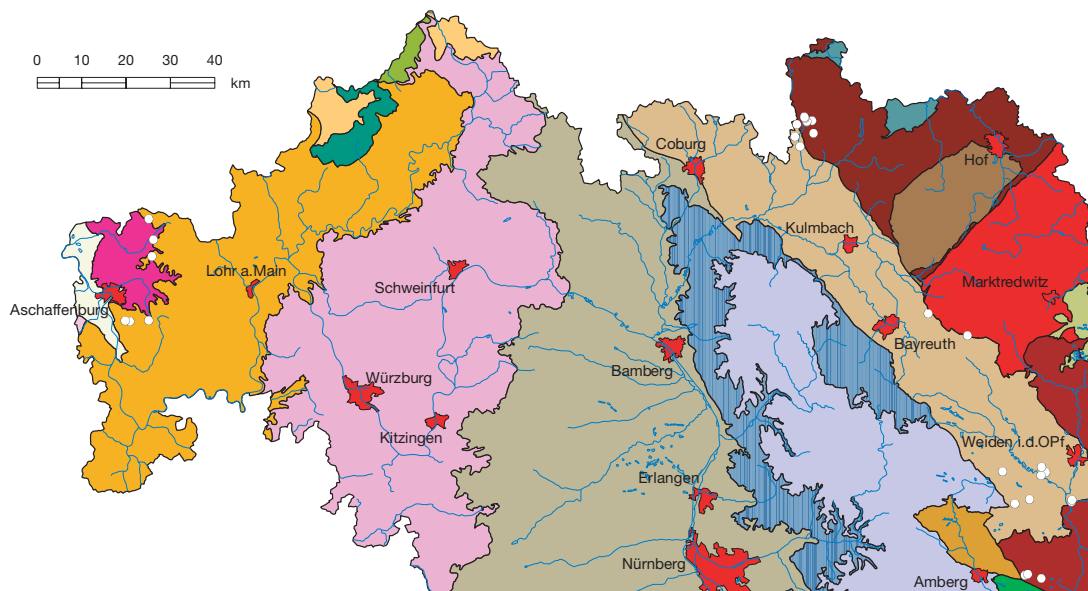


Abb. 3.2.1-1: Lage der 29 Probenahmepunkte aus dem Perm ohne „Zechstein in salinarer Fazies“

In der Einheit Perm ohne „Zechstein in salinarer Fazies“ sind die permischen Grundwasserleiter außerhalb der salinaren Fazies des Zechsteins zusammengefasst, wobei der Schwerpunkt auf den Gesteinen des Rotliegend liegt. Erschließbare Grundwasservorkommen im Perm finden

sich in Bayern nur relativ kleinräumig in verschiedenen hydrogeologischen Teilräumen: Spessart, Rhönvorland und Buntsandstein des Odenwalds, Ostthüringisch-fränkisch-vogtländischer Synklinalbereich sowie Bruchschollenland bzw. seine unmittelbare Umgebung. Die Ablagerungen des Perms markieren den Beginn der terrestrischen Sedimentation in der Germanischen Fazies. Die Gesteine sind recht vielfältig; überwiegend kommen Sandsteine, Tonsteine, Konglomerate und Arkosen sowie Karbonatgesteine vor, wobei letztere die Grundwasserleiter mit der höchsten Durchlässigkeit darstellen. Je nach Gesteinszusammensetzung handelt es sich um Festgesteins-Grundwasserleiter mit Kluft-, Kluft-Poren- bzw. Kluft-Karst-Durchlässigkeiten. Wegen ihrer kleinräumigen Verbreitung sind die permischen Grundwasserleiter nur von lokaler Bedeutung für die Wasserversorgung.

Die betrachteten Einheiten des Perms verfügen über keine mächtigeren Deckschichten. Je nach Flurabstand und Ausbildung der Gesteine sind die Grundwasservorkommen gering bis mäßig geschützt.

Von Wässern aus dem nicht salinaren Perm liegen Analysenergebnisse aus 29 Probenahmestellen mit 16 Vollanalysen vor. Aufgrund der geringen Probenzahl und der hohen Bandbreite unterschiedlicher Gesteine sind die statistischen Aussagen mit einer entsprechenden Unsicherheit behaftet.

Bei den Hauptelementen der untersuchten Wässer dominieren Calcium und Magnesium, wobei auch die Alkalimetalle Natrium und Kalium bis zu etwa 30 meq-% der Kationen stellen. Die Anionenverteilung streut in einem weiten Bereich, wobei letztlich die hydrogenkarbonatischen Wässer überwiegen (Abb. 3.2.1-2 und 3.2.1-3). Gemäß FURTAK & LANGGUTH (1967) fallen die Wässer damit überwiegend in die Felder der „erdalkalischen Wässer, überwiegend hydrogenkarbonatisch“ mit Wässern, die als „hydrogenkarbonatisch-sulfatisch“ bzw. „überwiegend sulfatisch“ zu bezeichnen sind. Chlorid und Nitrat sind etwa zu gleichen Anteilen vertreten und weisen auf eine vorhandene anthropogene Komponente in den Wässern hin.

Die Gesamtmineralisation von 80% der Wässer liegt zwischen 168 und 420 mg/l (Median 269 mg/l). Somit sind die Wässer des Perms unterdurchschnittlich mineralisiert; die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten betragen im Median 26,8 mS/m. Die Gesamthärten der Wässer schwanken zwischen 5 und 14°dH überwiegend von „weich“ bis „mittelhart“ (Härtebereich 1-2 nach Waschmittelgesetz). Der pH-Wert reicht vom leicht sauren bis in den leicht alkalischen Bereich (80% der Werte zwischen 6,3 und 7,7), wobei mit einem Median von 7,2 die leicht alkalischen Wässer überwiegen. Die Spannbreite des Sättigungsindex für Calciumkarbonat (-2,8 bis -0,6) weist wie auch die Zusammensetzung der Hauptelemente auf eine häufige Karbonatuntersättigung in den überwiegend silikatischen Gesteinseinheiten des Perms mit einer Tendenz zu karbonatisch beeinflussten Wässern hin. Die Sauerstoffgehalte der betrachteten Permwässer zeigen eine überwiegende Sauerstoffsättigung, wobei die beobachteten Eisen- und Mangan-gehalte im Durchschnitt aller Wässer liegen.

Die Wässer weisen bei einigen Spurenstoffen mit die höchsten Gehalte der betrachteten Einheiten auf. Insgesamt dominieren Barium, Strontium, Lithium und Bor mit Gehalten der Mediane von über 10 µg/l und Zink, Arsen, Rubidium, Uran und Kupfer mit Werten über 1 µg/l. Auffällig sind die Werte des Arsens, das den höchsten Median der betrachteten für Trinkwasserzwecke

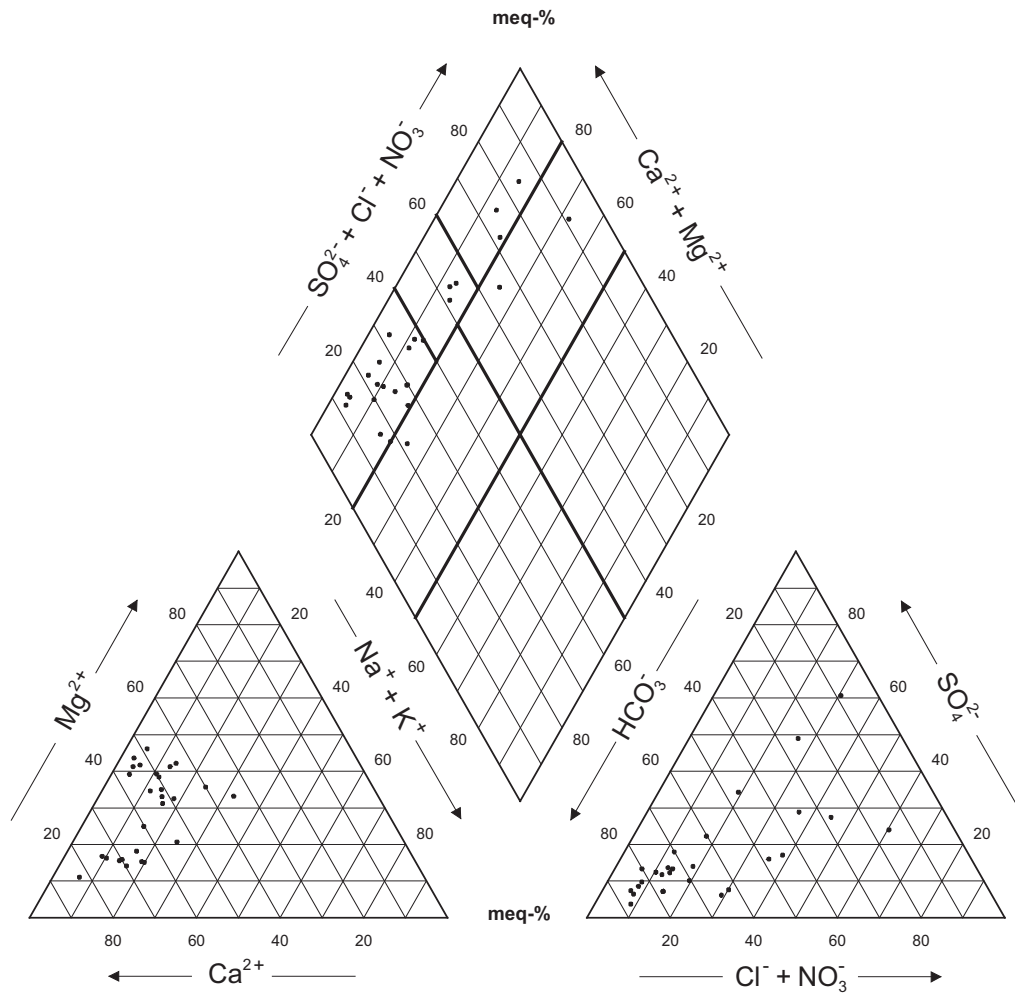


Abb. 3.2.1-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Perm ohne „Zechstein in salinarer Fazies“ im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (27 Probenahmestellen)

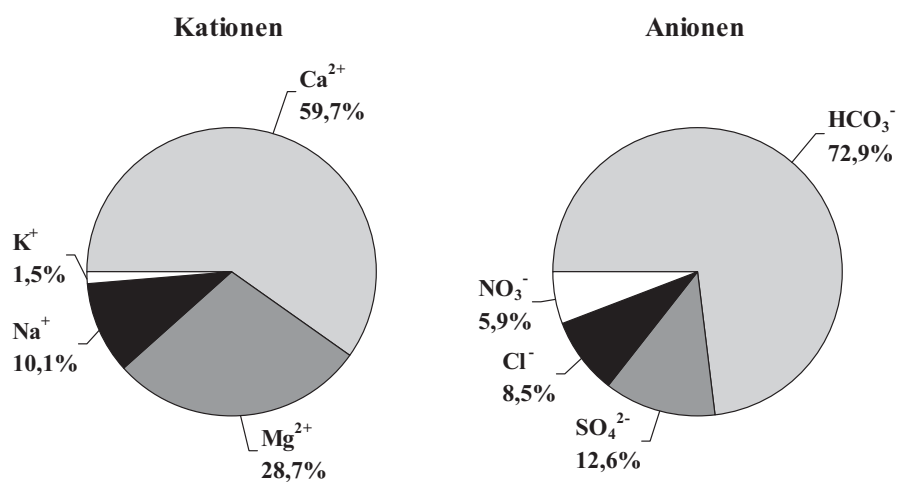


Abb. 3.2.1-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Perm ohne „Zechstein in salinarer Fazies“

geeigneten Wasser aufweist (4,2 µg/l). Auch die Urangelhalte liegen im oberen Bereich der betrachteten Grundwassereinheiten. Weitere Spurenstoffe mit Gehalten deutlich über dem Schnitt aller Wässer sind Vanadium und Cäsium.

3.2.2 Zechstein in salinarer Fazies

Bei den betrachteten Wässern aus dem Zechstein in salinarer Fazies handelt es sich um hoch mineralisierte Tiefenwässer im Raum Bad Kissingen - Bad Neustadt - Bad Königshofen, die als Heil- und Mineralwässer genutzt werden. Hier liegen in der Tiefe marine Ablagerungen in Salinarfazies vor, die von Norden her bis etwa zur Linie Würzburg - Bamberg reichen. Die Gesteine wurden in Sedimentationszyklen abgelagert und enthalten insbesondere Abfolgen von Karbonatgesteinen und Evaporiten (Gips und Anhydrit, Stein- und Kalisalz) sowie Ton- und Sandsteine, die teils salzhaltig sind.

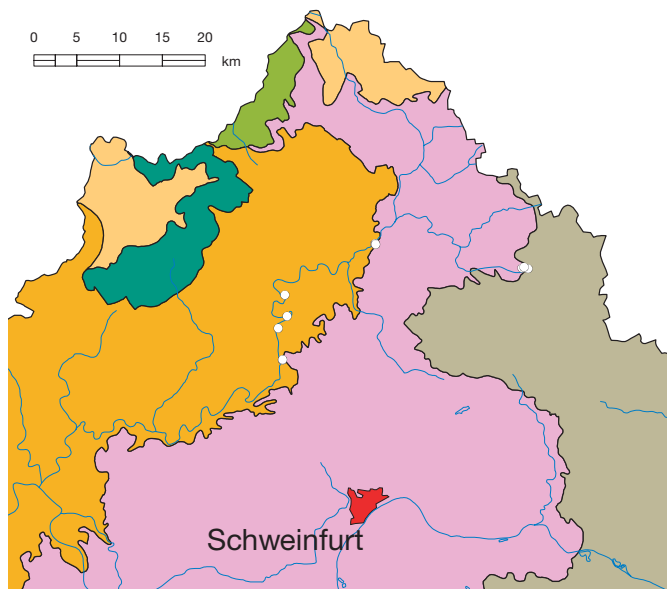


Abb. 3.2.2-1: Lage der 11 Probenahmepunkte aus dem Zechstein in salinarer Fazies

Insgesamt liegen von Grundwässern aus dem Zechstein in salinarer Fazies Analysenergebnisse aus elf Probenahmestellen mit acht Vollanalysen vor. Wegen der geringen Probenzahl wurden die Daten nur eingeschränkt statistisch ausgewertet und die angegebenen Bandbreiten der Werte sind mit einer entsprechenden Unsicherheit behaftet.

Aufgrund der sehr guten Löslichkeit der Salze (insbesondere Steinsalz) überwiegen bei den Wässern die Alkaligehalte, hier vorwiegend Natrium (Abb. 3.2.2-3). Bei der Anionenverteilung überwiegt Chlorid, wobei auch die Gehalte an Sulfat und Hydrogenkarbonat erheblich sind. Wie das Piper-Diagramm (Abb. 3.2.2) zeigt, sind die Wässer bis auf eine

Ausnahme nach FURTA & LANGGUTH (1967) als „alkalische Wässer, überwiegend chloridisch“ zu bezeichnen.

Für die Wässer ist eine sehr hohe Gesamtmineralisation charakteristisch; es handelt sich um die Einheit mit den am höchsten mineralisierten Wässern. Bei einem Medianwert von über 10 g/l sind die Wässer mehrheitlich als Salzwässer, ansonsten durchgehend als Brackwässer zu bezeichnen. Die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten liegen im Median bei über 1.300 mS/m.

Mit einer Gesamthärte von durchgehend über 34°dH sind die Wässer „sehr hart“ (Härtebereich 4). Der pH-Wert liegt mit 5,7 bis 7,1 im sauren bis neutralen Bereich. Die untersuchten

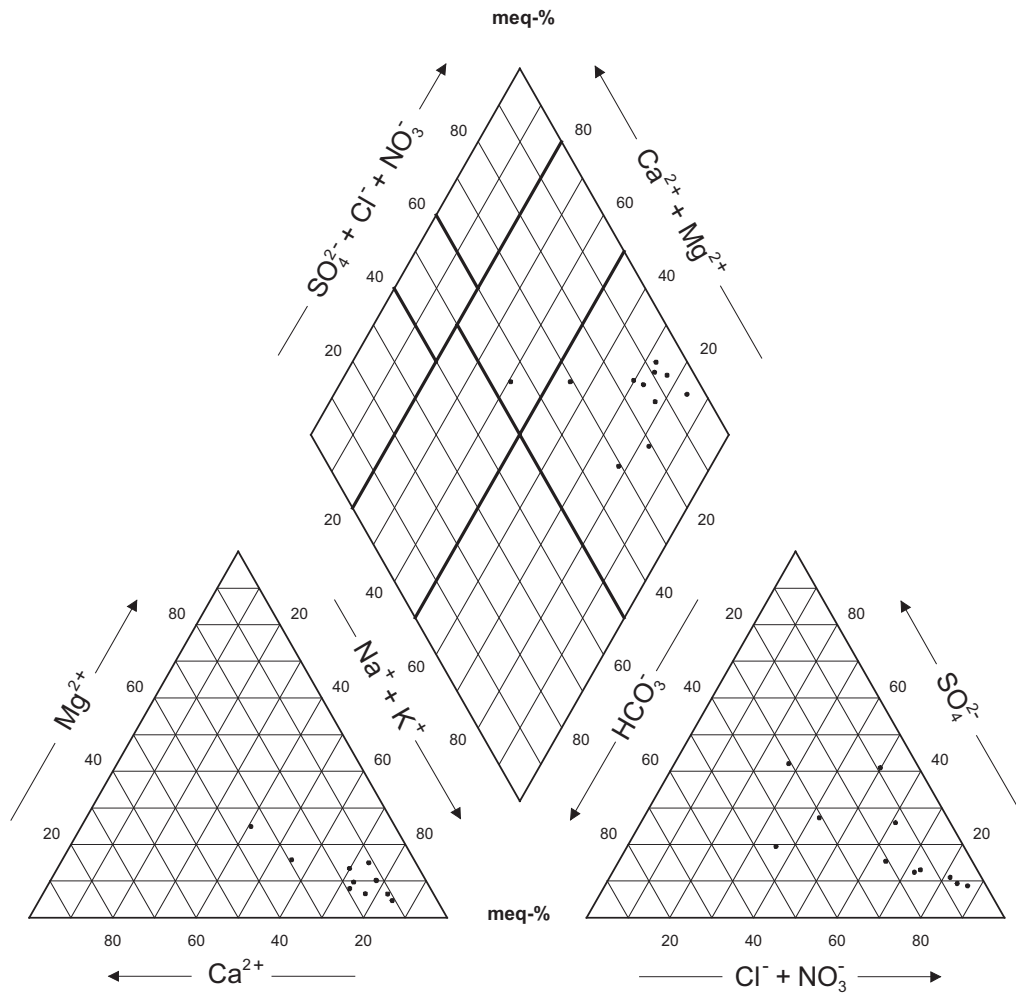


Abb. 3.2.2-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Zechstein in salinarer Fazies im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTA & LANGGUTH (1967) (11 Probenahmestellen)

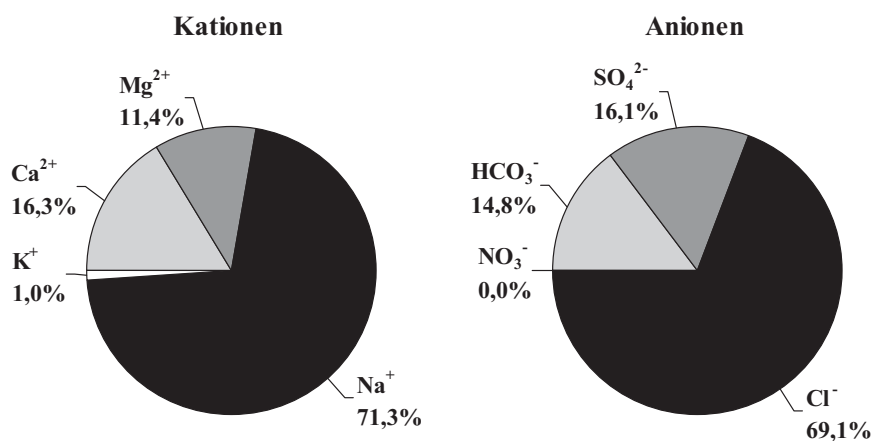


Abb. 3.2.2-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Zechstein in salinarer Fazies

Wässer sind sauerstoffuntersättigt. Die Gehalte an Eisen (Median 16,2 mg/l) und Mangan (Median 1,3 mg/l) sind den reduzierenden Verhältnissen entsprechend erhöht, wobei hier die höchsten Werte aller Wässer gemessen wurden.

Hinsichtlich der Spurengehalte weisen die salinaren Wässer des Zechsteins für die meisten gemessenen Elemente die höchsten Konzentrationen der betrachteten Grundwässer auf. Am häufigsten sind (in dieser Reihenfolge) Strontium, Lithium und Bor mit Medianwerten von über 1 g/l; danach folgen Arsen, Rubidium und Zink mit Medianwerten über 100 µg/l, Kupfer, Uran, Barium, Vanadium, Titan, Aluminium, Selen und Quecksilber mit Medianen über 10 µg/l und danach Chrom, Thallium, Yttrium, Beryllium, Molybdän, Antimon, Zinn, Thorium und Blei mit Werten über 1 µg/l. Auch für alle anderen Spurenstoffe (Cobalt, Nickel, Lanthan, Wismut, Cadmium und Blei) wurden hohe Einzelwerte gefunden.

3.2.3 Buntsandstein

Die betrachteten Wässer des Buntsandsteins stammen aus dem Schichtstufenland im äußersten NW Bayerns sowie aus den entsprechenden Einheiten im Bruchschollenland (Abb. 3.2.3-1).

Die Grundwasserleiter werden überwiegend aus Sandsteinen mit Ton- und Schluffsteinlagen aufgebaut, die einen silikatischen Gesteinschemismus aufweisen. Im Oberen Buntsandstein werden auch Gesteine mit Gipslagen angetroffen. Es handelt sich um Festgesteins-Kluft- und Kluft-Poren-Grundwasserleiter. Im Buntsandstein sind bereichsweise mehrere Stockwerke ausgebildet, die durch Ton- bzw. Schluffsteinlagen getrennt werden.

Der Untere und Mittlere Buntsandstein stellt den Hauptgrundwasserleiter (Mächtigkeit: bis ca. 500 m) und ist von regionaler bis überregionaler wasserwirtschaftlicher Bedeutung. Im Obe-

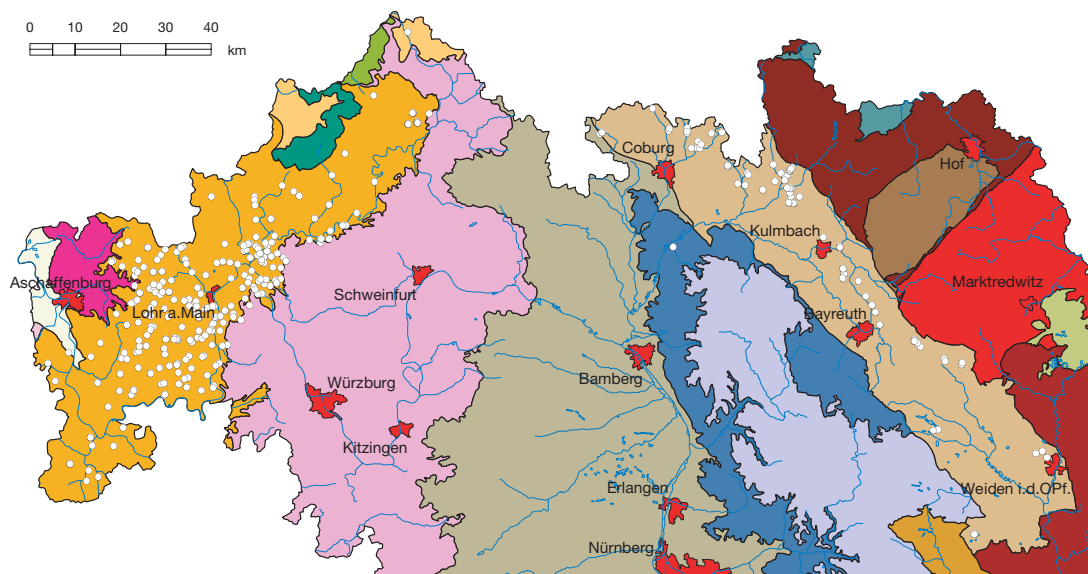


Abb. 3.2.3-1: Lage der 338 Probenahmepunkte aus dem Buntsandstein

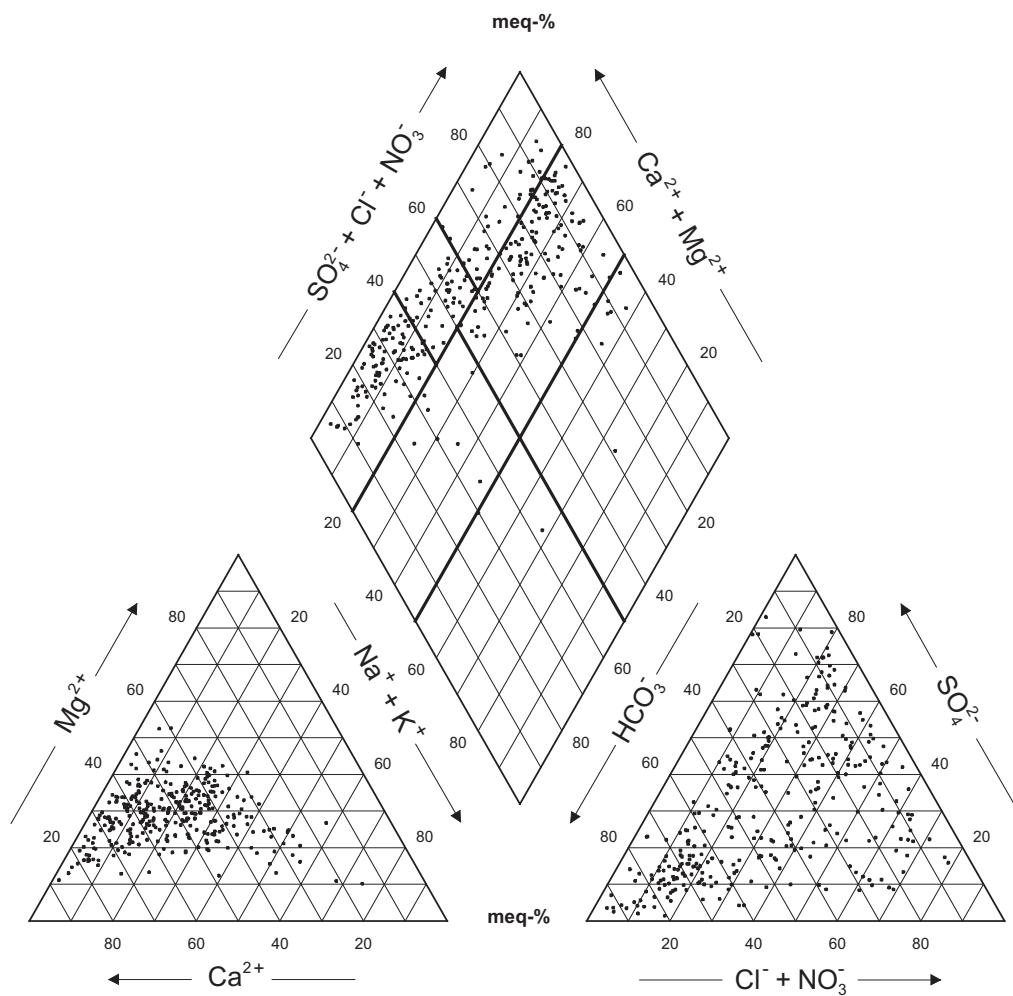


Abb. 3.2.3-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Buntsandstein im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (311 Probenahmestellen)

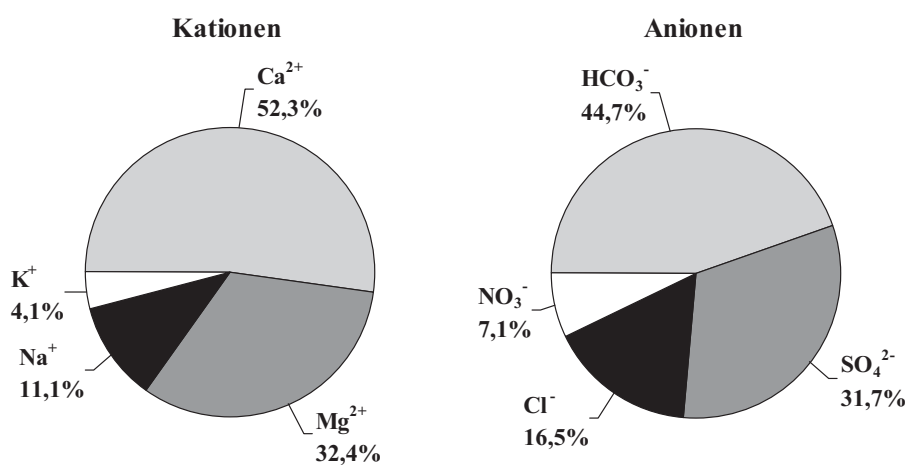


Abb. 3.2.3-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Buntsandstein

ren Buntsandstein des Schichtstufenlands finden sich vor allem im NE schwebende Grundwasserstockwerke. Die Sohlschicht des Hauptgrundwasserstockwerks wird vom permischen Bröckelschiefer gebildet, der aus Ton- und Schluffsteinen zusammengesetzt ist.

Besonders der Obere Buntsandstein weist in den Hochlagen häufig eine Überdeckung durch Löss und Fließerden auf und ist dort gegenüber Schadstoffeinträgen relativ gut geschützt.

Von Buntsandsteinwässern liegen Analysenergebnisse aus 338 Probenahmestellen mit 167 Vollanalysen vor. Hinsichtlich der Zusammensetzung der Hauptelemente sind die Wässer aus dem Buntsandstein zwar meist von den Erdalkalimetallen Calcium und Magnesium dominiert, jedoch sind auch die Alkalimetalle Natrium und Kalium häufiger in höheren Anteilen vertreten (Abb. 3.2.3-2). Die Verteilung der Anionen zeigt keinen klaren Trend; Hydrogenkarbonat, Sulfat sowie Chlorid und Nitrat sind in unterschiedlichsten Anteilen vertreten. Bezüglich der Klassifikation nach FURTAK & LANGGUTH (1967) streuen die Wässer des Buntsandsteins demnach ebenfalls in mehrere Felder von „überwiegend hydrogenkarbonatisch bis überwiegend sulfatischen normal erdalkalischen Wässern“ bis hin zu „erdalkalischen Wässern mit höherem Alkaligehalt, überwiegend sulfatisch-chloridisch“. Die Ursache der Streuung vor allem der Anionen liegt wie bei den Wässern aus dem Grundgebirge neben der stofflichen Heterogenität der Grundwasserleitergesteine in einer anthropogenen Beeinflussung vor dem Hintergrund einer allgemein sehr geringen Mineralisation (s.a. UDLUFT & GATTENLÖHNER 1999). Dies zeigt sich am vergleichsweise großen relativen Anteil von Nitrat und Chlorid (über 23 meq-%) am Spektrum der Anionen (Abb. 3.2.3-3) bei eher niedrigen Absolutgehalten (6,1 mg/l bzw. 8 mg/l im Median). Regional erhöhte Chlorid- und z.T. auch Sulfatgehalte speziell im tieferen Buntsandstein im Umgriff des Mittel- und Untermains deuten dagegen auf allochemische Wässer aus den Salinarabfolgen des unterlagernden Zechsteins hin.

Mit einer Gesamtmineralisation von 80% der Wässer zwischen 46 und 558 mg/l weisen die Wässer des Buntsandsteins eine hohe Variabilität des Lösungsinhalts auf, wobei der Median von 116 mg/l deutlich unter dem Durchschnitt aller Wässer liegt. Entsprechend schwanken die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten stark und betragen im Median nur 16 mS/m. Die Gesamthärten der Wässer liegen bei 80% der Werte zwischen 1,2 und 20°dH in einem weiten Bereich von „sehr weich“ bis „hart“ (Härtebereich 1 bis 3 nach Waschmittelgesetz). Der pH-Wert von 5,2 bis 7,3 reicht vom sauren bis in den noch neutralen Bereich, wobei mit einem Median von 6,4 die sauren Wässer überwiegen. Auch die niedrigen Werte des Sättigungsindex für Calciumkarbonat (Median -3,2) weisen auf eine überwiegende Karbonatuntersättigung hin, die auf den vorwiegend silikatischen Gesteinschemismus im Buntsandstein zurückzuführen ist.

Die Sauerstoffgehalte der betrachteten Buntsandsteinwässer sind überwiegend hoch (Median der Sauerstoffsättigung: 81,6%), dementsprechend liegen die Eisen- und Mangangehalte im allgemeinen unter dem Durchschnittswert aller Wässer.

Hinsichtlich der weiteren Spurenstoffe dominieren mit Medianwerten über 10 µg/l Strontium und Barium mit im Vergleich zu den anderen Grundwässern überdurchschnittlichen Gehalten. Weitere nennenswerte Spurenelementgehalte im Median zwischen 1 und 10 µg/l finden sich in der Reihenfolge abnehmender Konzentration bei den Elementen Zink, Aluminium, Bor, Lithium, Titan, Rubidium, Nickel, Arsen und Kupfer.

3.2.4 Muschelkalk

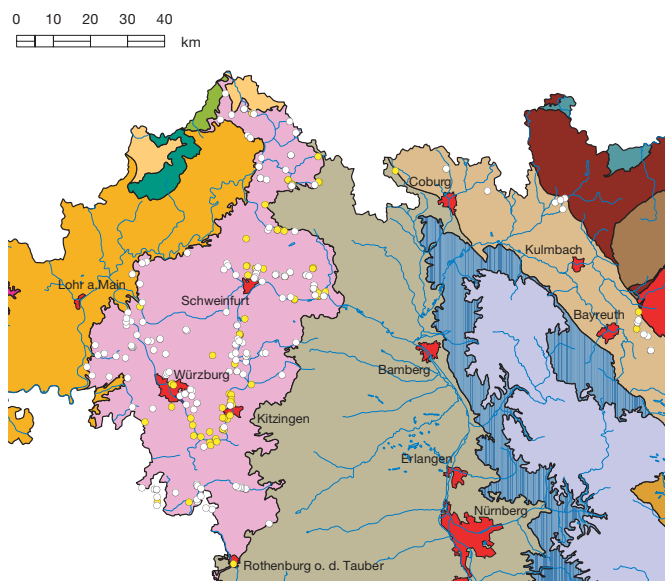


Abb. 3.2.4-1: Lage der Probenahmepunkte aus dem Muschelkalk in karbonatisch-klastischer Fazies (weiße Punkte, n = 173) und dem Mittleren Muschelkalk in salinarer Fazies (gelbe Punkte, n = 83)

Das Verbreitungsgebiet der Muschelkalk-Einheiten erstreckt sich über die in Nordbayern gelegenen hydrogeologischen Teilräume Muschelkalk-Platten und Bruchschollenland (Abb. 3.2.4-1). In den Kalk- und Mergelsteinen des Muschelkalks sind bis zu drei Grundwasserstockwerke ausgebildet, die jeweils durch Tonsteine voneinander getrennt sind. Unterer und Oberer Muschelkalk weisen einen vorwiegend karbonatischen, der Mittlere Muschelkalk aufgrund seiner Gipsführung einen vorwiegend sulfatischen Gesteinschemismus auf. Die Basis der Muschelkalk-Grundwasserleiter wird durch die Röttonsteine des Oberen Buntsandsteins gebildet. Die oberen Partien des Mittleren Muschelkalks stellen zusammen mit den bis 100 m mächtigen gut geklüfteten Kalksteinen des Oberen Muschelkalks einen Festgesteins-

Grundwasserleiter (Kluft- und Kluft-Karst-Grundwasserleiter) von regionaler Bedeutung dar. Die Wässer des Mittleren Muschelkalks sind wegen ihrer hohen Sulfatgehalte überwiegend nicht für die Trinkwassergewinnung geeignet.

Der Muschelkalk ist im hydrogeologischen Teilraum „Muschelkalk-Platten“ bereichsweise durch Tone und Mergel des Unteren Keupers überdeckt. Dort besteht für den Muschelkalk-Grundwasserleiter ein guter Schutz gegen Schadstoffeinträge. Außerdem finden sich bereichsweise Lössüberdeckungen mit Mächtigkeiten um ca. 4 m und Flugsande, die zu einer erhöhten Schutzfunktion für das oberste Grundwasserstockwerk beitragen. Die oberflächennahen Grundwasservorkommen ohne Deckschichten sind nur gering geschützt.

Aus der karbonatisch-klastischen Fazies des Muschelkalks liegen Analysenergebnisse von 173 Probenahmestellen mit 71 Vollanalysen vor; aus der salinaren Fazies des Mittleren Muschelkalks liegen Analysen von 83 Probenahmepunkten mit 36 Vollanalysen vor.

An Hauptbestandteilen dominieren bei den Wässern des karbonatisch-klastischen Muschelkalks Calcium und Magnesium sowie Hydrogencarbonat. Hinsichtlich der Anionen weisen die Wässer erhöhte Werte an Sulfat und Chlorid auf, wobei insbesondere die Sulfatgehalte sowohl durch anthropogene Einflüsse als auch durch hydraulische Verbindungen zu den stark sulfathaltigen Wässern des salinaren Mittleren Muschelkalks zu erklären sind. Ferner besteht aufgrund häufiger anthropogener Beeinflussung eine Tendenz zu erhöhten Nitratgehalten. Wie das PIPER-Diagramm (Abb. 3.2.4-2) zeigt, fallen die Wässer nach der Klassifizierung von FURTAK &

LANGGUTH (1967) in das Feld der „normal erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen sowie der hydrogenkarbonatisch-sulfatischen Wässer“.

Die salinaren Wässer des Mittleren Muschelkalks zeichnen sich dagegen durch ein Überwiegen des Sulfats aus und sind damit vorwiegend als „normal erdalkalische, hydrogenkarbonatisch-sulfatische bis überwiegend sulfatische Wässer“ zu klassifizieren. Vereinzelt kommen auch „alkalische, überwiegend sulfatische Wässer“ vor (Abb. 3.2.4-4).

Mit einer Gesamtmineralisation von 80% aller Wässer im Bereich zwischen 590 und 900 mg/l (Median 721 mg/l) weisen die Wässer des karbonatisch-klastischen Muschelkalks eine im Vergleich aller Wässer überdurchschnittliche Mineralisation auf. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit liegt im Median bei fast 80 mS/m. Deutlich höher ist die Gesamtmineralisation der sulfatischen Wässer im Mittleren Muschelkalk (Median 1.095 mg/l; 880 bis 2.802 mg/l).

Die Gesamthärte der Wässer aus dem karbonatisch-klastischen Muschelkalk liegt für 80% der Werte zwischen 20,7 und 31,1°dH und entspricht damit der Klassifikation „hart“ bis „sehr hart“ (Härtebereich 4 nach Waschmittelgesetz). Die Wässer des salinaren Mittleren Muschelkalks sind mit einer Gesamthärte im Bereich von 32 bis 95°dH generell „sehr hart“ (Härtebereich 4).

Der pH-Wert befindet sich in den karbonatisch gepufferten Wässern des karbonatisch-klastischen Muschelkalks im neutralen bis schwach alkalischen Bereich (Median: 7,3). Da sowohl oberflächennahe als auch tiefere Wässer erfasst wurden, variiert die Sauerstoffsättigung in einem breiten Bereich zwischen 26,7% und 86,0% (80% aller Wässer); der Median liegt bei 62,0%. Wässer mit höheren Eisen- und Mangangehalten sind häufig und treten vorwiegend innerhalb der sauerstoffarmen Tiefenwässer auf.

Die Wässer des salinaren Mittleren Muschelkalks weisen pH-Werte auf, die ebenfalls überwiegend im neutralen Bereich liegen (80% aller Werte bei pH 6,8 bis pH 7,4). Hinsichtlich der Sauerstoffsättigung dominieren die teilreduzierten Wässer (Medianwert 32,7%). Entsprechend hoch sind auch die Eisen- und Mangangehalte (10% aller Wässer über 1 mg/l Eisen).

An weiteren Spurenelementen mit Medianwerten über 10 µg/l werden im karbonatisch-klastischen Muschelkalk Strontium (Median 340 µg/l), Barium, Bor, Zink und Lithium sowie mit Konzentrationen über 1 µg/l Titan, Nickel, Rubidium, Arsen, Kupfer und Uran festgestellt.

Die Wässer der salinaren Fazies des Mittleren Muschelkalks weisen zusammen mit den Salinarwässern anderer Formationen bei einer Reihe von Spurenstoffen mit die höchsten Gehalte innerhalb aller untersuchten Proben auf. Strontium tritt in 90% aller Wässer mit Konzentrationen über 1 mg/l auf. Spurenstoffe mit Medianwerten über 10 µg/l sind Bor, Zink, Barium und Lithium; mit Medianwerten über 1 µg/l finden sich in der Reihenfolge abnehmender Konzentration Titan, Chrom, Nickel, Rubidium, Selen, Kupfer, Arsen, Uran und Molybdän. Darüber hinaus werden für die Spurenelemente Vanadium und Cobalt häufig überdurchschnittliche Konzentrationen gemessen.

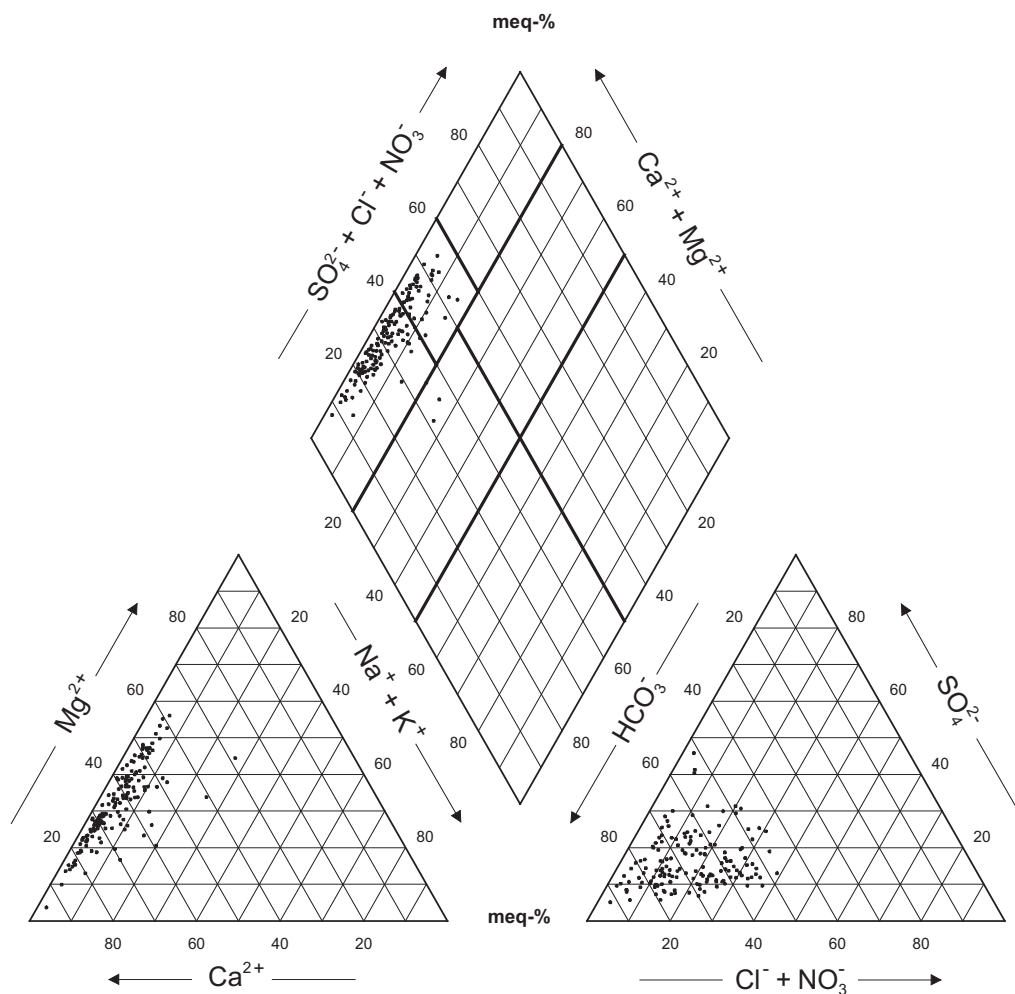


Abb. 3.2.4-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Muschelkalk in karbonatisch-klastischer Fazies im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (152 Probenahmestellen)

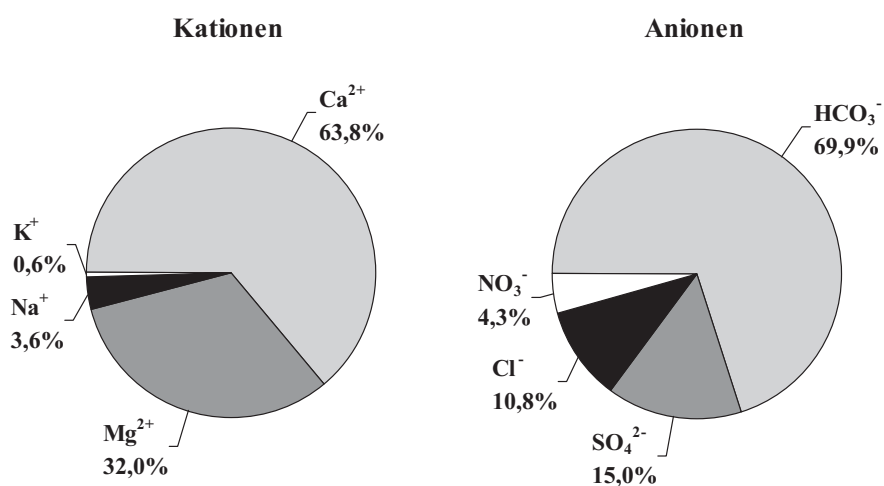


Abb. 3.2.4-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Muschelkalk in karbonatisch-klastischer Fazies

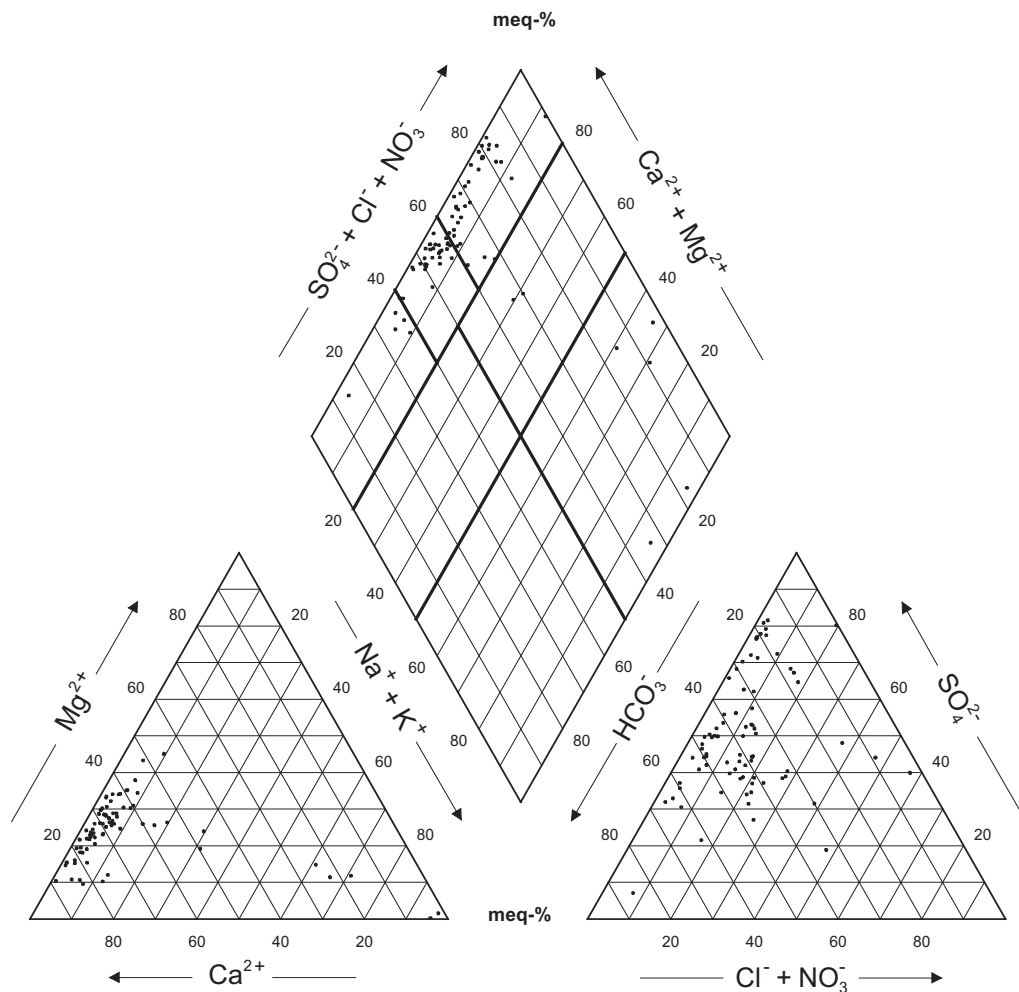


Abb. 3.2.4-4: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Mittleren Muschelkalk in salinarer Fazies im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTA & LANGGUTH (1967) (79 Probenahmestellen)

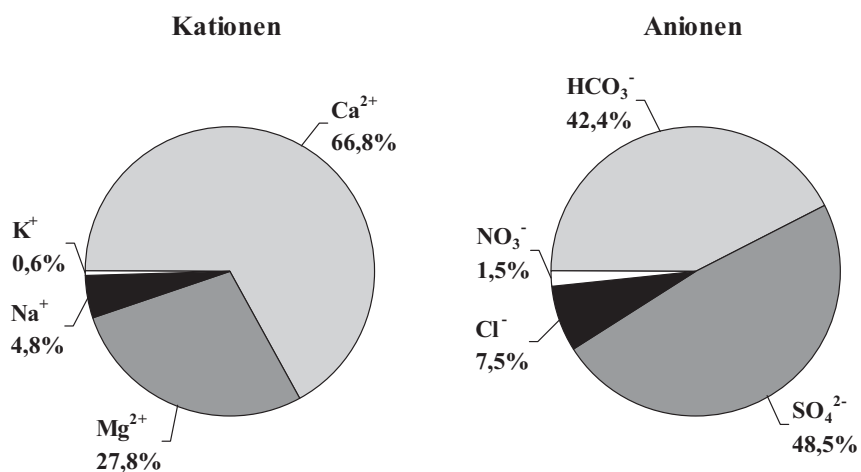


Abb. 3.2.4-5: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Mittleren Muschelkalk in salinarer Fazies

3.2.5 Unterer Keuper

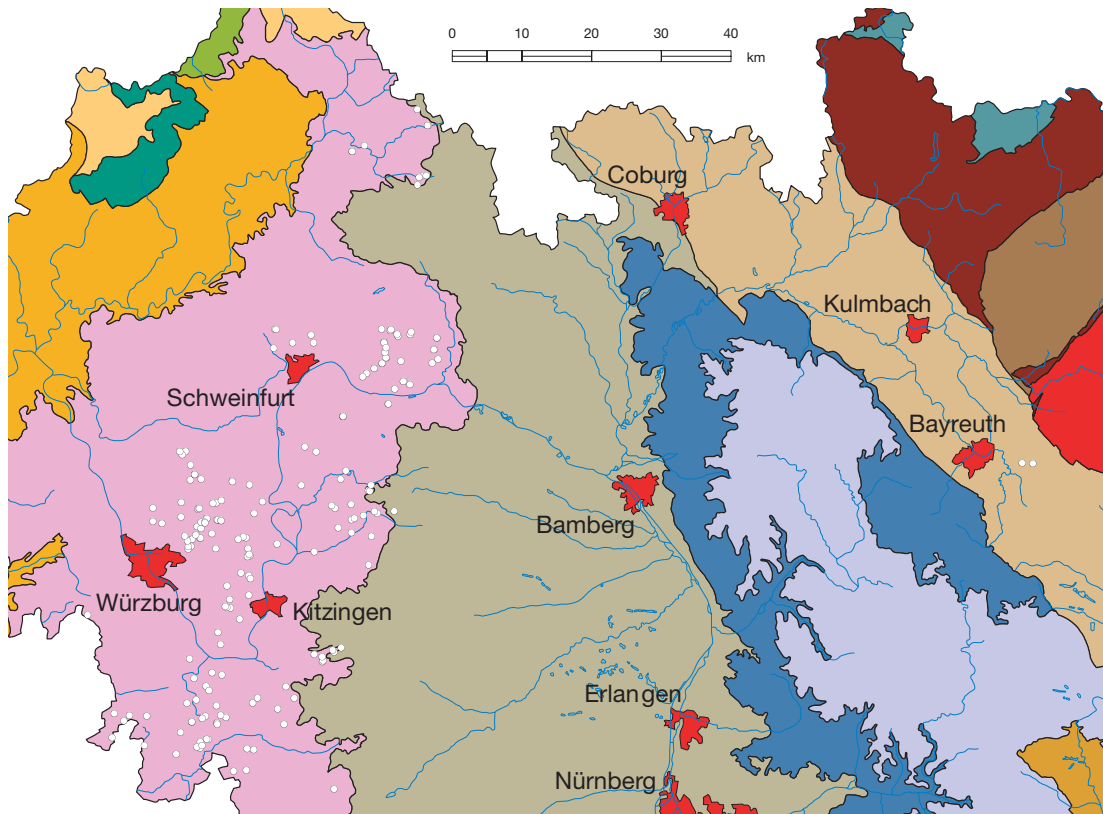


Abb. 3.2.5-1: Lage der 195 Probenahmepunkte aus dem Unteren Keuper (Lettenkeuper)

Der Untere Keuper (auch: Lettenkeuper) stellt einen insgesamt relativ gering mächtigen (bis ca. 50 m) Festgesteins-Kluft-Grundwasserleiter im Randbereich der hydrogeologischen Teilräume Muschelkalk-Platten und Keuper-Bergland des Schichtstufenlands in Nordbayern dar. Weitere Vorkommen finden sich im Bruchschollenland. Im westlichen Randbereich des Ausstrichs der Einheiten des Unteren Keupers im Teilraum Muschelkalk-Platten sind diese meist grundwasserfrei und dienen als Deckschicht der Grundwasserleiter im Muschelkalk. Die Grundwasser führenden Einheiten sind insbesondere der karbonatisch aufgebaute Grenzdolomit (bis 5 m mächtig) und der Werksandstein (bis 20 m mächtig). Aufgrund seiner geringen Mächtigkeit ist der Untere Keuper nur von lokaler Bedeutung für die Wasserversorgung. Die wasserwirtschaftliche Nutzung des Unteren Keupers beschränkt sich überwiegend auf den Bereich seines Ausstrichs an der Oberfläche. Das Wasser wird dabei zumeist aus Quellen und Flachbrunnen gewonnen. Aufgrund der geringen Flurabstände und fehlender Deckschichten ist das Grundwasser in diesem Bereich nur sehr gering gegen Stoffeinträge von der Oberfläche geschützt.

Aus dem Unteren Keuper liegen Grundwasser-Analysenergebnisse von 195 Entnahmestellen mit insgesamt 56 Vollanalysen vor (Abb. 3.2.5-1).

Die Hauptbestandteile der karbonatisch geprägten Wässer sind Calcium und Magnesium sowie Hydrogenkarbonat (Abb. 3.2.5-3). Im Anionen-Dreieck (Abb. 3.2.5-2) zeigt sich eine deutliche

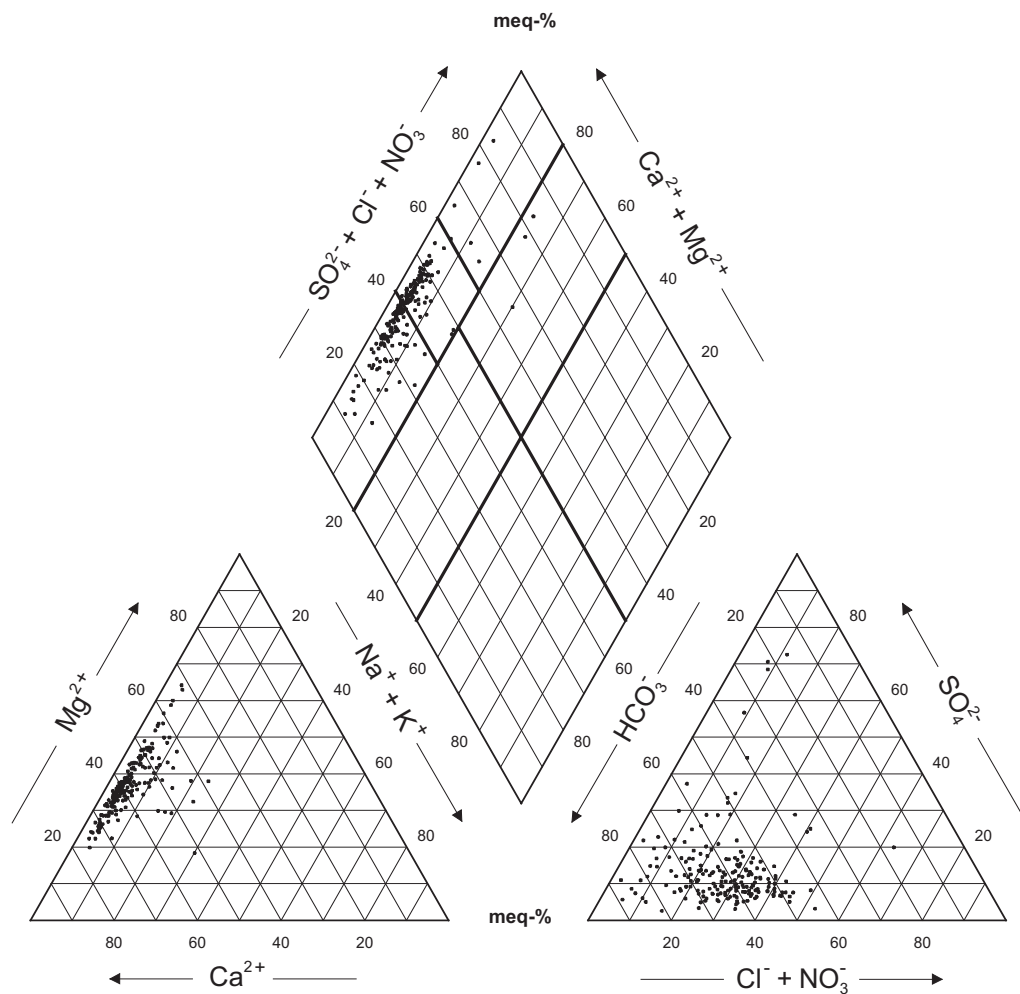


Abb. 3.2.5-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Unteren Keuper im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTA & LANGGUTH (1967) (193 Probenahmestellen)

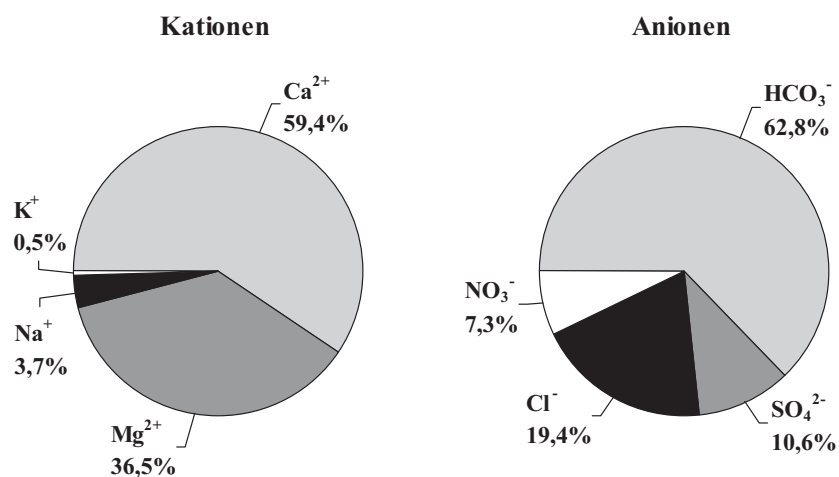


Abb. 3.2.5-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Unteren Keuper

Tendenz zu chloridisch-nitratischen und auch zu sulfatischen Wässern ab. Die hohen Chlor- und Nitratgehalte und überwiegend auch die Sulfatgehalte sind auf anthropogene Einflüsse der oberflächennahen Wässer in dieser intensiv landwirtschaftlich genutzten Region zurückzuführen. Nach FURTAK & LANGGUTH (1967) kann die Mehrzahl der Wässer als „normal erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische und hydrogenkarbonatisch-sulfatische Süßwässer“ angesprochen werden.

Die Gesamtmineralisation der Wässer des Unteren Keupers markiert mit 80% aller Werte zwischen etwa 640 und 950 mg/l die obere Grenze der betrachteten nicht salinaren Wässer. Entsprechend ist auch die spezifische elektrische Leitfähigkeit um 90 mS/m vergleichsweise hoch. Das Grundwasser ist mit einer Gesamthärte zwischen 22,5 und 35,0°dH „hart“ bis „sehr hart“ (Härtebereich 3 nach Waschmittelgesetz). Der pH-Wert liegt entsprechend dem karbonatischen Gesteinschemismus im neutralen bis schwach alkalischen Bereich zwischen 7,0 und 7,5 (Median: 7,3).

Die Sauerstoffwerte betragen bei 80% aller Wässer zwischen 38,4% und 89,4% Sauerstoffsättigung (Median 68%) und befinden sich damit im teilgesättigten bis gesättigten Bereich. Bei den sauerstoffärmeren Wässern werden im Vergleich etwas erhöhte Gehalte an Eisen und Mangan gefunden.

Weitere häufigere Spurenstoffe mit Konzentrationen im Median über 10 µg/l sind in der Reihenfolge abnehmender Konzentration Barium, Strontium, Bor und Lithium sowie mit Gehalten über 1 µg/l Zink, Chrom, Titan, Uran, Nickel und Arsen.

3.2.6 Mittlerer Keuper in salinarer Fazies

Das Verbreitungsgebiet der zur Germanischen Trias zählenden Keuper-Einheiten liegt im Schichtstufen- und Bruchschollenland Nordbayerns. Bei der hydrogeologischen Einheit Mittlerer Keuper in salinarer Fazies handelt es sich um Bereiche innerhalb des Mittleren Keupers, die sulfatische Wässer enthalten. Die Gesteine des Grundgips bestehen überwiegend aus Gips, ansonsten werden in den zugeordneten Einheiten Gipslagen im Wechsel mit Sandsteinen, Tonsteinen, Mergelsteinen und z.T. Dolomiten (z.B. Lehrbergsschichten) angetroffen. Es handelt sich um Festgesteins-Kluft- bzw. Kluft-Karst-Grundwasserleiter. Aufgrund ihrer hohen Sulfatgehalte können die Wässer nicht zu Trinkwasserzwecken verwendet werden; daher sind die Bereiche der salinaren Keuperwässer Trinkwassermangelgebiete.

Die flurnahen Grundwasservorkommen sind aufgrund weitgehend fehlender schützender Deckschichten nur gering gegen Stoffeinträge von der Oberfläche geschützt. In Bereichen mit mächtigerer Grundwasserüberdeckung durch Keuperschichten ist aufgrund der vielfach feinkörnigen Ausbildung des Keupers (Tonsteine, Mergelsteine) von einer guten Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung auszugehen.

Von Grundwässern aus dem Mittleren Keuper in salinarer Fazies liegen Analysenergebnisse aus 70 Probenahmestellen mit insgesamt 29 Vollanalysen vor (Abb. 3.2.6-1).

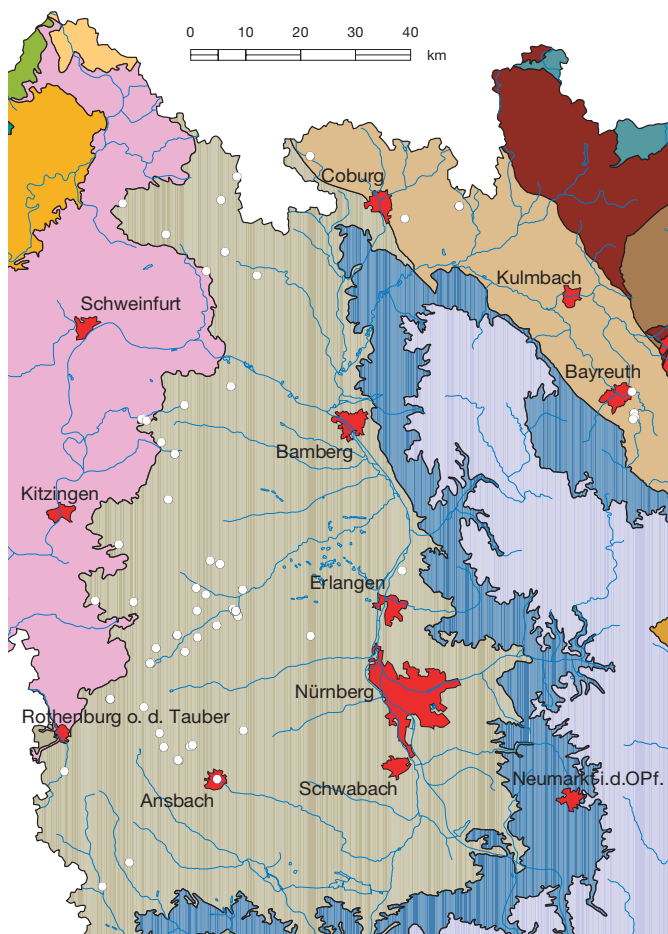


Abb. 3.2.6-1: Lage der 70 Probenahmepunkte aus dem Mittleren Keuper in salinarer Fazies

Entsprechend der guten Löslichkeit des Gipses zeichnen sich die Wässer durch hohe Sulfatgehalte aus (Abb. 3.2.6-3). Wie das Piper-Diagramm (Abb. 3.2.6-2) zeigt, fallen die meisten Wässer nach FURTAK & LANGGUTH (1967) in die Felder der „normal erdalkalischen, hydrogenkarbonatisch bis sulfatischen bzw. überwiegend sulfatischen Wässer“. Wässer mit höheren Chlorid- und Nitratgehalten sind oberflächennah und weisen auf eine anthropogene Beeinflussung hin.

Für die Wässer ist eine hohe Gesamtmineralisation charakteristisch; bei einem Medianwert von über 1 g/l sind sie mehrheitlich als Brackwässer zu bezeichnen. Die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten liegen im Median bei 145 mS/m. Die Wässer sind mit einer Gesamthärte von 80% der Werte zwischen 27,6 und 97°dH überwiegend „sehr hart“ (Härtebereich 4 nach Waschmittelgesetz). Der pH-Wert liegt bei 80% der Werte zwischen 6,9 und 7,5 im neutralen bis schwach alkalischen Bereich (Median: 7,2). Da sowohl

oberflächennahe als auch tiefere Wässer erfasst wurden, liegt die Sauerstoffsättigung in einem breiten Bereich mit 80% aller Wässer zwischen 14% und 76% Sauerstoffsättigung; der Median von 40% zeigt eine Tendenz der Wässer zur Sauerstoffuntersättigung und damit reduzierenden Verhältnissen. Die Eisengehalte der Wässer befinden sich mit einem Median von 0,04 mg/l etwas über dem Schnitt aller Wässer (0,02 mg/l); Mangan ist mit der Hälfte aller Werte unter der Bestimmungsgrenze unauffällig.

Insgesamt weisen die salinaren Wässer aus dem Mittleren Keuper wie die anderen Salinarwässer ein recht reiches Inventar an Spurenstoffen auf. Es überwiegen in der Reihenfolge abnehmender Konzentration mit Medianwerten über 10 µg/l Strontium, Bor, Lithium, Zink, Barium und Titan sowie mit Werten über 1 µg/l Uran, Kupfer, Rubidium, Nickel, Arsen, Cobalt und Vanadium.

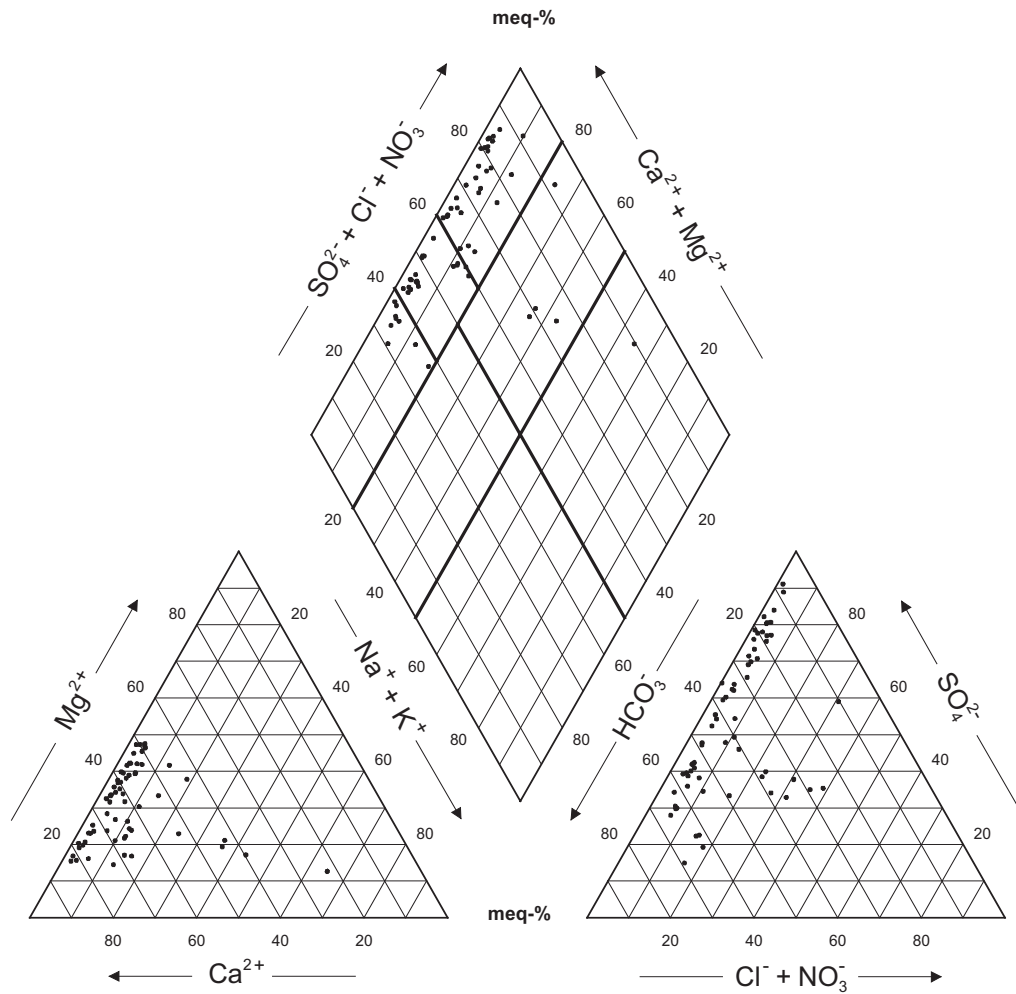


Abb. 3.2.6-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Mittleren Keuper in salinarer Fazies im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (64 Probenahmestellen)

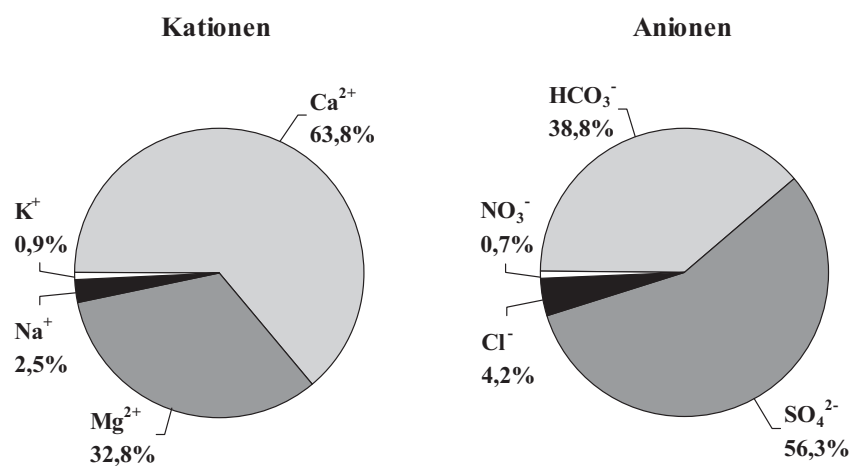


Abb. 3.2.6-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Mittleren Keuper in salinarer Fazies

3.2.7 Mittlerer und Oberer Keuper in klastischer Fazies

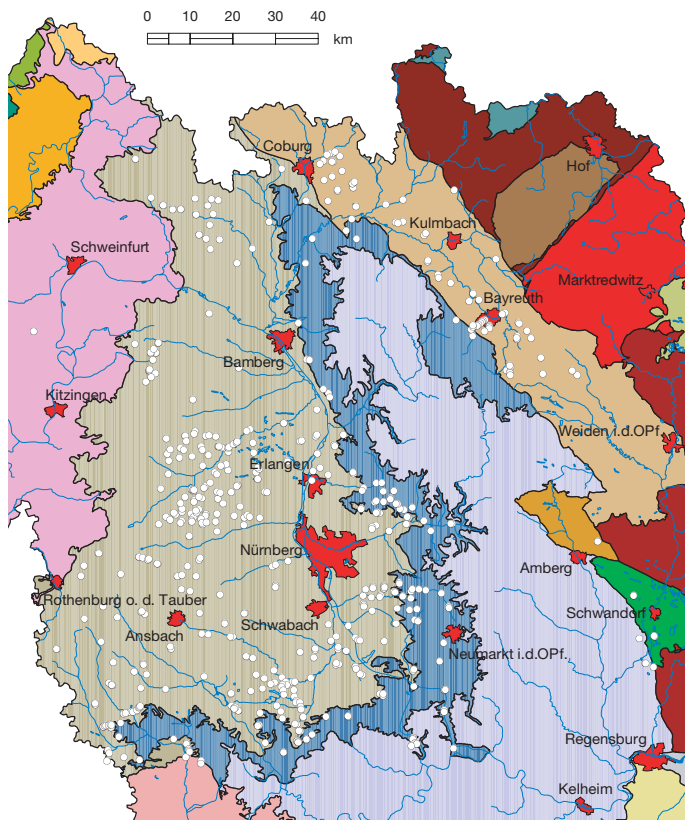


Abb. 3.2.7-1: Lage der 546 Probenahmepunkte aus dem Mittleren und Oberen Keuper in klastischer Fazies

Das Verbreitungsgebiet der zur Germanischen Trias zählenden Keuper-Einheiten liegt im Schichtstufen- und Bruchschollenland Nordbayerns. Die hier betrachtete Einheit Mittlerer und Oberer Keuper in klastischer Fazies stellt eine Zusammenfassung mehrerer hydrogeologischer Einheiten dar, die ähnliche Ablagebedingungen und damit eine ähnliche petrografische Zusammensetzung der Gesteine (Sandsteine mit Ton- und Mergelsteinlagen in unterschiedlichen Anteilen) aufweisen. Es handelt sich um Festgesteins-Kluft-Grundwasserleiter mit mäßiger bis geringer Durchlässigkeit. Insgesamt zeichnet sich der Keuper durch einen ausgeprägten Wechsel von Grundwasser leitenden und gering leitenden Schichten aus. Den Hauptgrundwasserleiter stellt der bis ca. 250 m mächtige regional für die Wasserversorgung bedeutende Sandsteinkeuper des Mittleren Keupers mit den Einheiten des Burg- und Blasensandsteins, in dem sich Sand-

steine mit Tonsteinen horizontal und vertikal verzahnen. Weitere hydrogeologische Einheiten, die mit erfasst wurden, sind die Rhät- und Rhät-Lias-Schichten des Oberen Keupers, die Lehrbergschichten in sandiger Fazies sowie der Benker Sandstein als wichtiger Tiefengrundwasserleiter.

Für die flurnahen Grundwasservorkommen ist nur von einer geringen Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung auszugehen. Gut geschützt sind die Grundwässer des Hauptgrundwasserleiters im Sandsteinkeuper, die noch von Feuerletten bedeckt sind. Teilweise treten Löss auf, die zu einer erhöhten Schutzfunktion beitragen. Weiterhin sind die Bereiche höherer Flurabstände abseits der Vorfluter aufgrund der relativ gering durchlässigen tonigen Zwischenschichten innerhalb des Keupers als gut geschützt anzusehen.

Von Grundwässern aus dem Mittleren und Oberen Keuper in klastischer Fazies liegen Analyseergebnisse von 546 Probenahmestellen mit insgesamt 204 Vollanalysen vor (Abb. 3.2.7-1).

Entsprechend dem heterogenen Aufbau der Gesteine des Mittleren und Oberen Keupers weisen die Wässer eine zum Teil recht unterschiedliche Zusammensetzung der Hauptelemente auf

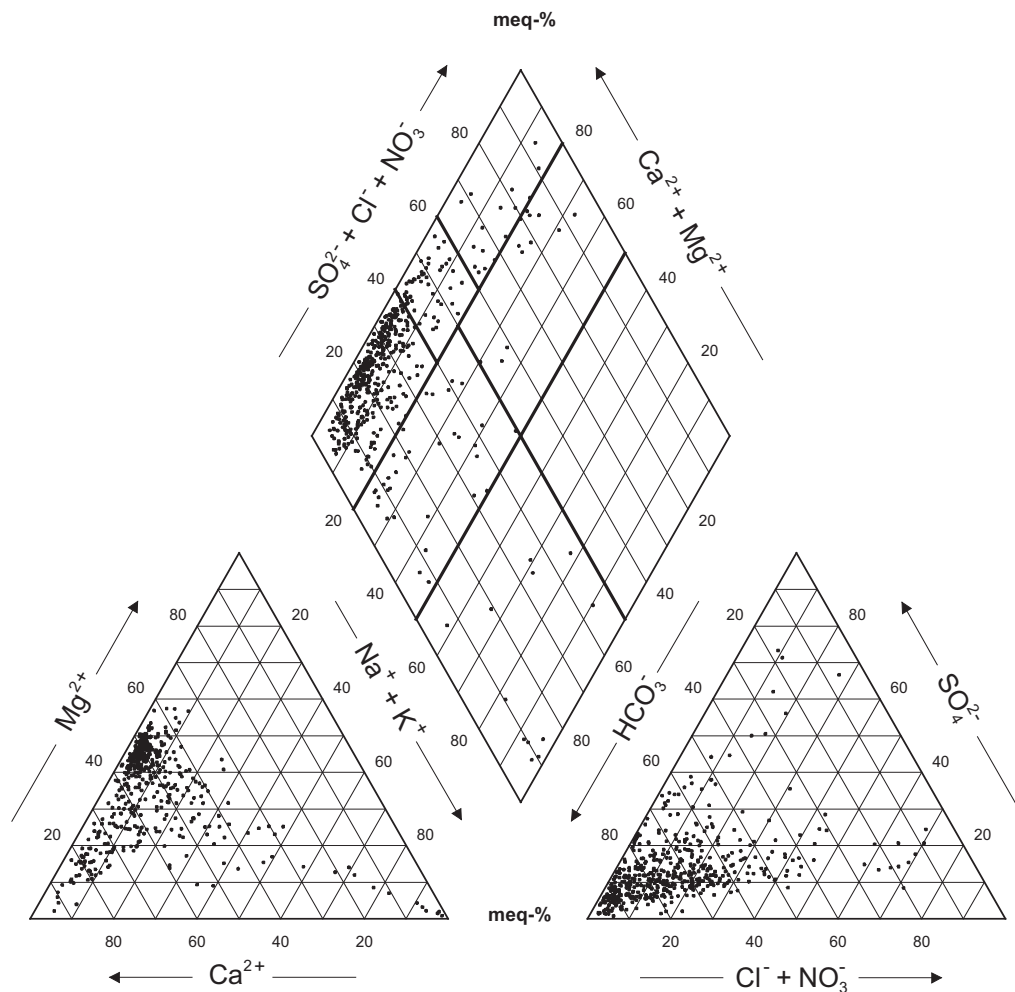


Abb. 3.2.7-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Mittleren und Oberen Keuper in klastischer Fazies im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (489 Probenahmestellen)

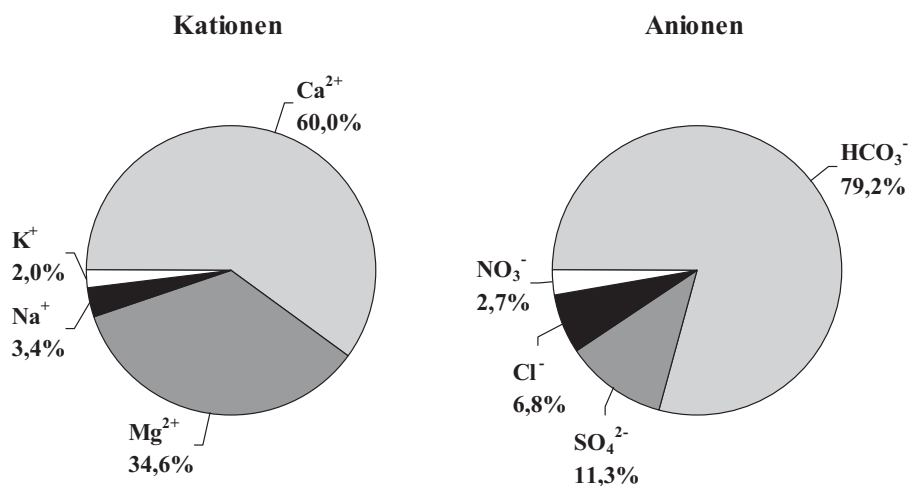


Abb. 3.2.7-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Mittleren und Oberen Keuper in klastischer Fazies

(Abb. 3.2.7-3). Wie das Piper-Diagramm (Abb. 3.2.7-2) zeigt, fallen die meisten Wässer nach FURTAKE & LANGGUTH (1967) in das Feld der „normal erdalkalischen, überwiegend hydrogencarbonatischen Wässer“. Aufgrund der hohen Bandbreite werden auch häufig „erdalkalische Wässer mit höherem Alkaliegehalt“ und „alkalische Wässer überwiegend hydrogencarbonatisch“ angetroffen. Auffällig ist im Kationendreieck der Übergang von der hauptsächlich erdalkalischen Zusammensetzung hin zu teilweise rein alkalischen Wässern, bei denen es sich um Austauschwässer im Kontakt mit Ton- und Mergelsteinen handelt (s.a. HEINRICHS & BAUER 1999). Die sulfatischen Wässer sind vorwiegend erdalkalisch geprägt; diese Wässer beziehen ihren Stoffinhalt entweder aus Gipslagen in den betrachteten Grundwasserleitern oder aus hydraulischen Verbindungen zu den sulfatischen Wässern des salinen Mittleren Keupers. Die in den Chlorid- und Nitrat-Bereich reichenden Wässer sind überwiegend oberflächennah und anthropogen beeinflusst.

Mit einer Gesamtmineralisation zwischen 167 und 652 mg/l (Median 476 mg/l) weisen die Wässer des Mittleren und Oberen Keupers im Vergleich aller Grundwässer einen leicht überdurchschnittlichen Lösungsinhalt auf; die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten liegen im Median bei 53 mS/m. Die Wässer sind mit einer Gesamthärte von 80% der Werte zwischen 4,5 und 22,7°dH „weich“ bis „hart“ (Härtebereich 1 bis 3 nach Waschmittelgesetz). Der pH-Wert zeigt eine im Vergleich zu anderen Grundwässern relativ breite Spanne vom sauren bis in den alkalischen Bereich (Median: 7,3; 80% der Werte zwischen 6,6 und 7,7). Offensichtlich sind die Wässer des Mittleren und Oberen Keupers bei geringen Karbonatanteilen der Gesteine (Mergelsteine, Dolomitlagen) weitgehend kalkgepuffert. Die Sauerstoffgehalte liegen entsprechend den sehr unterschiedlichen Tiefenlagen der Keuperwässer in einer recht breiten Spanne von reduzierten bis hin zu gesättigten Bedingungen (80% aller Wässer zwischen 12 und 82% Sauerstoffsättigung). Die Eisengehalte befinden sich mit einem Median von 0,04 mg/l leicht über dem Schnitt aller Wässer (0,02 mg/l); Mangan ist mit der Hälfte der Werte unter der Nachweisgrenze unauffällig.

Hinsichtlich der Spurenstoffe weisen die Wässer des Mittleren und Oberen Keupers bei einer Reihe von Elementen überdurchschnittlich hohe Konzentrationen auf. Bekannt ist insbesondere die Problematik des geogenen Arsens (UDLUFT 1979, HEINRICHS 1996). Mit Medianwerten über 10 µg/l dominieren Strontium, Barium, Lithium und Bor. Weitere Spurenstoffe mit Medianwerten über 1 µg/l sind Zink, Titan, Rubidium, Arsen, Uran und Kupfer.

3.2.8 Trias der Bodenwöhrer Bucht

Die Bodenwöhrer Bucht stellt eine großräumige Muldenstruktur in der Randlage zum Kristallin des Grundgebirges dar, in der hauptsächlich kretazische und triassische sowie in geringerem Umfang jurassische und permische Einheiten auftreten. Da die im SW der Bodenwöhrer Bucht anstehenden triassischen Einheiten (Arkosen, Sand- und Tonsteine in Beckenrandfazies) nicht weiter stratigrafisch differenzierbar sind, werden sie hier als eine eigene Einheit behandelt. Es handelt sich um einen gegen NE muldenförmig abtauchenden und durch Einheiten des Unteren und Mittleren Juras abgegrenzten Festgesteins-Kluft-Poren-Grundwasserleiter, der wirtschaftlich von regionaler Bedeutung ist.

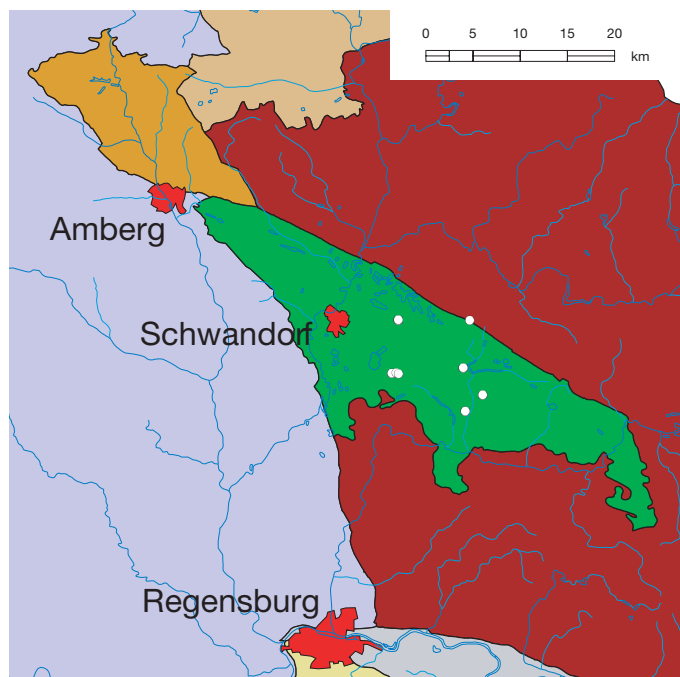


Abb. 3.2.8-1: Lage der 11 Probenahmepunkte aus der Trias der Bodengewöhrer Bucht

Da Deckschichten nur teilweise in Form toniger Sande oder als Lehme vorhanden sind, ist für die an der Oberfläche anstehenden Gesteinseinheiten im SW eine hohen Verschmutzungsempfindlichkeit gegeben; gut geschützt sind die im NE von Jura bzw. Kreide überlagerten Bereiche.

Insgesamt liegen aus der Trias der Bodengewöhrer Bucht Analysenergebnisse von 11 Probenahmestellen mit sieben Vollanalysen vor (Abb. 3.2.8-1). Wegen der geringen Probenzahl konnten die Daten nur eingeschränkt statistisch ausgewertet werden und die angegebenen Bandbreiten sind mit einer entsprechenden Unsicherheit behaftet.

Bei den Hauptelementen dominiert Calcium mit Anteilen stets über 50 meq-% und Magnesium mit bis zu 30 meq-%, wobei auch die Alkalimetalle Natrium und Kalium teilweise in höheren Anteilen bis etwa 30 meq-% vertreten sind (Abb. 3.2.8-3). Hinsichtlich der Anionen sind die Wässer überwiegend hydrogenkarbonatisch mit einer Tendenz zu höheren Sulfatgehalten. Dementsprechend fallen die Wässer nach der Klassifikation von FURTAK & LANGGUTH (1967) in die Bereiche der „normal erdalkalischen Wässer mit teilweise höherem Alkaligehalt, überwiegend hydrogenkarbonatisch bzw. hydrogenkarbonatisch-sulfatisch“ (Abb. 3.2.8-2).

Die Gesamtmineralisation der Wässer ist niedrig (Median: 150 mg/l); sie liegt im Bereich der Wässer des Buntsandsteins. Mit Gesamthärten zwischen etwa 1 und 10°dH sind die Wässer „sehr weich“ bis „weich“ (Härtebereich 1 bis 2 nach Waschmittelgesetz); der Grund hierfür ist in der niedrigen Mineralisation der überwiegend erdalkalischen Wässer zu suchen. Der pH-Wert von 5,5 bis 7,2 reicht vom sauren bis in den neutralen Bereich (Median: 6,6). In der Regel niedrige Werte des Sättigungsindex für Calciumkarbonat (Median -3,2) zeigen die Karbonatuntersättigung der Wässer. Dies ist auf den vorwiegend silikatischen Gesteinschemismus der ungliederten Trias in der klastischen Fazies zurückzuführen. Insgesamt ähneln die Wässer der Trias der Bodengewöhrer Bucht in ihren Eigenschaften stark den Wässern des Buntsandsteins.

Die Sauerstoffgehalte der betrachteten Wässer sind überwiegend gering (Median des Sauerstoffgehalts: 3,1 mg/l); die Eisengehalte liegen dennoch im Durchschnitt aller Wässer. Lediglich Mangan wird bei den untersuchten Wässern in deutlich überdurchschnittlichen Konzentrationen gemessen (Median: 0,1 mg/l).

Bei den weiteren Spurenstoffen dominieren mit Medianwerten über 10 µg/l Barium mit überdurchschnittlichen Konzentrationen sowie Strontium, Lithium, Bor und Zink. Weitere häufigere Spurenelemente mit Gehalten im Median zwischen 1 und 10 µg/l sind Rubidium und Kupfer.

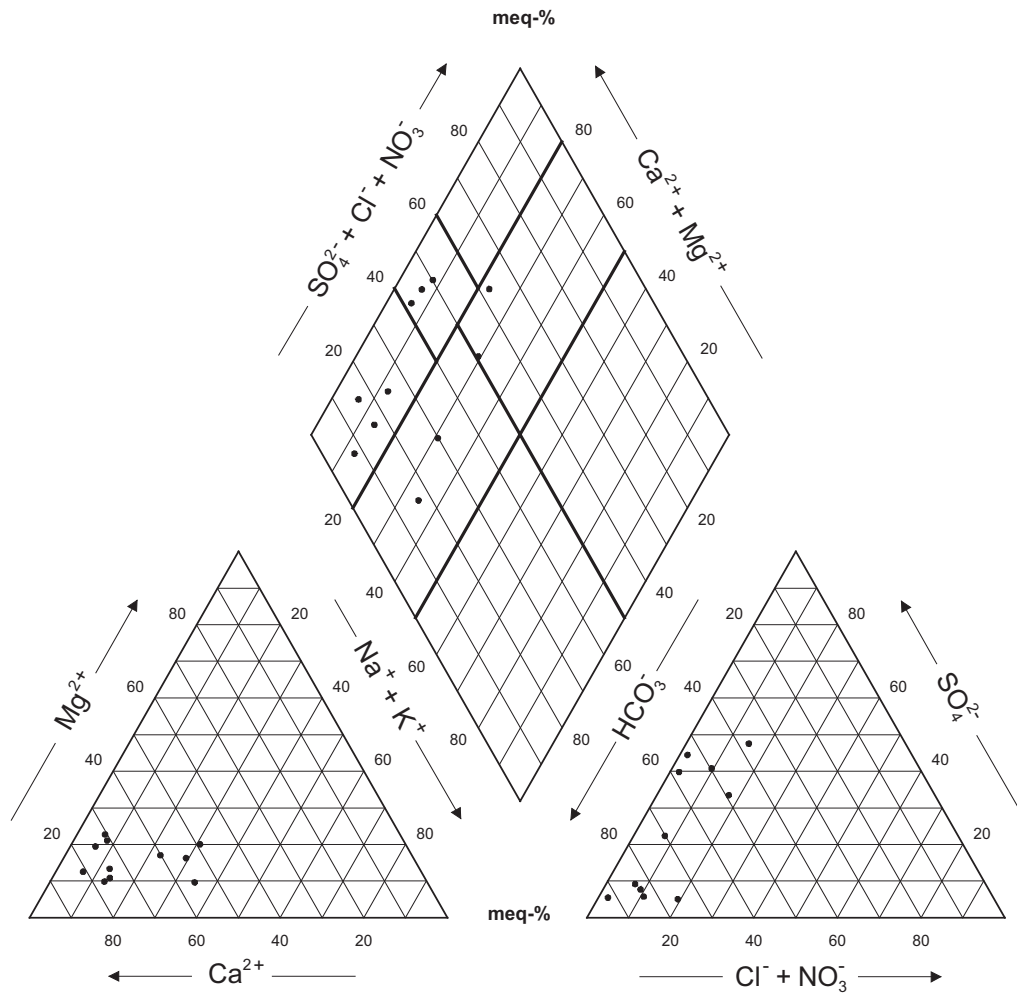


Abb. 3.2.8-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus der Trias der Bodenwöhrer Bucht im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (11 Probenahmestellen)

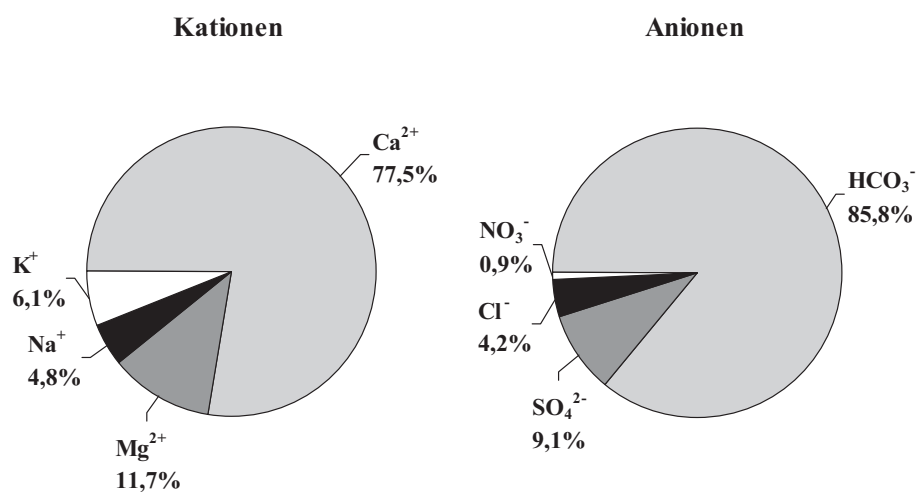


Abb. 3.2.8-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus der Trias der Bodenwöhrer Bucht

3.2.9 Lias

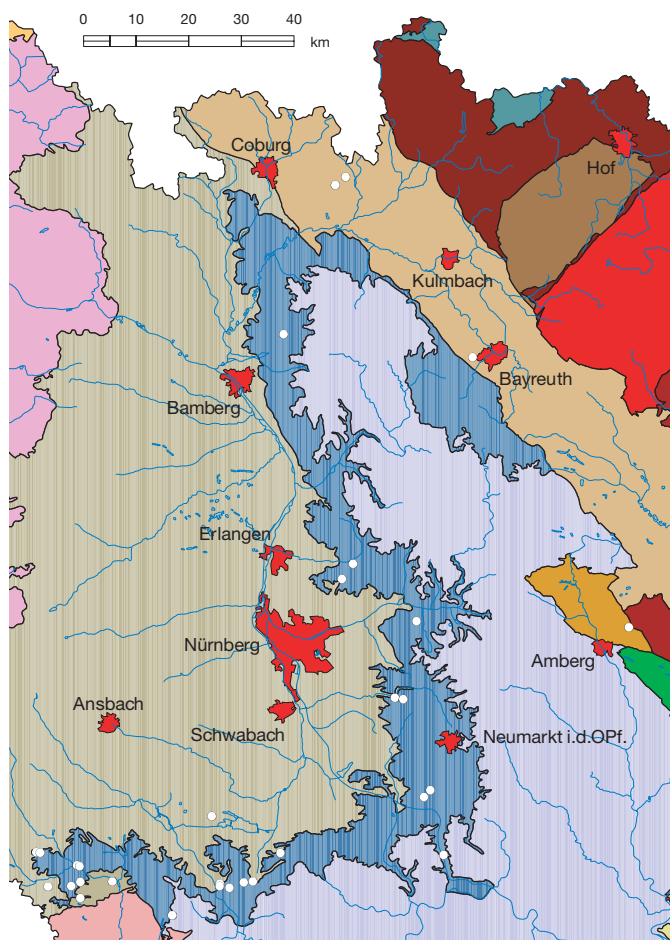


Abb. 3.2.9-1: Lage der 31 Probenahmepunkte aus dem Lias

sind die vorliegenden Daten daher nicht als repräsentativ anzusehen.

Bei den Hauptelementen überwiegt Calcium deutlich vor Magnesium; nur vereinzelt werden etwas höhere Alkaliegehalte gemessen, wobei hier Kalium überwiegt (Abb. 3.2.9-2 und Abb. 3.2.9-3). Hinsichtlich der Anionen sind die Wässer überwiegend hydrogenkarbonatisch mit einer Tendenz zu höheren Sulfat- Chlorid- und Nitratgehalten. Die Wässer fallen nach FURTAK & LANGGUTH (1967) in die Bereiche der „normal erdalkalischen Wässer mit teilweise höherem Alkaliegehalt, überwiegend hydrogenkarbonatisch bzw. hydrogenkarbonatisch-sulfatisch“. Die untersuchten Wässer stammen überwiegend aus Quellen bzw. meist flachen Brunnen und sind daher Oberflächeneinflüssen stärker ausgesetzt. Die höheren Nitratwerte der Liaswässer weisen auf einen anthropogenen Einfluss in den schlecht geschützten Bereichen hin.

Die Gesamtmineralisation der Wässer aus dem Lias beträgt für 80% der Werte zwischen etwa 340 und 740 mg/l (Median: 560 mg/l) und liegt damit leicht über dem Durchschnitt aller Wässer. Mit einer Bandbreite der Gesamthärten zwischen 13,1 und 24,6°dH sind die Wässer „ziemlich hart“ bis „hart“ (Härtebereich 3 bis 4 nach Waschmittelgesetz). Der pH-Wert von 6,8 bis 7,6

Die untersuchten Wässer der Lias-Einheiten stammen insbesondere aus dem Albvorland und dem Bruchschollenland. Der Lias weist hier Mächtigkeiten im Bereich von einigen Zehner Metern auf. Die vorwiegend Ton-, Mergel- und Sandsteine sowie untergeordnet Karbonate des Lias sind mäßig bis gering durchlässig und enthalten lediglich gering mächtige und daher wenig ergiebige Festgesteins-Kluft-Grundwasserleiter. Sie sind deshalb wasserwirtschaftlich nur von lokaler Bedeutung.

Ein guter Schutz des Grundwassers liegt für die Bereiche mit Opalinuston im Ausstrich vor. Für die restlichen Gebiete findet sich bereichsweise eine Grundwasser schützende Lössüberdeckung, ansonsten ist von einer geringen Geschütztheit der Grundwässer auszugehen.

Aus dem Lias liegen Analysenergebnisse von insgesamt 31 Probenahmestellen mit lediglich drei Vollanalysen vor (Abb. 3.2.9-1). Für die Spurenstoffe

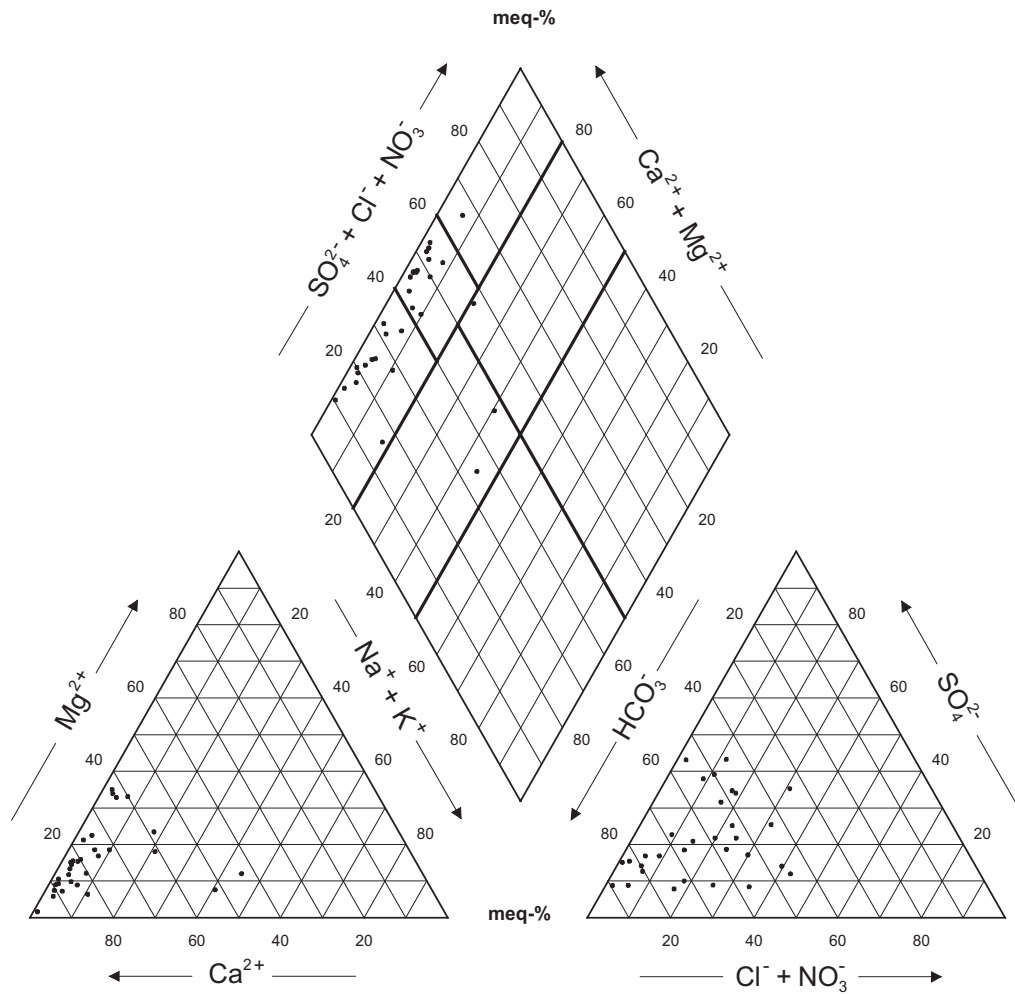


Abb. 3.2.9-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Lias im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (31 Probenahmestellen)

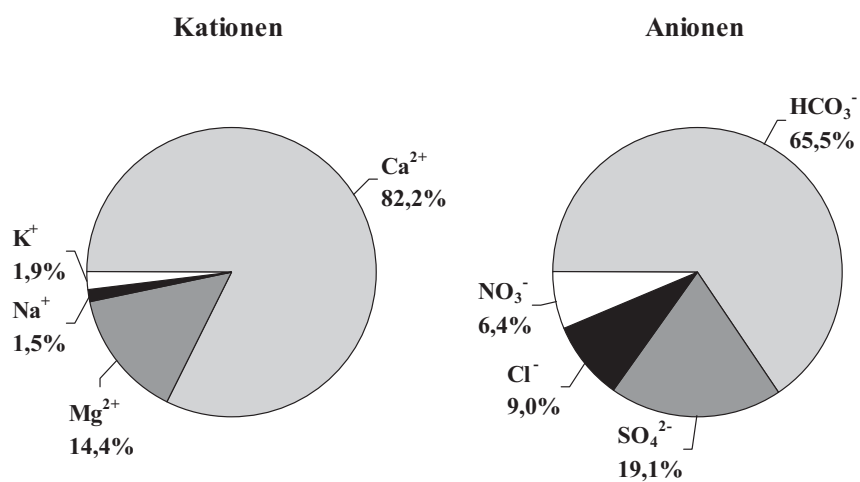


Abb. 3.2.9-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Lias

reicht vom leicht sauren bis in den leicht alkalischen Bereich und weist zusammen mit dem Wertebereich des Sättigungsindex von -1,9 bis -0,1 auf eine häufig vorliegende jedoch nicht durchgehende Karbonatpufferung hin. Dies ist auf den vorwiegend silikatischen Gesteinschemismus des Lias mit unterschiedlich starken Kalkeinschaltungen zurückzuführen.

Die betrachteten Wässer weisen aufgrund ihrer oberflächennahen Herkunft überwiegend hohe Sauerstoffgehalte auf (Median des Sauerstoffgehalts: 7,5 mg/l); die Liaswässer enthalten dennoch Eisen in leicht überdurchschnittlichen Konzentrationen (Median 0,06 mg/l).

Auf eine Beschreibung der Verteilung der weiteren Spurenstoffe wird hier wegen der geringen Probenzahl verzichtet; einige Werte, die keine Auffälligkeiten enthalten, liefert der Anhang 1-15.

3.2.10 Dogger

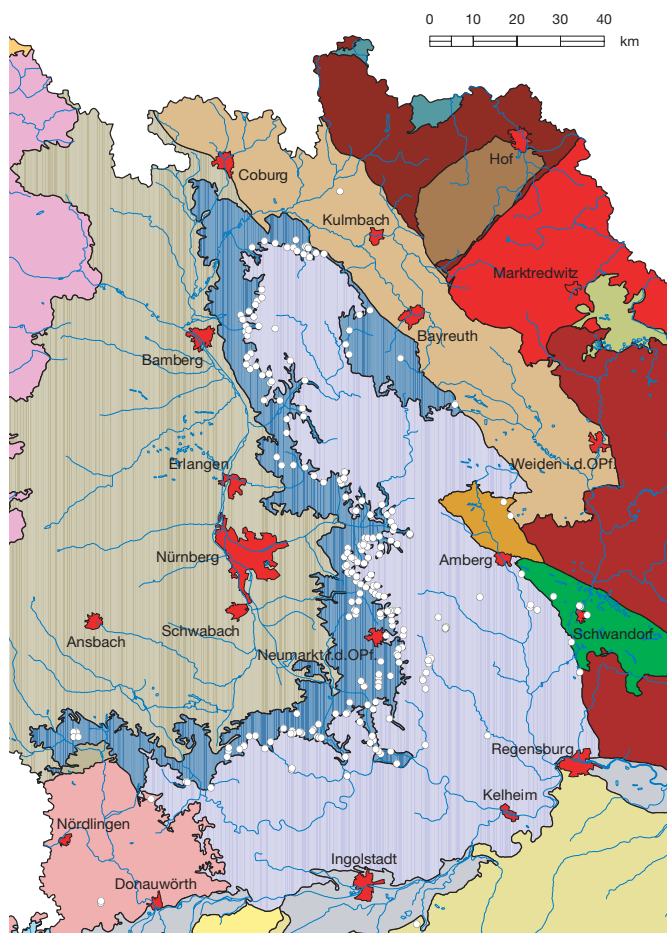


Abb. 3.2.10-1: Lage der 253 Probenahmepunkte aus dem Dogger

Der Ausstrich der Dogger-Einheiten des Schichtstufenlands zieht in einem relativ schmalen Streifen im N, W und E um die Fränkische Alb und grenzt im W an das Keuper-Bergland sowie im E an das Bruchschollenland. Der Grundwasser stauende Opalinuston des Dogger Alpha bildet die Grundwassersohle des Hauptgrundwasserstockwerks im Dogger. Grundwasserleiter ist besonders der bis 100 m mächtige Eisensandstein des Dogger Beta, ein bereichsweise mit Tonsteinlagen, eisenhaltigen Flözen und Kalksandsteinbänken durchzogener, mürber Sandstein, der als Kluft-Poren-Grundwasserleiter mit mäßiger bis geringer Durchlässigkeit anzusprechen ist. Weiterhin zählen zu dem Grundwasserstockwerk die geringmächtigen Kalksandsteinbänke, Kalksteine und Mergelsteine des mittleren Doggers. Das Hauptgrundwasserstockwerk im Dogger weist eine mäßige bis geringe Durchlässigkeit auf und ist wasserwirtschaftlich von lokaler bis regionaler Bedeutung (häufig Quelfassungen). Der auflagernde Ornamenton als jüngste Dogger-Schicht fungiert

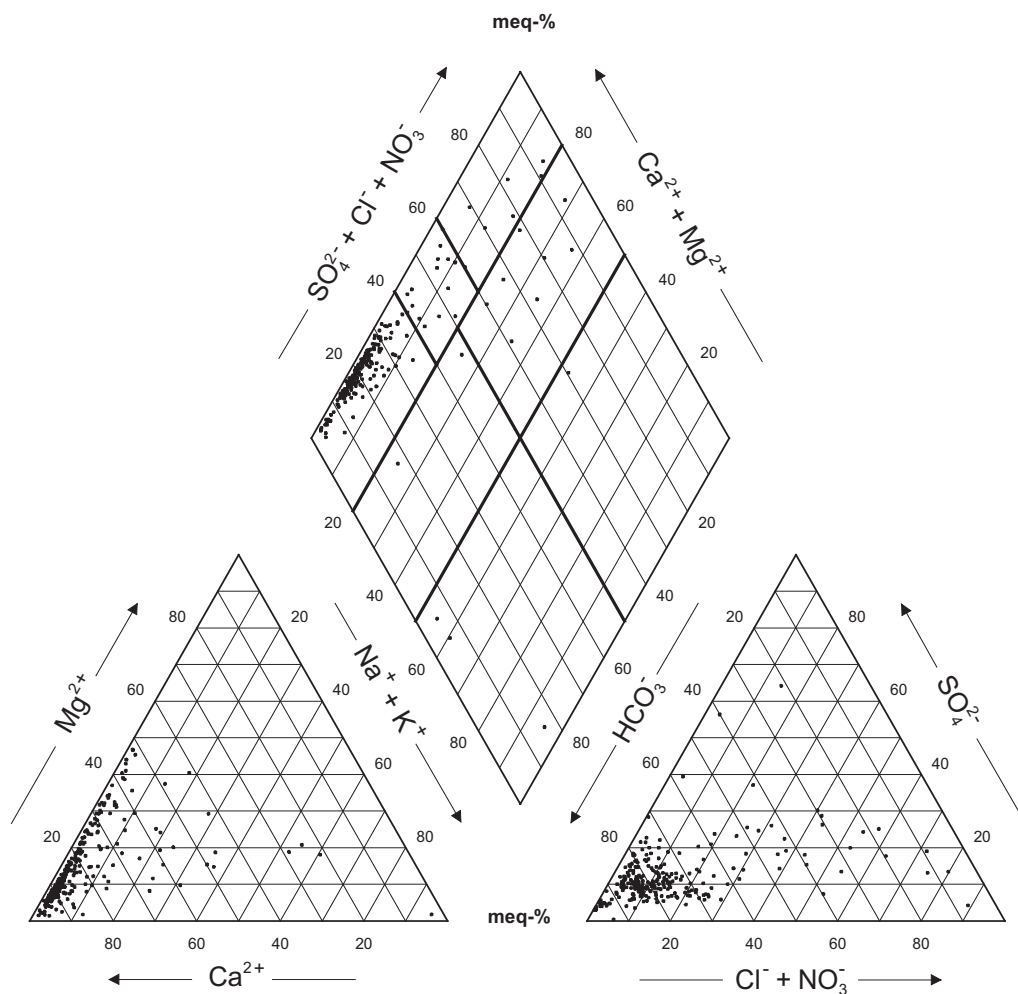


Abb. 3.2.10-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Dogger im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (249 Probenahmestellen)

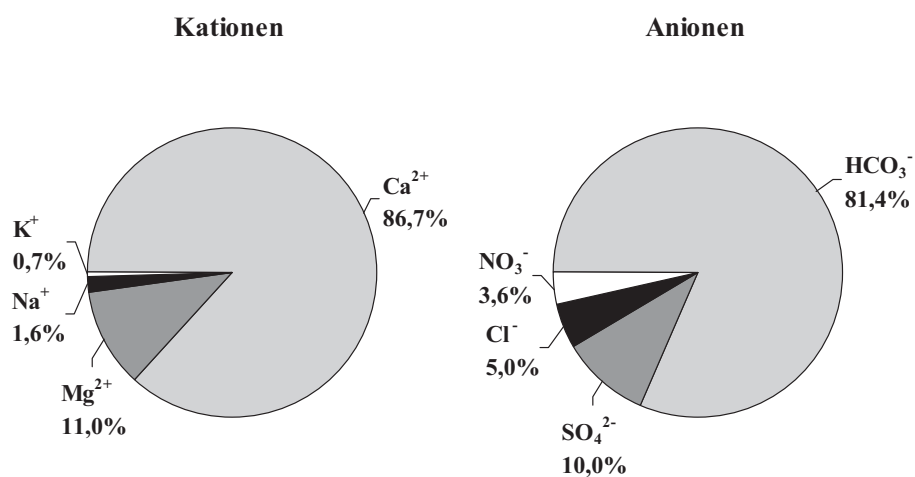


Abb. 3.2.10-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Dogger

wiederum als Grundwassergeringleiter und damit als Deckschicht des Dogger-Grundwasserstockwerks und bildet gleichzeitig die Sohle des Malmkarst-Grundwasserstockwerks der nach S und E anschließenden Fränkischen Alb. Die Grundwasser leitenden Dogger-Schichten setzen sich unter dem Malm nach E und S als Tiefengrundwasserstockwerk fort und sind dort noch von regionaler Bedeutung.

Ein guter Schutz des Grundwassers liegt für die Bereiche mit Ornamenton im Ausstrich sowie im Tiefengrundwasserstockwerk vor. Für die restlichen Gebiete findet sich bereichsweise eine Grundwasser schützende Lössüberdeckung (besonders N Bamberg und S Neumarkt), ansonsten ist von einer geringen Geschütztheit der Grundwässer auszugehen.

Von Grundwässern aus dem Dogger liegen Analysenergebnisse aus 253 Probenahmestellen mit insgesamt 73 Vollanalysen vor (Abb. 3.2.10-1).

Die Hauptbestandteile der Wässer aus den feinkörnigen Sandsteinen, Kalksandsteinen und zwischengeschalteten schluffigen Tonsteinen sind Calcium und Magnesium sowie Hydrogenkarbonat (Abb. 3.2.10-3). Die Mehrzahl der Wässer fallen nach FURTAK & LANGGUTH (1967) in das Feld der „normal erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen Wässer“ (Abb. 3.2.10-2). Erhöhte Werte an Nitrat, Sulfat und Chlorid werden überwiegend in den Bereichen ohne schützende Deckschichten beobachtet und dürften damit auf anthropogenen Stoffeintrag zurückzuführen sein. Diese Wässer sind dann als „erdalkalische Wässer mit teils höherem Alkaliegehalt, überwiegend chloridisch/nitratisch“ zu bezeichnen. Bei drei Grundwässern im Feld der „alkalischen Wässer, überwiegend hydrogenkarbonatisch“ handelt es sich um Natriumhydrogenkarbonatwässer aus Tiefbrunnen, die nach MATTHESS (1994) als Austauschwässer anzusehen sind.

Die Gesamtmineralisation liegt für 80% der Werte zwischen 249 und 557 mg/l im mittleren Bereich aller Wässer; die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten betragen um 46 mS/m. Die Wässer sind mit einer Gesamthärte zwischen 8,1 und 19,4°dH „mittelhart“ bis „ziemlich hart“ (Härtebereich 2 bis 3 nach Waschmittelgesetz); die mittlere Karbonathärte ist mit 12,8°dH etwas niedriger. Der pH-Wert im neutralen bis schwach alkalischen Bereich zwischen 6,9 und 7,8 (Median: 7,4) zeigt ebenso wie der Sättigungsindex für Calciumkarbonat (Median: -0,4) eine überwiegende Karbonatpufferung der Doggerwässer an. Die Sauerstoffgehalte der Doggerwässer bewegen sich im mittleren Bereich aller Wässer (Median: 75% Sauerstoffsättigung). Die Eisen-gehalte liegen mit einem Median von 0,04 mg/l etwas über dem Durchschnitt aller Wässer, Mangan ist dagegen meist nicht nachweisbar.

Bei den Spurenstoffen dominiert Strontium mit einem Medianwert von über 10 µg/l. Weitere Spurenstoffe mit Medianwerten über 1 µg/l sind in der Reihenfolge abnehmender Konzentration Bor, Barium, Lithium, Zink, Rubidium und Aluminium.

3.2.11 Malm

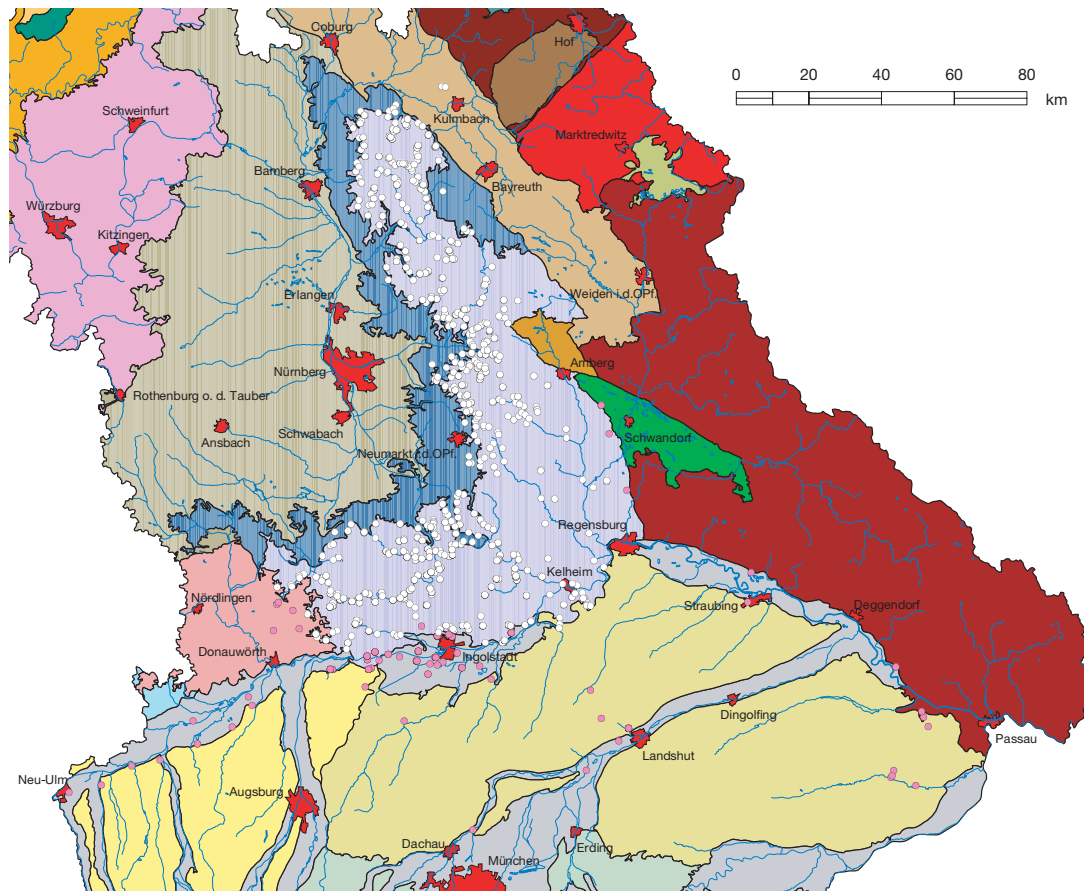


Abb. 3.2.11-1: Lage der Probenahmepunkte aus dem unbedeckten bis teilbedeckten Malm (weiß, 657 Probenahmestellen) und dem vollständig überdeckten Malm (violett, 71 Probenahmestellen)

Der Malm baut die Fränkische und Schwäbische Alb auf. Die geschichtet bis massiv ausgebildeten Kalksteine und Dolomitsteine des Malms stellen einen großräumigen Kluft-Karst-Grundwasserleiter mit aufgrund unterschiedlicher Verkarstung örtlich stark wechselnder, meist mittlerer bis mäßiger Durchlässigkeit dar. Südlich der Donau taucht die Malmtafel unter die miozänen Molasseeinheiten ab. Der Malm gliedert sich in den Seichten Karst, eine Übergangszone und den Tiefen Karst. Die Mächtigkeiten des Malm-Grundwasserleiters nehmen von einigen Zehner Metern in der nördlichen Abtragungszone auf bis zu ca. 500 m im Bereich der vollständig erhaltenen Schichtfolge südlich der Donau zu. Das Grundwasser im Tiefen Karst ist aufgrund der sehr hohen Ergiebigkeiten von regionaler bis überregionaler wasserwirtschaftlicher Bedeutung.

Für die hydrogeochemische Charakterisierung der Grundwässer aus dem Malmkarst wird zwischen den Wässern aus dem unbedeckten bis teilbedeckten Malm nördlich der Donau und dem vollständig überdeckten Malm südlich der Donau sowie im Bereich der Überdeckung Ries-Trümmernmassen und mächtigerer Kreide unterschieden.

Der Malmkarst verfügt nördlich der Donau nur bereichsweise über Deckschichten, die einen lokal erhöhten Schutz des Grundwassers vor Schadstoffeinträgen bewirken. In den unbedeckten Bereichen ist das Grundwasser nur gering geschützt, da die Malm-Einheiten selbst praktisch kein Rückhaltevermögen bei gleichzeitig örtlich hoher Durchlässigkeit aufweisen. Im vollständig überdeckten Malm südlich der Donau werden hohe Grundwasseralter von über 10.000 Jahren festgestellt (BÜTTNER et al. 2002), so dass hier überwiegend rein geogen geprägte Grundwässer vorliegen.

Für die Wässer aus dem unbedeckten bis teilbedeckten Malm liegen Analysen von 657 Probenahmepunkten mit 271 Vollanalysen, für den vollständig überdeckten Malm 71 Probenahmepunkte mit 64 Vollanalysen vor (Abb. 3.2.11-1). Als Hauptbestandteile überwiegen in den Wässern des Malms Calcium, Magnesium und Hydrogenkarbonat deutlich (Abb. 3.2.11-3 und 3.2.11-5). Nach der Klassifizierung von FURTAK & LANGGUTH (1967) sind die Wässer daher meist als „normal erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer“ zu bezeichnen (Abb. 3.2.11-2 und 3.2.11-4).

Im unbedeckten bis teilbedeckten Malm zeigen die Wässer eine Tendenz zu höheren Konzentrationen an Chlorid und Nitrat (Abb. 3.2.11-2). Die Hauptursache dürfte der Eintrag anthropogen beeinflusster Wässer sein, die über gut durchlässige Klüfte und Karstgerinne schnell in das Grundwasser eingetragen werden können.

Die Anionenzusammensetzung im vollständig überdeckten, gut geschützten Malm wird meist von Hydrogenkarbonat mit einem Medianwert >92 meq-% dominiert (Abb. 3.2.11-5). Nitrat ist hier nur vereinzelt in geringen Konzentrationen nachweisbar, Chlorid in deutlich geringeren Konzentrationen als weiter nördlich. Einige Wässer im überdeckten Malm weisen überwiegender Gehalte an Natrium sowie deutlich erhöhte Werte für Chlorid und Sulfat auf. Hier handelt es sich um hoch mineralisierte Tiefenwässer an der Basis des Malms (z.B. aus den Tiefbohrungen Birnbach und Haimhausen), die abgesehen von einer Ausnahme in das Feld der „alkalischen Wässer, überwiegend hydrogenkarbonatisch“ fallen.

Die Gesamtmineralisation der Grundwässer des Malms bewegt sich im Vergleich aller Grundwässer im mittleren Wertebereich und weist insgesamt relativ geringe Schwankungen auf. Sie beträgt bei beiden Gruppen für 80% der Werte etwa zwischen 410 und 720 mg/l; der etwas höhere Medianwert der Wässer aus dem vollständig überdeckten Malm (547 mg/l) zeigt dort eine geringfügig höhere Mineralisation als bei den Wässern des unbedeckten bis teilbedeckten Malms (Medianwert 520 mg/l) an. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit weist bei Spannweiten zwischen 18 und 93 mS/m ebenfalls nur geringe Unterschiede auf. Der pH-Wert der hydrogenkarbonatisch dominierten Grundwässer liegt mit Werten um pH 7,4 (80% der Wässer zwischen 7,1 und 7,7) erwartungsgemäß im neutralen bis schwach alkalischen Bereich.

Die Wässer sind bei einer Gesamthärte im unbedeckten bis teilbedeckten Malm von 15,3-21,0°dH für 80% der Werte „ziemlich hart“ bis „hart“ (Härtebereich 3 bis 4 nach Waschmittelgesetz); im überdeckten Malm sind die Wässer weicher (6,7 bis 21,5°dH) und damit als „weich“ bis „hart“ (Härtebereich 2 bis 3 nach Waschmittelgesetz) anzusprechen. Die Karbonathärte ist in den unbedeckten bis teilbedeckten Karstbereichen mit Werten um 15 (12,7 bis 17,0)°dH etwas geringer als im überdeckten Malm mit 17 (13,3 bis 19,9)°dH. Die Sauerstoffsättigung des unbedeck-

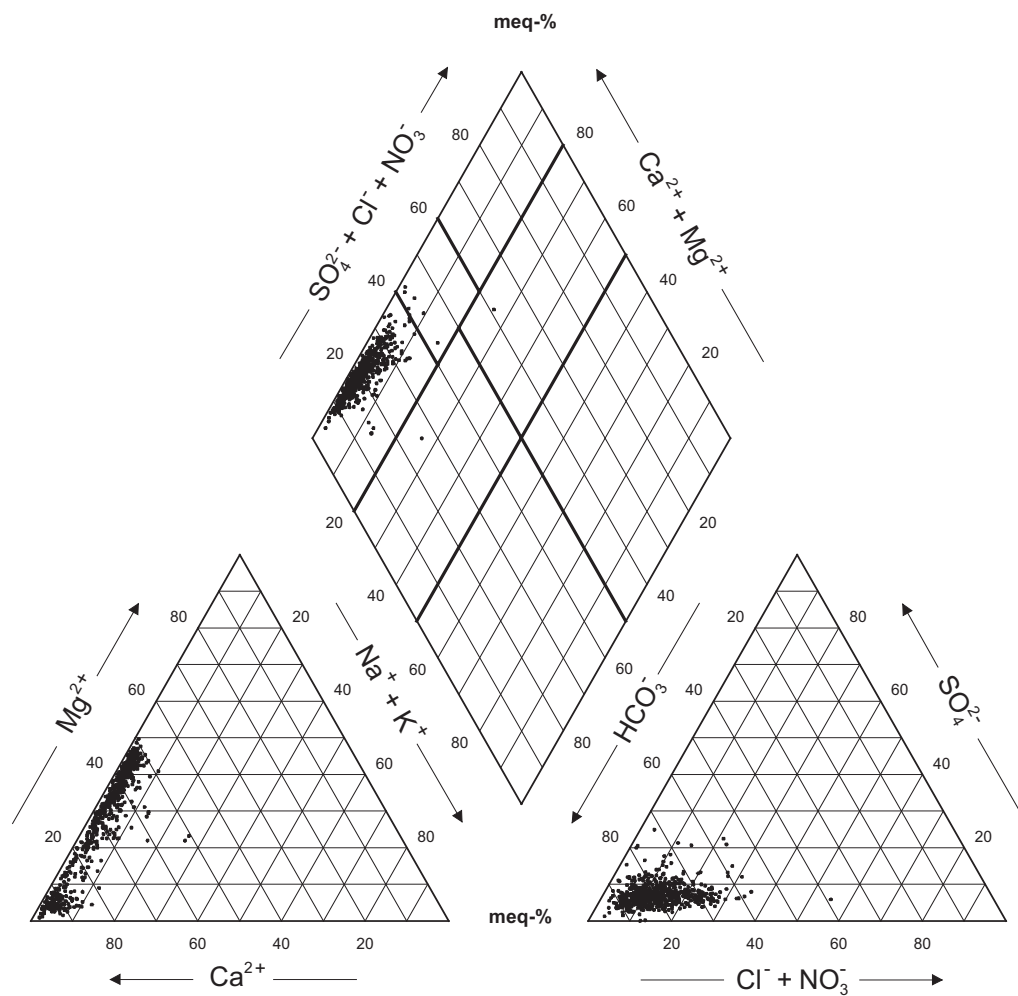


Abb. 3.2.11-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem unbedeckten bis teilbedeckten Malm im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (657 Probenahmestellen)

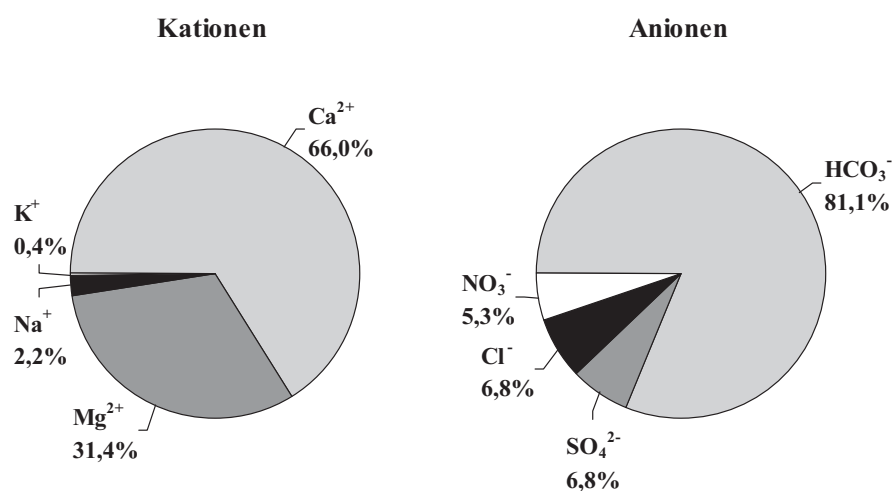


Abb. 3.2.11-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem unbedeckten bis teilbedeckten Malm

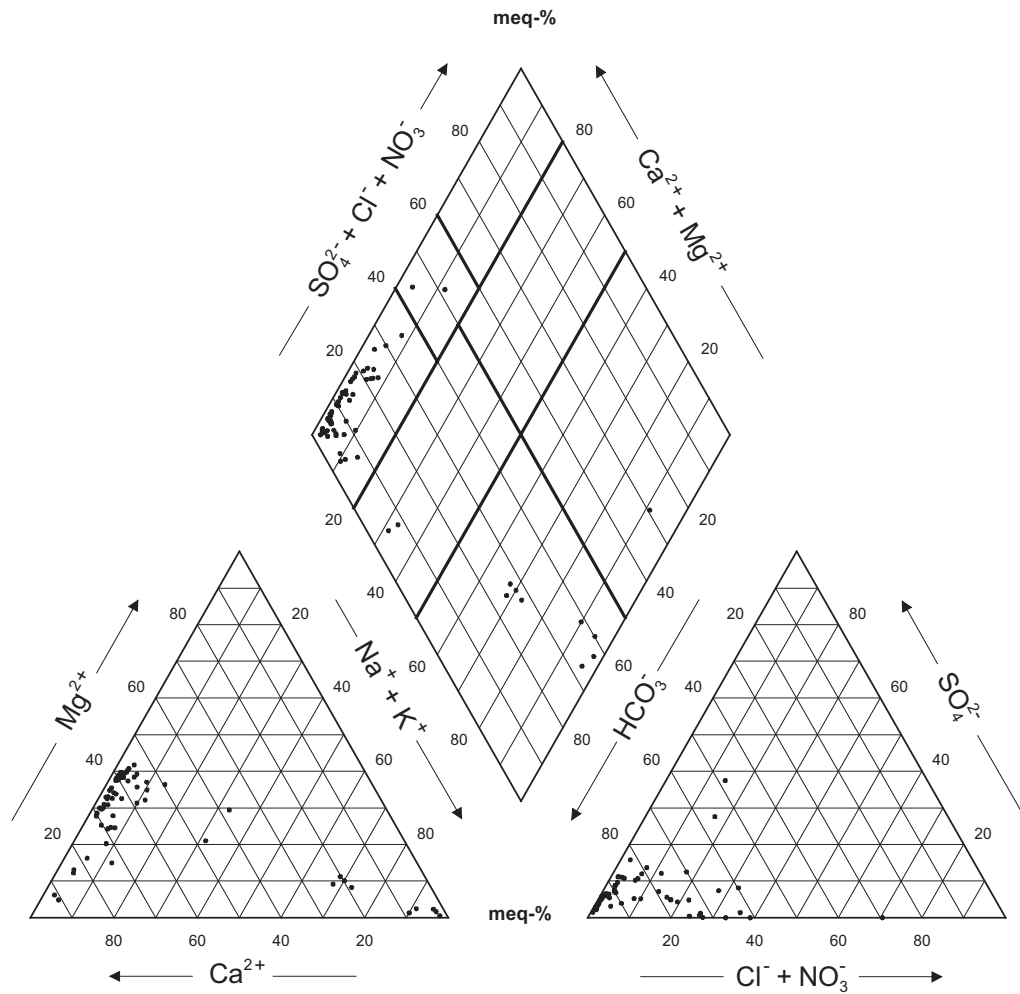


Abb. 3.2.11-4: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus vollständig überdeckten Malm im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (70 Probenahmestellen)

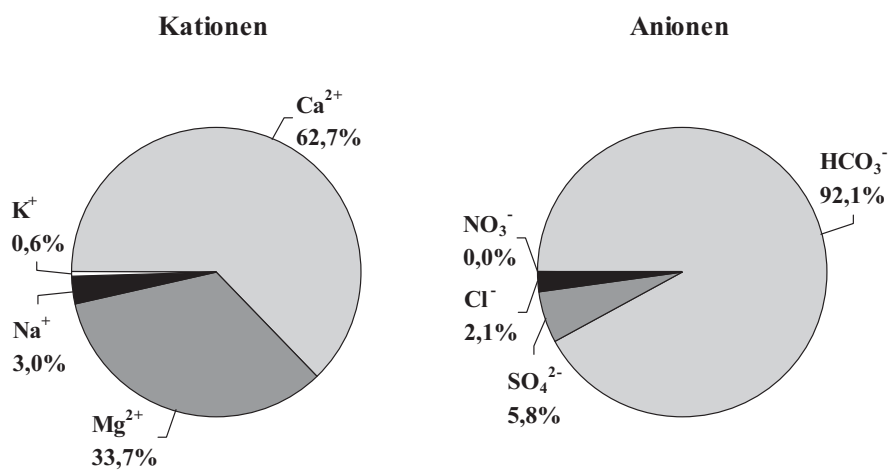


Abb. 3.2.11-5: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem vollständig überdeckten Malm

ten bis teilbedeckten Malms liegt mit im Mittel 75% deutlich höher als im überdeckten Malm (16%). Dies ist auf Sauerstoff zehrende Vorgänge in den wesentlich älteren Wässern des überdeckten Malms zurückzuführen. Die Konzentrationen von Eisen und Mangan sind als redoxabhängige Parameter demzufolge im überdeckten Malm erhöht und überschreiten dort häufig die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung.

Die Siliciumkonzentration im Grundwasser des bedeckten Malms ist mit einem Median von 4,9 (3,8 bis 9,9) mg/l deutlich höher als im unbedeckten bis teilbedeckten Malm mit 2,4 (1,9 bis 4,1) mg/l. Dies kann an der längeren Verweilzeit des Grundwassers und dem damit verbundenen intensiveren Kontakt mit den teilweise verkieselten Profilbereichen der Massenkalk (z.B. Hornsteinlagen) und den Nichtkarbonaten im Malm liegen. Eine andere Möglichkeit ist der flächenhafte Zutritt siliciumreicherer Grundwässer aus der tieferen Molasse bzw. der Kreide in das Malm-Grundwasserstockwerk.

In den Wässern des unbedeckten bis teilbedeckten Malms werden in der Reihenfolge abnehmender Konzentration Strontium und Barium mit Medianwerten über 10 µg/l und Bor, Zink, Lithium und Aluminium mit Medianwerten zwischen 1 und 10 µg/l angetroffen. Im vollständig überdeckten Malm werden die Erdalkalien Strontium und Barium mit Mediangehalten über 10 µg/l sowie die Elemente Bor, Lithium, Zink, Rubidium und Aluminium mit Medianen zwischen 1 und 10 µg/l angetroffen, wobei die Konzentrationen dieser Spurenelemente insgesamt höher sind als im unbedeckten bis teilbedeckten Malm. Dies kann, ebenso wie bei Silicium, durch die lange Kontaktzeit des hier älteren Grundwassers mit dem Gestein unter reduzierenden Bedingungen oder durch den Zutritt von Grundwasser mit höheren Gehalten dieser Elemente aus dem Tertiär bzw. der Kreide begründet sein. Letztere Annahme wird durch eine statistisch belegte Ähnlichkeit der Wässer aus überdecktem Malm und tiefer Molasse gestützt (vgl. Kap. 5). Hinsichtlich der weiteren Spurenelemente werden bei Cer, Cäsium, Molybdän und Thorium im überdeckten Malm deutlich höhere Konzentrationen nachgewiesen als im unbedeckten bis teilbedeckten Malm; umgekehrt verhält es sich für die Elemente Arsen, Cadmium, Chrom, Thallium, Uran und Vanadium. Weitere räumliche Differenzierungen der Spurenelementgehalte in nördlicher und südlicher Frankenalb werden im Kap. 5 behandelt.

3.2.12 Kreide

Einheiten der Kreide mit bedeutenderen Grundwasservorkommen treten insbesondere im Bruchschollenland (Parksteiner Mulde), der Bodenwöhrer Bucht und in der Frankenalb (Vilsecker Mulde und Raum Regensburg) auf. Bei geringeren Mächtigkeiten sind die Kreidesedimente häufig grundwasserfrei. Es handelt sich meist um Kluft-Poren-Grundwasserleiter (häufig mürbe Sandsteine, Kalksandsteine und Sande) mit mäßiger bis geringer Durchlässigkeit, die bei größerer Mächtigkeit von lokaler bis regionaler (z.B. Vilsecker Mulde) Bedeutung sind.

Deckschichten sind nur teilweise in Form toniger Sande oder als Lehme vorhanden, so dass in der Regel eine hohe Verschmutzungsempfindlichkeit des jeweils obersten Grundwasserleiters gegeben ist. Bei mächtigerer Ausbildung der Kreide sind die tieferen Stockwerke aufgrund der auflagernden häufig gering durchlässigen Gesteinseinheiten gut geschützt.

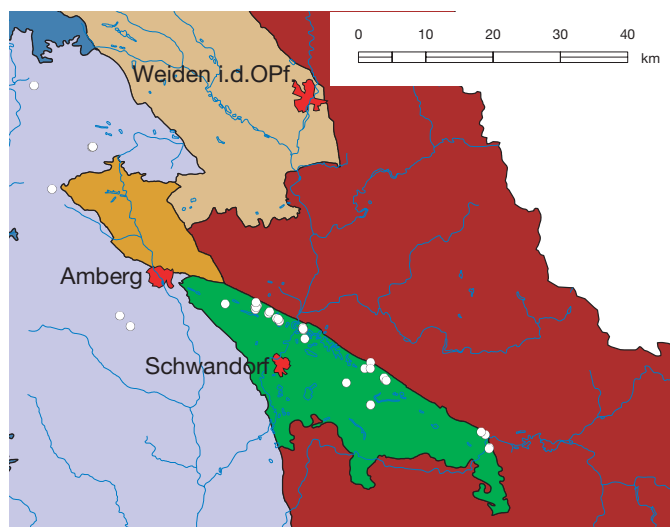


Abb. 3.2.12-1: Lage der 35 Probenahmepunkte aus der Kreide

Von den Grundwässern aus der Kreide liegen vorwiegend Analysen aus der Bodenwöhrer Bucht vor. Das Sedimentationsgeschehen in der Bodenwöhrer Senke unterscheidet sich grundlegend von den Ablagerungen im Regensburger Raum (MEYER & MIELKE 1993). Insofern dürften die hier angegebenen Spannweiten der Parameter nicht repräsentativ für die gesamte Kreide sein. Insgesamt liegen Analysenergebnisse von 35 Probenahmestellen mit 19 Vollanalysen vor (Abb. 3.2.12-1).

Die Hauptbestandteile der untersuchten Wässer aus der Kreide sind Calcium und Magnesium, wobei auch Wässer mit höheren Alkaliegehalten auftreten.

Hinsichtlich der Anionen besteht eine hohe Variabilität der Zusammensetzung, wobei die hydrogenkarbonatischen Wässer überwiegen; darauf folgen Sulfat und Chlorid (Abb. 3.2.12-2 und 3.2.12-3). Die Wässer fallen somit nach FURTAKE & LANGGUTH (1967) in verschiedene Felder, die sich um die „normal erdalkalischen, hydrogenkarbonatisch-sulfatischen Wässer“ gruppieren (Abb. 3.2.12-2).

Die Gesamtmineralisation ist mit einer Spannweite von 80% der Werte zwischen 54 und 286 mg/l (Median: 122 mg/l) relativ gering; die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten betragen im Median lediglich 16 mS/m. Die Gesamthärte liegt für 80% aller Werte zwischen 1,3 und 9,9°dH („sehr weich“ bis „mittelhart“, Härtebereich 1 bis 2 nach Waschmittelgesetz).

Die Wässer sind überwiegend sauer (80% der Wässer zwischen pH 5,7 und 7,3; Median: 6,2), wobei festzustellen ist, dass die sauren Wässer ausschließlich in der Bodenwöhrer Bucht angetroffen werden, während die wenigen Wässer außerhalb (Vilsecker Mulde und SW Amberg) im neutralen Bereich liegen. Dies weist darauf hin, dass die Gesteine der Kreide in der Bodenwöhrer Bucht zumindest in den hier betrachteten Bereichen einen rein silikatischen Gesteinschemismus aufweisen, während z.B. die Kreide im Regensburger Raum hohe Karbonatanteile aufweist. Unterstrichen wird dies durch den niedrigen Sättigungsindex für Calciumkarbonat (80% der Werte zwischen -4,5 und -1,4), der eine starke Calciumkarbonat-Untersättigung der Wässer anzeigt. Solche Werte werden im Allgemeinen nur in Wässern aus weitestgehend kalkfreien Grundwasserleitern erhalten (z.B. Kristallin).

Die Sauerstoffgehalte der häufig aus größeren Tiefen stammenden Kreidewässer zeigen eine Sauerstoffuntersättigung an (Median: 3,3 mg/l); sowohl Eisen als auch Mangan werden dementsprechend in relativ hohen Konzentrationen gemessen. Über die Hälfte aller Wässer überschreiten den Grenzwert der Trinkwasserverordnung (TrinkWV) für Eisen von 0,2 mg/l.

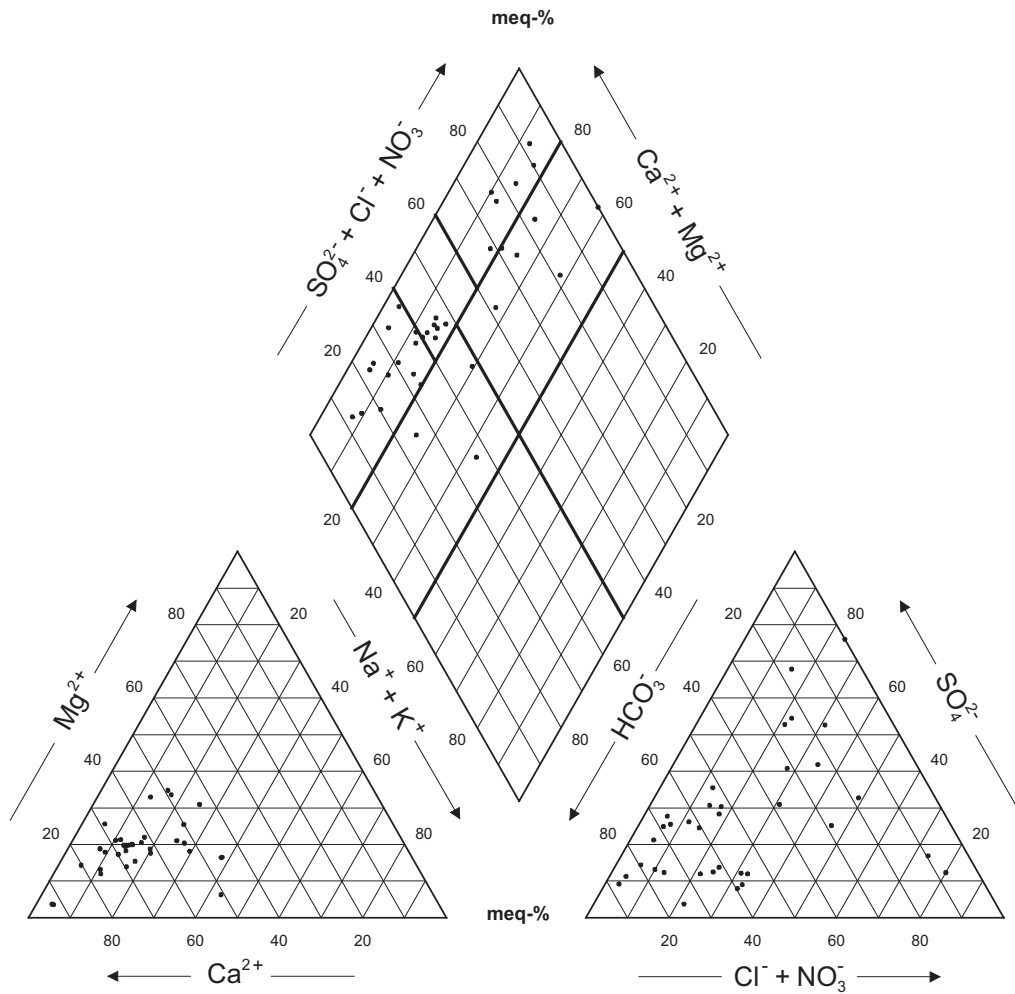


Abb. 3.2.12-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus der Kreide im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (35 Probenahmestellen)

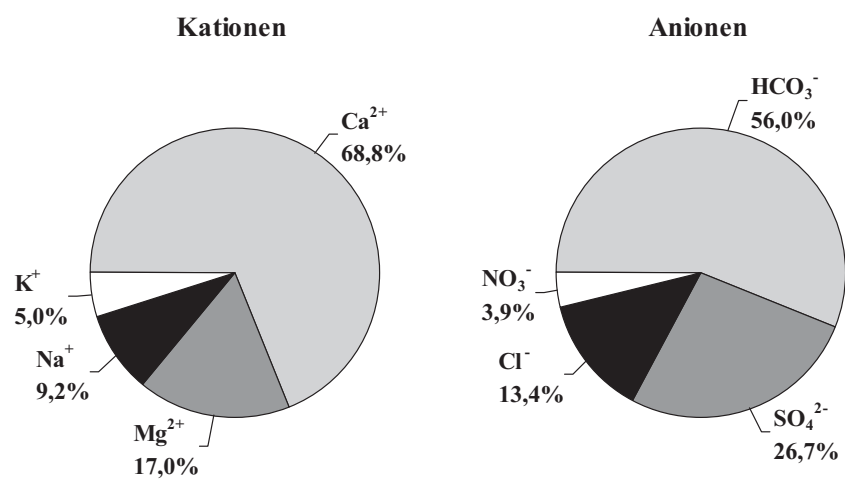


Abb. 3.2.12-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus der Kreide

Hinsichtlich der weiteren Spurenstoffe dominieren Barium, Strontium, Zink und Lithium mit Gehalten im Median über 10 µg/l sowie Rubidium, Bor und Nickel mit mittleren Werten über 1 µg/l. Die Wässer der Kreide in der Bodenwöhrer Bucht weisen für Rubidium, Nickel und Cobalt mit die höchsten Werte aller untersuchten Grundwasserleiter auf.

3.2.13 Ries-Trümmermassen

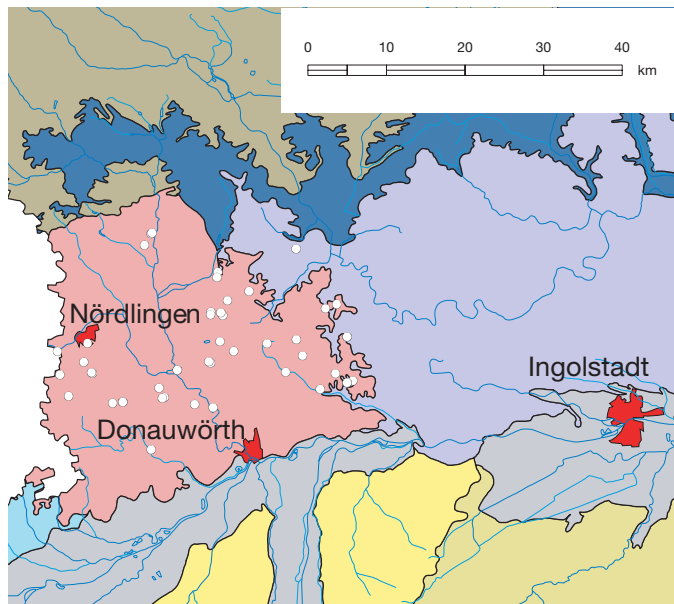


Abb. 3.2.13-1: Lage der 45 Probenahmepunkte aus den Ries-Trümmermassen

Der hydrogeologische Raum Nördlinger Ries umfasst den aufgrund eines Meteoriteneinschlags im Miozän beeinflussten Bereich im W der Fränkischen Alb. Dort treten flächig verbreitet Ries-Trümmermassen (impaktmetamorphes Grund- und Deckgebirge) auf; der Einschlagskrater wurde im Känozoikum mit überwiegend feinkörnigen Seesedimenten (Tone, Mergel in der Beckenfazies und Seekalke sowie Konglomerate in der Randfazies) verfüllt. Vor allem in den Schollen aus Malmkalk treten schwebende Grundwasservorkommen auf, die überwiegend durch Quellen genutzt werden. Die Ries-Seesedimente und die Ries-Trümmermassen sind nur von geringer lokaler wasserwirtschaftlicher Bedeutung.

Die ergiebigsten Brunnen innerhalb des Nördlinger Rieses liegen in dessen Randbereich und erschließen dort das Grundwasser aus dem unterlagernden Malmkarst-Grundwasserstockwerk (s. Kap. 3.2.11).

Die Seesedimente werden großflächig durch Lössablagerungen überdeckt, die zum Schutz der Grundwasservorkommen beitragen; jedoch sind die Flurabstände relativ gering.

Insgesamt liegen aus den Ries-Trümmermassen Analysenergebnisse von 45 Probenahmestellen mit 44 Vollanalysen vor (Abb. 3.2.13-1).

Die Hauptbestandteile der untersuchten Wässer sind Calcium und Magnesium, wobei der Calciumanteil deutlich überwiegt, sowie Hydrogenkarbonat, wobei teilweise erhöhte Nitratgehalte auf einen anthropogenen Einfluss hinweisen (Abb. 3.2.13-3). Die Wässer der Ries-Trümmermassen gehören damit nach FURTAK & LANGGUTH (1967) zum Typ der „normal erdalkalischen, überwiegend hydrogencarbonatischen Wässer“ (Abb. 3.2.13-2).

Die Gesamtmineralisation weist bei einem relativ geringen Schwankungsbereich von 80% der Werte zwischen 493 und 471 mg/l (Median: 557 mg/l) leicht überdurchschnittliche Werte auf;

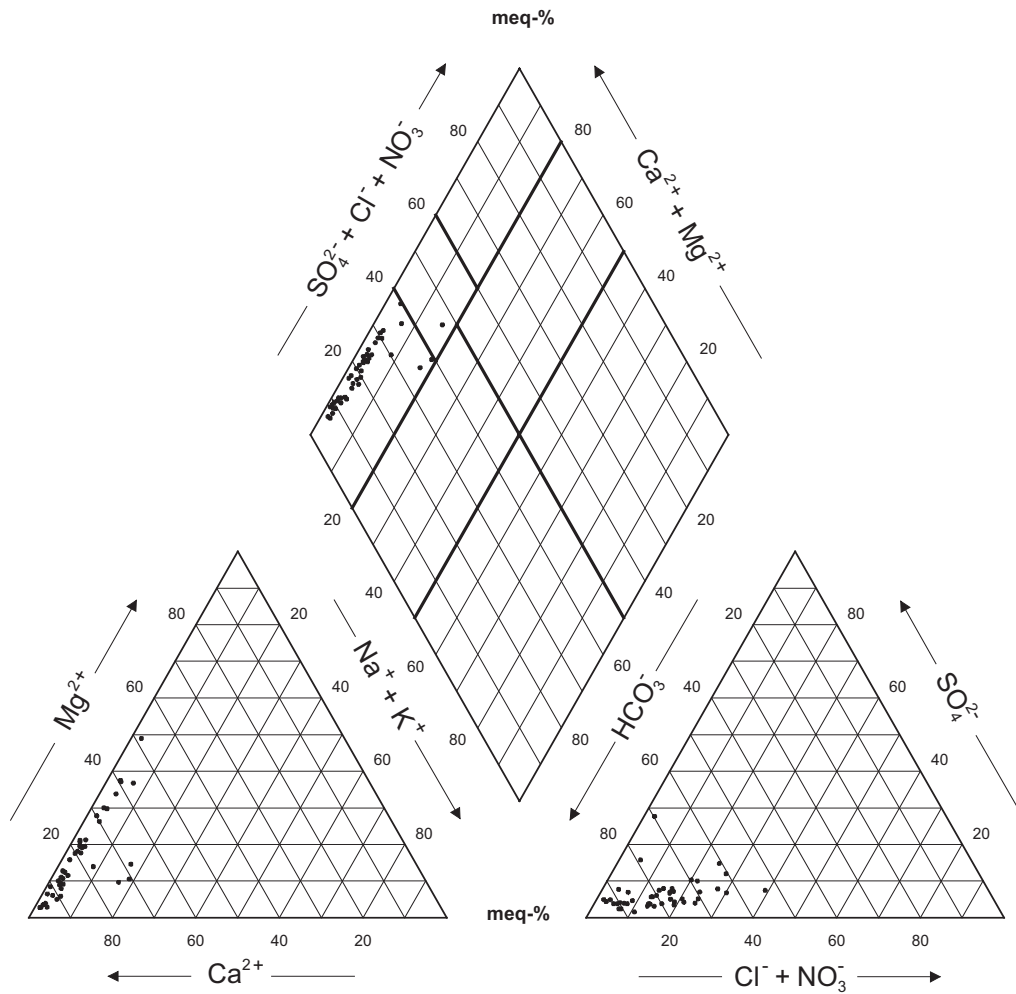


Abb. 3.2.13-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus den Ries-Trümmermassen im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (45 Probenahmestellen)

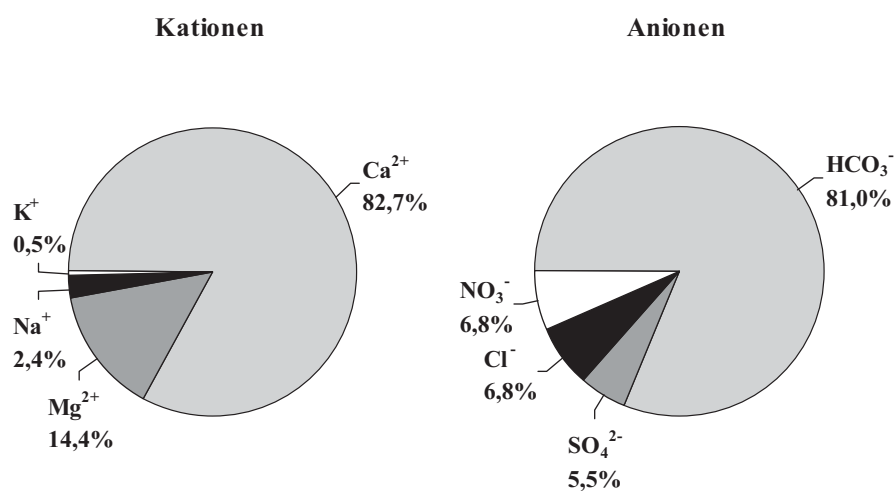


Abb. 3.2.13-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus den Ries-Trümmermassen

der Medianwert der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit beträgt 66 mS/m. Die Gesamthärten liegen für 80% der Wässer zwischen 16,5 und 24,0°dH (überwiegend „hart“, Härtebereich 3 bis 4 nach Waschmittelgesetz). Die pH-Werte sind neutral bis leicht alkalisch (Median: 7,3). Zusammen mit den durchgehend hohen Werten des Calciumkarbonat-Sättigungsindex belegt dies eine karbonatische Pufferung der untersuchten Wässer aus den Ries-Trümmermassen. Die überwiegend aus Quellen und Flachbrunnen stammenden Wässer aus den Ries-Trümmermassen weisen meist hohe Sauerstoffgehalte auf (Median der Sauerstoffsättigung: 70,3%). Sowohl Eisen als auch Mangan werden dementsprechend in geringen Konzentrationen - meist unter der Nachweisgrenze - gemessen.

In den Wässern der Ries-Trümmermassen werden vergleichsweise geringe Spurenstoffgehalte festgestellt. Mit abnehmenden Werten der Mediane werden über 10 µg/l Strontium, Barium und Bor sowie über 1 µg/l Lithium, Zink und Rubidium angetroffen.

Insgesamt weist das hydrogeochemische Inventar der Wässer aus den Ries-Trümmermassen eine hohe Ähnlichkeit mit den Werten aus dem unbedeckten bis teilbedeckten Malm (Kap. 3.2.11) auf, was den dominierenden Einfluss der Malm-Schollen auf die Grundwasserführung im Bereich der Ries-Trümmermassen unterstreicht.

3.3 Braunkohlentertiär

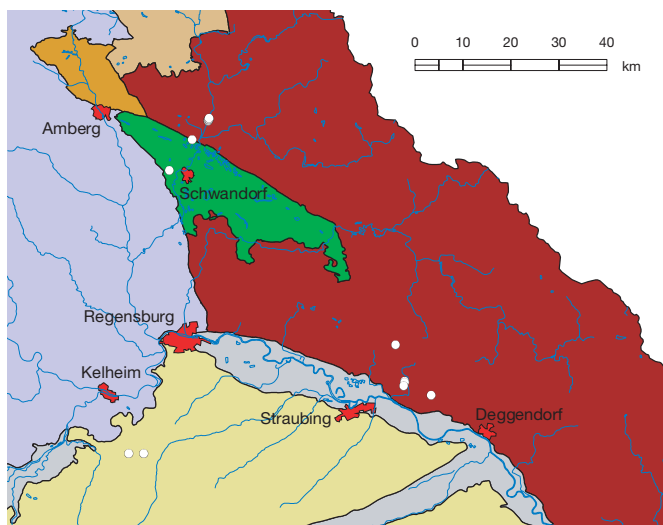


Abb. 3.3-1: Lage der 14 Probenahmepunkte aus dem Braunkohlentertiär

Das Braunkohlentertiär erstreckt sich über das weit verzweigte Rinnensystem der Urnaab entlang der Linie Schwandorf-Regensburg. Die bis mehr als 100 m mächtigen rinnenförmigen Reste dieser tertiären Flusstalfüllungen (kleinräumiger Wechsel von Braunkohle führenden Tonen mit Sanden und Kiesen) liegen dem Gebirge diskordant auf. Die klastischen Sedimente stellen teils gute Poren-Grundwasserleiter dar. Wegen der geringen Verbreitung ist das Braunkohlentertiär nur von lokaler wasserwirtschaftlicher Bedeutung.

Insgesamt liegen aus dem Braunkohle führenden Tertiär Analysenergebnisse von 14 Probenahmestellen mit sechs

Vollanalysen vor (Abb. 3.3-1). Aufgrund der geringen Probenzahl sind die angegebenen Spanneiten der Parameter mit einer entsprechenden Unsicherheit behaftet.

Die Hauptbestandteile der Kationen stellen bei relativ geringen Gehalten Calcium (Median: 41,2 mg/l) und Magnesium (Median: 9,4 mg/l), wobei Natrium- und Kaliumanteile bis 25 meq-% angetroffen werden. Hinsichtlich der Zusammensetzung der Anionen weisen die Wäs-

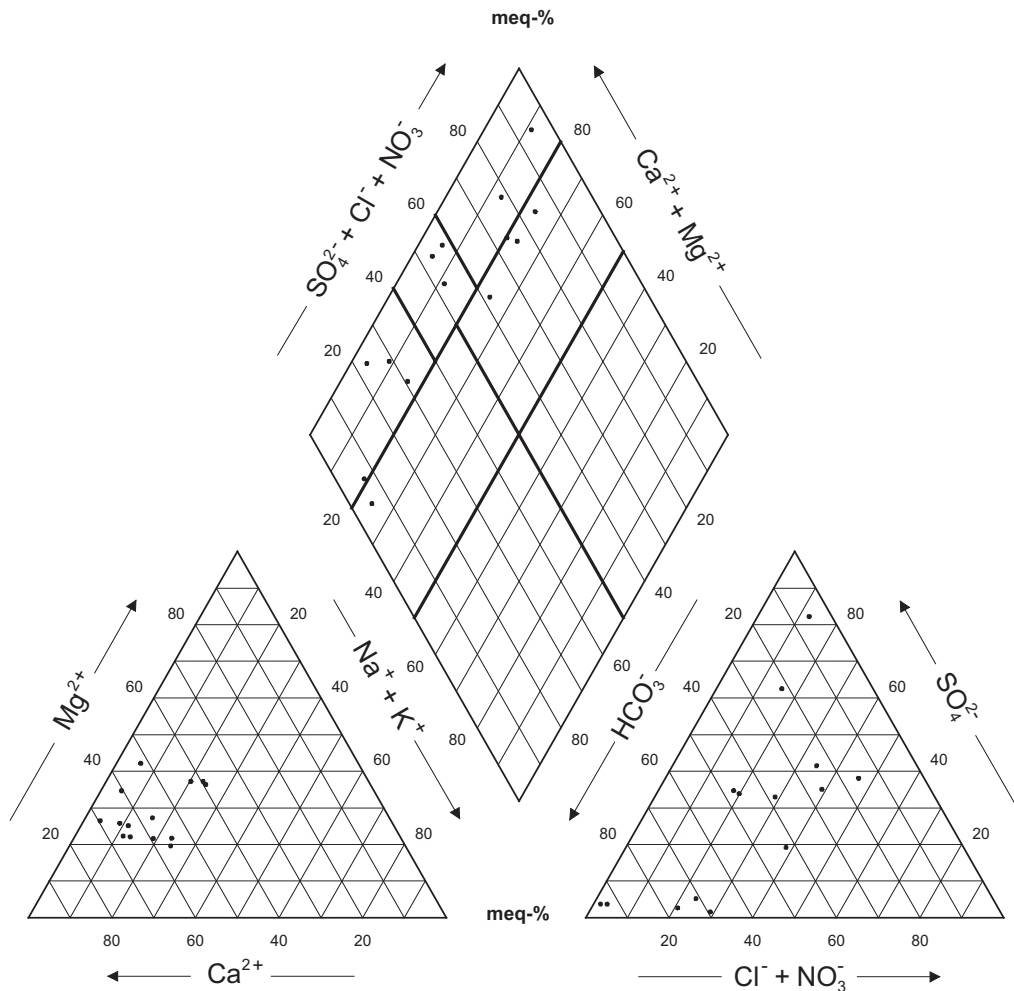


Abb. 3.3-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Braunkohlentertiär im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTA & LANGGUTH (1967) (14 Probenahmestellen)

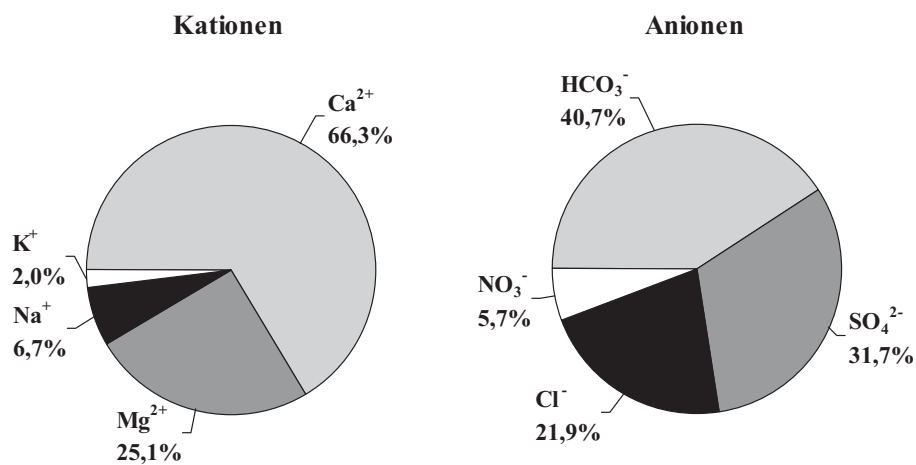


Abb. 3.3-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Braunkohlentertiär

ser eine große Spannbreite auf und sind im Median ungefähr zu gleichen Anteilen hydrogenkarbonatisch, sulfatisch und chloridisch (Abb. 3.3-3). Nach der Klassifizierung von FURTAK & LANGGUTH (1967) fallen die Wässer des Braunkohlentertiärs damit relativ gleichverteilt in mehrere Felder, die sich um den Typ der „normal erdalkalischen, hydrogenkarbonatisch bis sulfatischen Wässer“ gruppieren (Abb. 3.3-2).

Die Gesamtmineralisation liegt leicht unter dem Durchschnitt und beträgt für 80% der Wässer zwischen 125 und 362 mg/l (Median: 262 mg/l). Die spezifische elektrische Leitfähigkeit schwankt zwischen 17 und 45 mS/m. Mit einer Gesamthärte von 80% der Werte zwischen 3,7 und 12,7°dH sind die Wässer „weich“ bis „mittelhart“ (Härtebereich 1 bis 2 nach Waschmittelgesetz).

Der pH-Wert schwankt zwischen 5,7 und 7,2 von sauer bis neutral, wobei die Wässer überwiegend sauer sind (Median 6,4). Der Calciumkarbonat-Sättigungsindex von -3,75 bis -0,83 zeigt eine durchgehende Kalkuntersättigung der Wässer und damit eine fehlende Karbonatpufferung an.

Die Wässer aus dem Braunkohlentertiär sind überwiegend reduziert bis teilreduziert; lediglich die Quellen weisen höhere Sauerstoffgehalte auf; dementsprechend sind sowohl die Eisen- als auch die Mangangehalte der untersuchten Wässer deutlich erhöht (Mediane 0,18 bzw. 0,007 mg/l).

In den Wässern des Braunkohlentertiärs werden im Allgemeinen geringe Spurenstoffgehalte festgestellt. In der Reihenfolge abnehmender Werte wurden mit Medianen über 10 µg/l Strontium, Barium und Aluminium sowie mit über 1 µg/l Zink, Lithium und Rubidium angetroffen. Auffällig sind die Aluminiumgehalte, die nach den Wässern des salinaren Zechsteins die höchsten Werte aller betrachteten Grundwasserleiter erreichen.

3.4 Quartärschotter mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung

In der hydrogeologischen Einheit der Quartärschotter mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung wurden die Grundwasserleiter aus quartären Flusstalfüllungen (Kiese und Sande) zusammengefasst (Lockergesteins-Poren-Grundwasserleiter), deren Liefergebiet aus geologischen Einheiten mit überwiegend silikatischer Gesteinszusammensetzung besteht. Hierzu zählen insbesondere Flusstäler in Nordbayern, wobei der Unterlauf des Mains im hydrogeologischen Teilraum Hanauer-Seligenstädter Senke den bedeutendsten Grundwasserleiter stellt, sowie die Flusstäler in der Vorlandmolasse, deren Einzugsgebiete nur innerhalb der Molasse liegen.

Aufgrund der geringen Flurabstände und der weitgehend fehlenden Deckschichten sind die Grundwasservorkommen in den Quartärschottern in der Regel nur gering gegen Schadstoffeinträge geschützt.

Insgesamt liegen Analysenwerte aus 115 Probenahmestellen mit 45 Vollanalysen vor (Abb. 3.4-1). Bei den Kationen überwiegen Calcium und Magnesium; bei den Anionen wird am häufigsten Hydrogenkarbonat angetroffen, wobei zahlreiche Wässer höhere Anteile an Sulfat

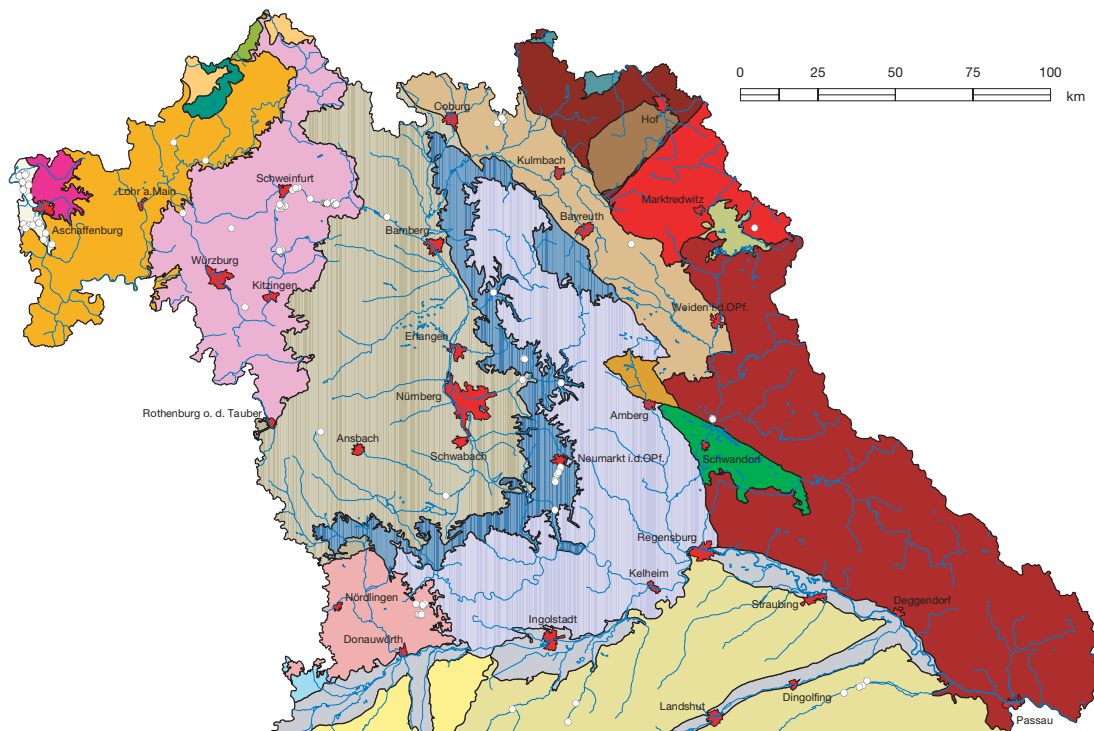


Abb. 3.4-1: Lage der 115 Probenahmepunkte aus den Quartärschottern mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung

und Chlorid sowie untergeordnet Nitrat enthalten (Abb. 3.4-3). Die untersuchten Wässer sind nach FURTAK & LANGGUTH (1967) mehrheitlich als „normal erdalkalische, hydrogenkarbonatische bis sulfatische Wässer“ einzustufen (Abb. 3.4-2). Die höheren Chloridwerte sind ebenso wie die Nitratgehalte auf anthropogene Einflüsse unterschiedlicher Art (z.B. Düngung, Straßensalzung) zurückzuführen.

Die Gesamtmineralisation der Grundwässer aus den vorwiegend silikatischen Quartärschottern liegt für 80% der Messwerte in einem relativ breiten Bereich zwischen 119 und 787 mg/l (Median 547 mg/l). Die hohe Variabilität dürfte auf eine wegen der verschiedenen Liefergebiete vermutlich recht heterogene Gesteinszusammensetzung dieser hydrogeologischen Einheit sowie einen wechselnden Anteil an Oberflächeneinflüssen zurückzuführen sein. Weiterhin werden die Grundwässer der quartären Talfüllungen durch den auf die jeweiligen Vorfluter gerichteten Zustrom von Wässern aus den angrenzenden Grundwasserleitern unterschiedlich beeinflusst (APEL et al. 1993). Die spezifische elektrische Leitfähigkeit der Wässer schwankt ebenfalls stark zwischen 8 und 92 mS/m. Mit einer Gesamthärte von 7,0 bis 27,5°dH sind die Wässer „mittelhart“ bis „hart“ (Härtebereich 2 bis 4 nach Waschmittelgesetz). Die pH-Werte zwischen 6,5 und 7,5 (Median 7,2) bewegen sich im leicht sauren bis schwach alkalischen Bereich. Sie sind damit im Mittel geringfügig niedriger als die pH-Werte der karbonatischen Quartärschotter, weisen jedoch auf eine dennoch überwiegende Karbonatpufferung der Wässer hin. Aufgrund der guten Löslichkeit des Calciumkarbonats genügen bereits geringe Kalkmengen im Grundwasserleiter, um eine karbonatische Pufferung zu bewirken. Die hohe Kontaktfläche in den Lockergesteinen fördert zudem die Einstellung von Lösungsgleichgewichten.

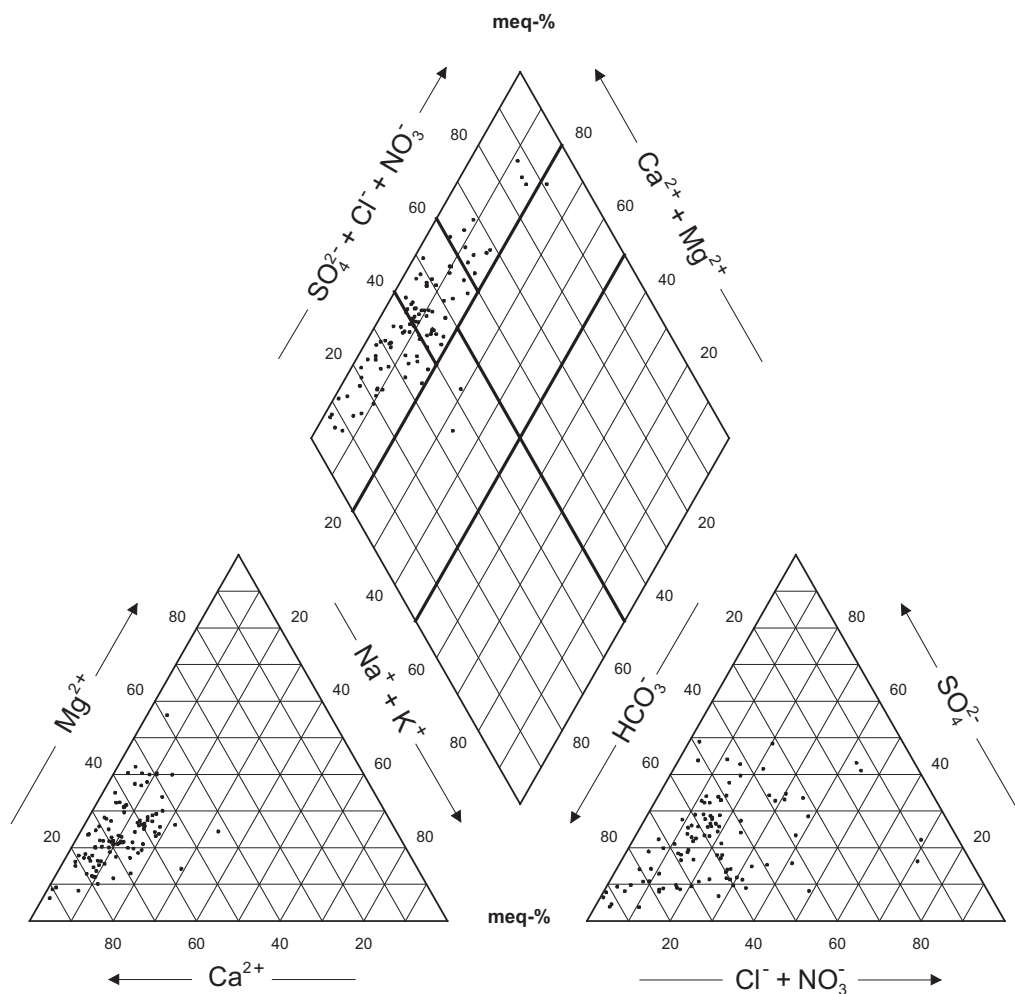


Abb. 3.4-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus den Quartärschottern mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (103 Probenahmestellen)

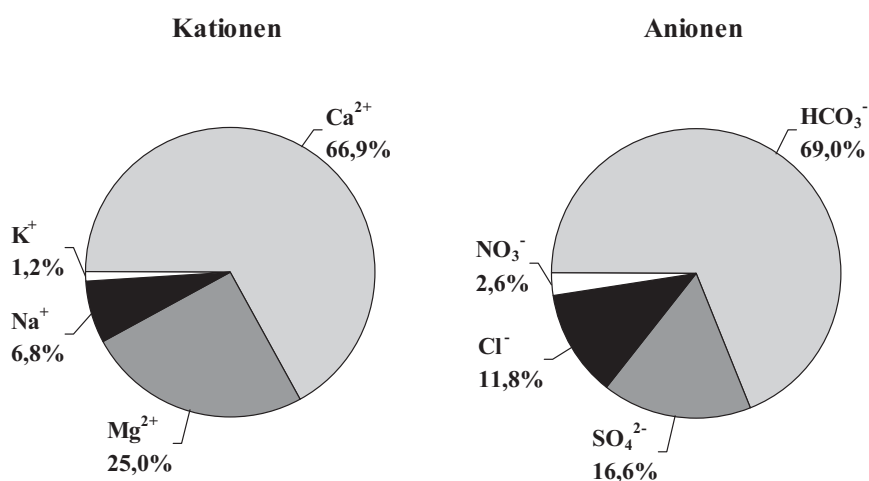


Abb. 3.4-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus den Quartärschottern mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung

Die oberflächennahen und damit in der Regel jungen Wässer weisen überwiegend hohe Sauerstoffgehalte auf; die mittlere Sauerstoffsättigung beträgt 67%. Häufig werden jedoch auch reduzierende Verhältnisse angetroffen, vorwiegend unter bindigen Auenablagerungen bzw. Mooren. Die Eisen- und Mangangehalte liegen mit einem Median von 0,06 bzw. 0,02 mg/l deutlich unter dem Schnitt aller Wässer.

Der gegenüber den karbonatischen Quartärschottern erhöhte Anteil silikatischer Gesteine zeigt sich zunächst insbesondere an dem höheren Siliciumanteil (Median 4,4 mg/l gegenüber 2,9 mg/l bei den karbonatischen Schottern).

Hinsichtlich der Spurenstoffgehalte überwiegen in den Wässern der silikatischen Quartärschotter Strontium, Barium und Aluminium mit Medianwerten über 10 µg/l und Zink, Lithium, Bor, Kupfer, Titan und Rubidium mit Werten über 1 µg/l. Der Aluminiumwert ist im Vergleich zu den anderen Grundwässern auffällig hoch und dürfte ebenfalls auf die intensivere Silikatverwitterung der Lockergesteine zurückzuführen sein. Insgesamt ist das Inventar an Spurenstoffen in den Wässern der silikatischen Quartärschotter gegenüber den karbonatischen Quartärschottern größer, was wohl auf den reichhaltigeren geogenen Mineralbestand der Gesteine dieses Grundwasserleiters und auch auf zutretende mineralreichere Wässer aus angrenzenden Grundwasserleitern (z.B. aus Muschelkalk und Keuper) zurückzuführen ist.

3.5 Alpenvorland

Im hydrogeologischen Großraum Alpenvorland (vgl. BÜTTNER et al. 2003) werden die folgenden Einheiten unterschieden:

- *Quartärschotter mit vorwiegend karbonatischer Zusammensetzung*
- *quartäre Grundwasserleiter im Moränenbereich*
- *seichte Vorlandmolasse*
- *tiefe Vorlandmolasse*

Ferner finden sich im Großraum Alpenvorland auch Probenahmepunkte aus dem Braunkohlentertiär (Kap. 3.3) sowie den Quartärschottern mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung (Kap. 3.4).

3.5.1 Quartärschotter mit vorwiegend karbonatischer Zusammensetzung

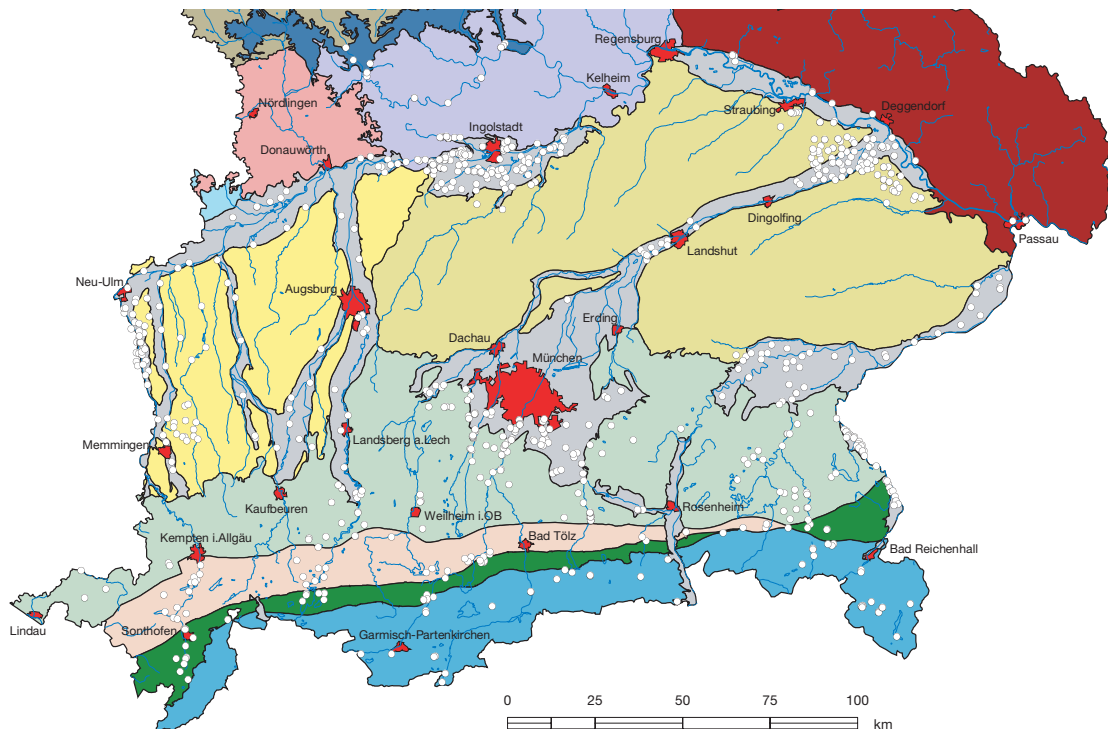


Abb. 3.5.1-1: Lage der 724 Probenahmepunkte aus den Quartärschottern mit vorwiegend karbonatischer Zusammensetzung

Die fluvioglazialen Quartärschotter mit vorwiegend karbonatischer Zusammensetzung (Kiese und Sande) zählen zu den am besten durchlässigen (überwiegend sehr hohe bis hohe Durchlässigkeiten) hydrogeologischen Einheiten in Bayern und stellen häufig sehr ergiebige Lockergesteins-Poren-Grundwasserleiter dar, die wasserwirtschaftlich von regionaler bis über-regionaler Bedeutung sind.

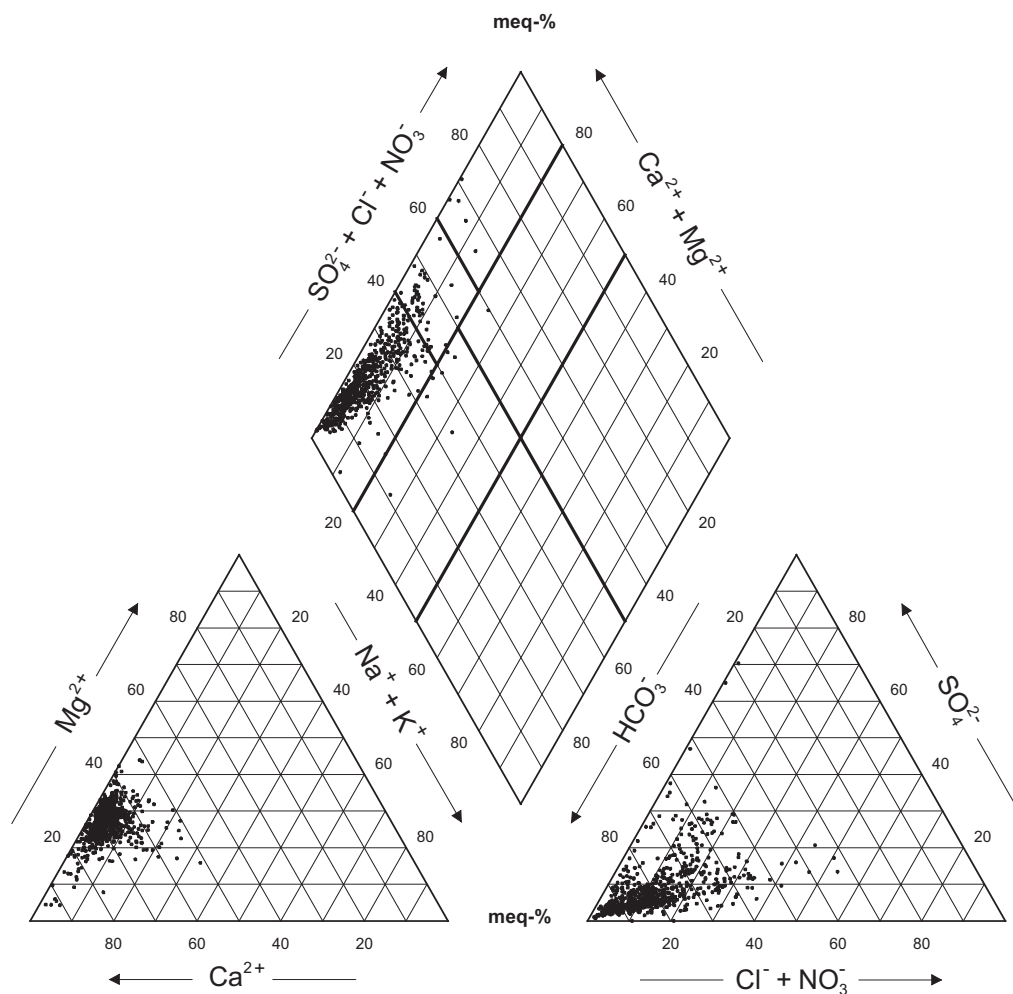


Abb. 3.5.1-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus Quartärschottern mit vorwiegend karbonatischer Zusammensetzung im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (662 Probenahmestellen)

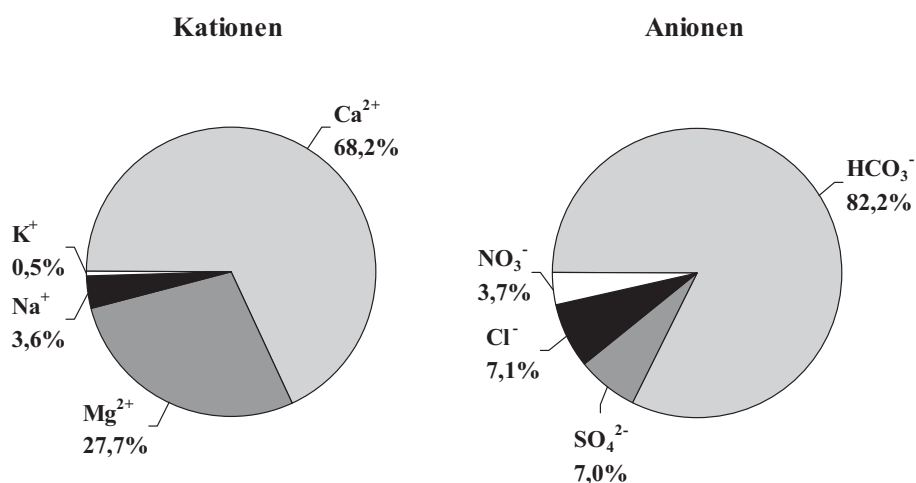


Abb. 3.5.1-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus den Quartärschottern mit vorwiegend karbonatischer Zusammensetzung

Das Verbreitungsgebiet erstreckt sich vorwiegend über die Flusstäler und glazialen Aufschotterungsbereiche von Alpen und Alpenvorland und untergeordnet die Flusstäler der Frankenalb. Hauptliefergebiet der vorwiegend karbonatischen Sedimente sind die Alpen im Süden. Die Mächtigkeiten können stark schwanken; in der Regel liegen sie im Einer bis Zehner Meterbereich. Häufig werden die Quartärschotter von Mooren, Schwemmfächern und Kalktuffen überdeckt. Die Oberflächengewässer in den Talschottern bilden in der Regel die Vorfluter für das Grundwasser.

Aufgrund der meist geringen Flurabstände und fehlender mächtigerer Deckschichten sind die Grundwasservorkommen in den Schottern gering gegen Schadstoffeinträge geschützt, so dass häufig eine anthropogene Beeinflussung der Wässer vorliegt.

Insgesamt liegen von den überwiegend karbonatischen Quartärschottern Analysenwerte aus 724 Probenahmestellen mit 344 Vollanalysen vor (Abb. 3.5.1-1). Als Hauptelemente überwiegen Calcium, Magnesium und Hydrogenkarbonat deutlich. Im Sinne von FURTAK & LANGGUTH (1967) sind die Wässer damit zum Großteil als „normal erdalkalisch, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer“ zu bezeichnen. Vermutlich anthropogene Einflüsse wie Düngung und Salzstreuung erhöhen bei einigen Proben die Anteile an Natrium, Chlorid und Nitrat sowie Sulfat und Kalium (Abb. 3.5.1-3). Diese Wässer streuen dann in die Felder der „erdalkalischen Süßwässer mit höherem Alkaligehalt, überwiegend hydrogenkarbonatisch“ oder auch der „erdalkalischen Wässer, hydrogenkarbonatisch-sulfatisch“ (Abb. 3.5.1-2).

Die Gesamtmineralisation der Grundwässer aus den karbonatischen Quartärschottern beträgt für 80% der Werte zwischen 391 und 786 mg/l (Medianwert 570 mg/l) und befindet sich damit leicht über dem Schnitt aller untersuchten Wässer; die spezifische elektrische Leitfähigkeit liegt im Bereich von 23 bis 99 mS/m. Die Wässer sind „ziemlich hart“ bis „hart“ mit einer Gesamthärte von 13 bis 27°dH (Härtebereich 3 und 4 nach Waschmittelgesetz) und einer Karbonathärte von 11,3 bis 20,1°dH. Der pH-Wert der kalkgepufferten Wässer bewegt sich erwartungsgemäß zwischen 7,0 und 7,6 im neutralen bis schwach alkalischen Bereich (Median: 7,3), wobei in den Kontaktzonen zu Mooren auch schwach saure Wässer angetroffen werden. Hier werden mitunter erhöhte TOC-Gehalte festgestellt, die von der Mineralisierung organischer Substanz herrühren.

Die oberflächennahen und damit in der Regel jungen Wässer weisen meist hohe Sauerstoffgehalte auf; die mittlere Sauerstoffsättigung beträgt 67%. Häufig werden auch reduzierende Bedingungen angetroffen, vorwiegend in den Bereichen einer Überdeckung der Schotter mit bindigen Auenablagerungen bzw. Mooren. Die Eisen- und Mangangehalte sind meist gering und liegen überwiegend unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen.

Bei den Spurenstoffen dominieren in den Wässern aus den vorwiegend karbonatischen Quartärschottern in der Reihenfolge abnehmender Konzentration mit Medianwerten über 10 µg/l Strontium, Barium, Bor und Zink und mit Medianwerten über 1 µg/l Lithium, Aluminium, Kupfer, Uran und Titan.

3.5.2 Quartäre Grundwasserleiter im Moränenbereich

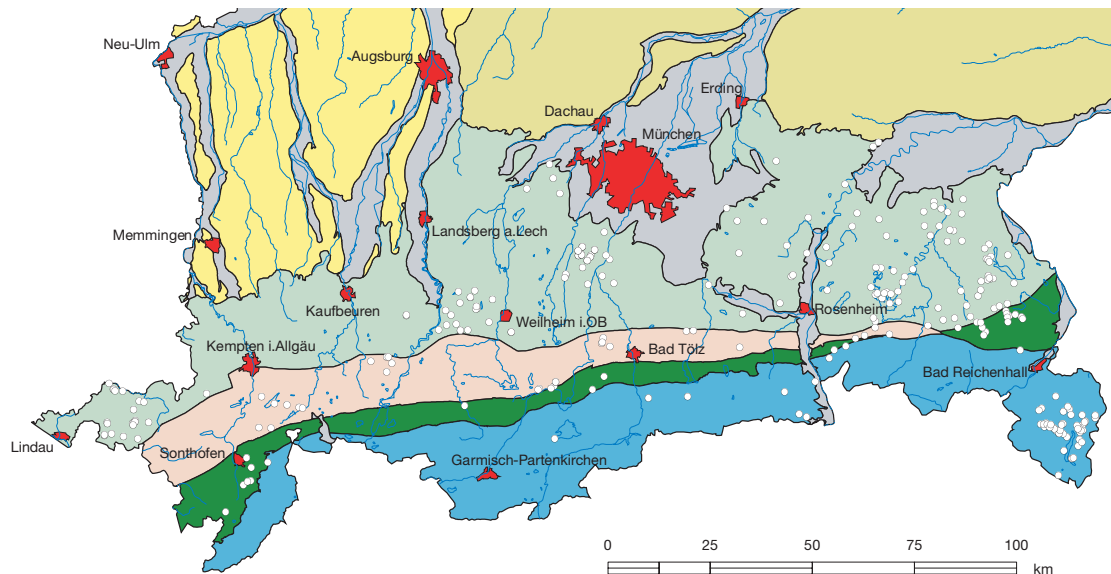


Abb. 3.5.2-1: Lage der 261 Probenahmepunkte aus den quartären Grundwasserleitern im Moränenbereich

Die quartären Grundwasserleiter im Moränenbereich enthalten zum Teil ergiebige Grundwasservorkommen innerhalb der quartären glazialen Ablagerungen am Nordrand der Alpen (s.a. WROBEL 1983). Das Vorkommen dieser hydrogeologischen Einheit ist nach Norden durch (End)-Moränenwälle abgegrenzt. An der Oberfläche ausstreichende Kieskörper innerhalb des Süddeutschen Moränenlands wurden der hydrogeologischen Einheit der fluvioglazialen Quartärschotter (s. Kap. 3.5.1) zugerechnet.

Das Süddeutsche Moränenland ist gekennzeichnet durch einen kleinräumigen Wechsel von quartären, hoch bis mittel durchlässigen, fluviatilen Kiesen und Sanden, mäßig bis gering durchlässigen Moränenablagerungen und sehr gering durchlässigen Seeablagerungen, die sich horizontal wie vertikal verzahnen. Dadurch kommen z. T. mehrere übereinander liegende Grundwasserstockwerke mit bereichsweise gespannten Verhältnissen vor. Für die Grundwasserführung bedeutend sind die kiesigen Ablagerungen in Form zahlreicher kleinerer Schotterkörper und -rinnen sowie kieshaltiger Moränenbereiche (Lockergesteins-Poren-Grundwasserleiter); diese sind wasserwirtschaftlich von lokaler bis regionaler Bedeutung.

Hauptliefergebiet der vorwiegend karbonatischen Sedimente sind die Alpen im S. Die Mächtigkeiten und die Ausdehnung der Grundwasser führenden Bereiche schwanken stark und reichen von kleineren Vorkommen bis zu ausgedehnteren Schotterkörpern mit mehreren Zehner Metern Mächtigkeit.

Die Grundwasser führenden Kiese und Sande im Moränenbereich werden meist von gering durchlässigen Moränen- und Seeablagerungen sowie häufig auch von Mooren überdeckt. Dadurch liegt eine relativ geringe Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers gegenüber Schadstoffeinträgen vor.

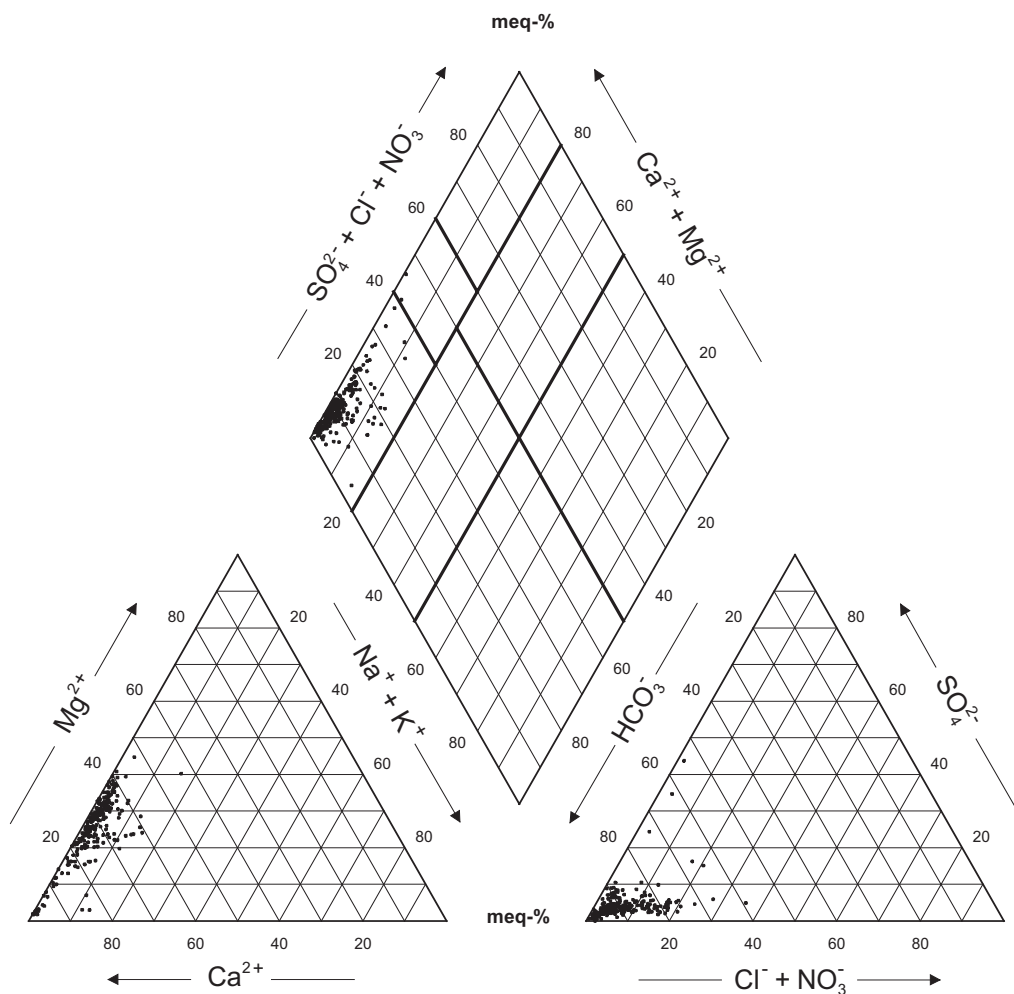


Abb. 3.5.2-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus den quartären Grundwasserleitern im Moränenbereich im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (258 Probenahmestellen)

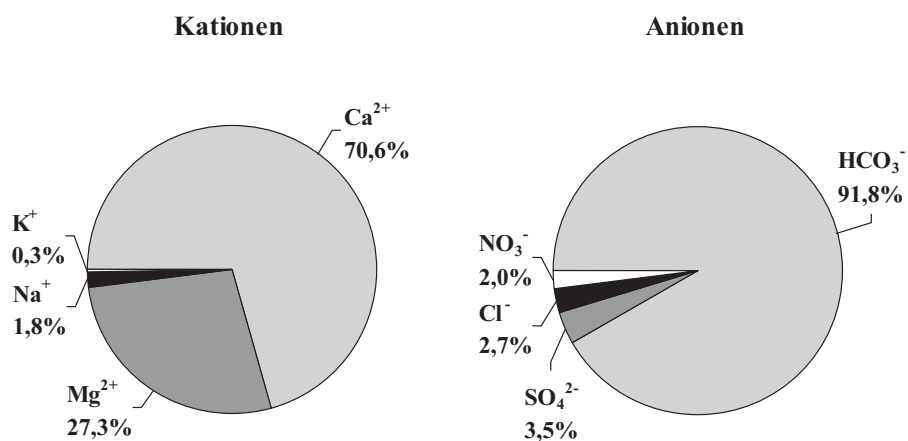


Abb. 3.5.2-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus den quartären Grundwasserleitern im Moränenbereich

Für die statistische Betrachtung liegen Analysenwerte aus 261 Probenahmestellen mit 122 Vollanalysen vor (Abb. 3.5.2-1). Im Sinne von FURTAK & LANGGUTH (1967) fallen die Wässer aufgrund der Zusammensetzung der Hauptelemente fast ausschließlich in das Feld der „normal erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen Wässer“ (Abb. 3.5.2-2). Vereinzelt werden höhere Nitratwerte beobachtet (Maximum 79 mg/l); der Mittelwert ist jedoch mit 7,5 mg/l relativ niedrig. Auch die Konzentrationen weiterer möglicher Indikatoren für anthropogene Belastungen Natrium und Kalium sowie Chlorid und Sulfat treten nur in geringen Konzentrationen auf (Abb. 3.5.2-3). Dies ist auf die schützende Wirkung der gering durchlässigen Deckschichten, jedoch auch auf die höhere Niederschlags- und damit Grundwasserneubildungsrate in den alpennahen Gebieten zurückzuführen.

Die aus der Ionenkonzentration ermittelte Gesamtmineralisation der Grundwässer der quartären Grundwasserleiter im Moränenbereich beträgt für 80% der Werte zwischen 262 und 632 mg/l (Medianwert 505 mg/l) und liegt damit deutlich niedriger als bei den hinsichtlich der Gesteinszusammensetzung vergleichbaren vorwiegend karbonatischen Quartärschottern (Kap. 3.5.1). Die spezifische elektrische Leitfähigkeit schwankt im Bereich von 28 bis 73 mS/m. Die Wässer weisen eine Gesamthärte von 9,0 bis 22,2°dH auf und sind damit „mittelhart“ bis „hart“ (Härtebereich 2 bis 4 nach Waschmittelgesetz), und eine Karbonathärte von 8,7 bis 19,7°dH. Der pH-Wert bewegt sich für 80% der Werte zwischen 7,2 und 8,1 (Median: 7,5) im neutralen bis schwach alkalischen Bereich und ist damit geringfügig höher als in den überwiegend karbonatischen Quartärschottern.

Die Wässer weisen meist hohe Sauerstoffgehalte auf; die mittlere Sauerstoffsättigung beträgt 75%; dies spricht für einen überwiegend hohen Grundwasserdurchsatz und damit relativ geringe Grundwasseralter in den gut durchlässigen Grundwasserleitern im Moränenbereich. Die Eisengehalte entsprechen dem Schnitt aller Wässer; die Mangangehalte liegen zu über 90% unter der Bestimmungsgrenze.

Die Spurenstoffanalytik ergab für die Wässer der quartären Grundwasserleiter im Moränenbereich höhere Medianwerte über 10 µg/l in der Reihenfolge abnehmender Konzentration für die Elemente Strontium und Barium sowie über 1 µg/l für Bor, Zink, Chrom und Aluminium. Auffällig ist der relativ hohe 90%-Quantilwert von Selen (14,5 µg/l).

3.5.3 Vorlandmolasse

Bei der Vorlandmolasse (auch: ungefaltete Molasse) handelt es sich um die tertiären Ablagerungen des voralpinen Sedimentationsbeckens zwischen Alpen und Donau, die nicht in die alpidische Faltung mit einbezogen wurden. Hier sind Grundwasser leitende (Sande und Kiese) und gering leitende (Schluffe, Tone und Mergel) Schichten horizontal und lateral relativ kleinräumig verzahnt. Weiterhin existieren graduelle Faziesübergänge (z.B. Zunahme des Feinkornanteils in der Oberen Süßwassermolasse nach W) sowie Diskordanzen (z.B. Graupensandrinne). Die Molasse überlagert zumeist die nach S abtauchende Malmtafel und weist somit von N nach S zunehmende Mächtigkeiten von mehreren Zehner Metern auf bis zu mehrere Tausender Meter auf. Im Süden wird die Molasse von den glazialen Sedimenten des süddeutschen Moränenlands überlagert.

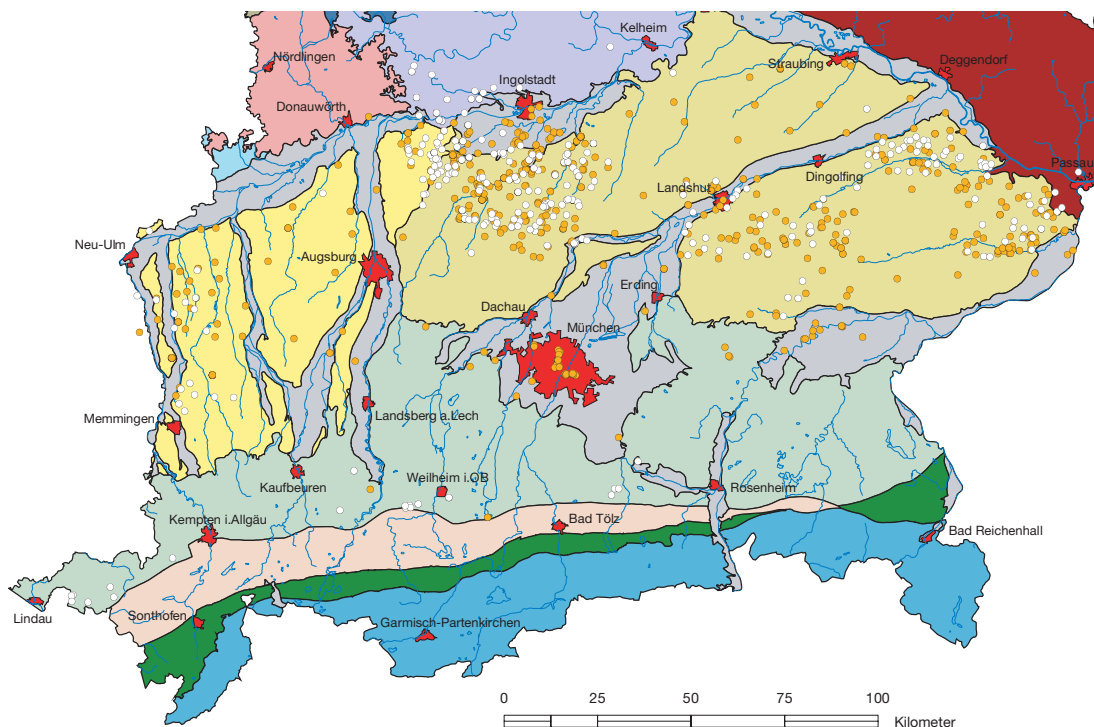


Abb. 3.5.3-1: Lage der Probenahmepunkte aus der seichten Vorlandmolasse (weiße Punkte, n = 280) und aus der tiefen Vorlandmolasse (orange Punkte, n = 465)

Den obersten zusammenhängenden Grundwasserleiter in der Molasse bilden die bis zu 200 m mächtigen Einheiten der Oberen Süßwassermolasse (OSM), die als Lockergesteins-Poren-Grundwasserleiter mit mäßiger Durchlässigkeit ausgebildet ist. Die Basis dieser Grundwasser führenden Abfolge der OSM wird durch die gering bis äußerst gering durchlässigen Schichten der Limnischen Unteren Serie gebildet, die im äußersten NW noch an der Oberfläche anstehen. Nach E zu sind tiefere Einheiten der Molasse aufgeschlossen, die hier den obersten Grundwasserleiter bilden (z.B. Oncophora-Schichten der Oberen Brackwassermolasse, Glaukonitsande, Neuhoferer Schichten der Oberen Meeresmolasse) und eine geringe Durchlässigkeit aufweisen. Im Liegenden der OSM sind noch weitere tiefere Grundwasservorkommen in der Molasse anzutreffen, die jedoch nur wenig genutzt werden. Das oberste zusammenhängende Hauptgrundwasserstockwerk der OSM ist aufgrund der relativ hohen Mächtigkeiten wasserwirtschaftlich von regionaler Bedeutung. Die zahlreichen kleinräumigen hangenden Grundwasservorkommen in der Vorlandmolasse werden häufig von privaten Einzelversorgern genutzt.

Aufgrund der überwiegend hohen Flurabstände und der schützenden Deckschichten sind die wasserwirtschaftlich bedeutenden Grundwasservorkommen der OSM gegen Schadstoffeinträge von der Oberfläche in der Regel gut geschützt. Eine geringere Geschützttheit liegt lediglich in den Talbereichen der Vorfluter vor.

Die Wässer der Vorlandmolasse werden in die seichte Vorlandmolasse (oberflächennahe, junge Grundwässer aus Quellen und Brunnen <30 m Endteufe) und in die tiefe Vorlandmolasse (tiefere, ältere Grundwässer aus Brunnen mit einer Verfilterung >30 m) unterschieden. Diese Unter-

scheidung wurde vorgenommen, da anhand von Grundwasseraltersbestimmungen in der Molasse (ANDRES 1983) diese Tiefenlage als ungefähre Grenze zwischen jungen Tritium führenden Grundwässern und älteren anthropogen eher gering beeinflussten Grundwässern ermittelt wurde. Für die seichte Vorlandmolasse liegen 280 Probenahmepunkte mit 183 Vollanalysen, für die tiefe Vorlandmolasse 465 Grundwasseraufschlüsse mit 320 Vollanalysen vor (Abb. 3.5.3-1).

Die Hauptbestandteile der tiefen Molasse sind Calcium und Magnesium sowie Hydrogenkarbonat (Abb. 3.5.3-5). Nach der Klassifizierung von FURTAK & LANGGUTH (1967) zählen die Wässer damit zum Großteil zu den „normal erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen Wässern“. Wie im Kationendreieck in Abb. 3.5.3-4 gut zu erkennen ist, werden in der tieferen Molasse bereichsweise Ionenaustauschwässer angetroffen, die sich durch erhöhte Natrium- und verminderte Calcium- und Magnesiumkonzentrationen auszeichnen. Diese Wässer sind nach FURTAK & LANGGUTH (1967) als „erdalkalische Süßwässer mit höherem Alkaligehalt, hydrogenkarbonatisch“ bzw. „alkalische Wässer, überwiegend hydrogenkarbonatisch“ anzusprechen. In den oberflächennahen Brunnen- und Quellwässern sind häufig erhöhte Gehalte an Natrium, Chlorid und Nitrat, seltener auch Sulfat und Kalium und damit eine deutliche Tendenz zu den „hydrogenkarbonatisch-sulfatischen“ bis „überwiegend sulfatischen Wässern“ feststellbar (Abb. 3.5.3-2 und Abb. 3.5.3-3). Diese Parameter sind Indikatoren eines, meist diffusen, anthropogenen Stoffeintrags, der überwiegend auf die intensive landwirtschaftliche Nutzung im Alpenvorland zurückzuführen ist.

Die Gesamtmineralisation der oberflächennahen Grundwässer der Molasse beträgt für 80% der Werte zwischen 328 und 736 mg/l (Median: 536 mg/l); zur Tiefe hin wird sie geringer und schwankt dann zwischen 337 und 602 mg/l (Median: 455 mg/l). Dementsprechend verringern sich die Spannweiten der spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten von Werten für die oberflächennahen Wässer zwischen 38,2 und 93,4 mS/m zur Tiefe hin auf 38,7 bis 70,7 mS/m. Diese Werte entsprechen ungefähr dem Schnitt aller untersuchten Wässer.

Die Wässer sind in der seichten Molasse mit Gesamthärten von 10,2 bis 25,6°dH „mittelhart“ bis „hart“ (Härtebereich 2 bis 3 nach Waschmittelgesetz), während die Wässer der tiefen Molasse aufgrund der Austauschwässer niedrigere Gesamthärten (6,0 bis 19,6°dH) aufweisen und als „ziemlich hart“ bis „weich“ (Härtebereich 1 bis 3) anzusprechen sind. Die Karbonathärten liegen dagegen mit etwa 9 bis 19°dH durchgehend im gleichen Bereich. Der pH-Wert ist in der seichten Molasse im Schnitt niedriger (Median 7,3, 80% der Werte zwischen 6,9 und 7,7) als in der tiefen Molasse (Median 7,6, Spannweite 7,2 bis 8,0), jedoch hier wie dort im noch neutralen mit Tendenz zum schwach alkalischen Bereich. Diese Werte weisen ebenso wie der Sättigungsindex SI für Calciumkarbonat (80% der Werte zwischen -1 und -0,1 in der seichten und -0,6 und -0,1 in der tiefen Molasse) auf eine weitestgehende Kalkpufferung der Wässer in der Vorlandmolasse hin.

Die Quell- und Brunnenwässer der seichten Molasse sind teilreduziert bis sauerstoffgesättigt mit einer mittleren Sauerstoffsättigung um 69% (80% der Wässer zwischen 12,6 und 96%); die Brunnenwässer der tiefen Molasse aus Brunnen mit Ausbautiefen >30 m sind dagegen meist deutlich reduziert; der Mittelwert der Sauerstoffsättigung beträgt hier 26% (6,6-85%). Niedrige Sauerstoffgehalte korrelieren in der Regel mit erhöhten Eisen- und Manganwerten, wenn im

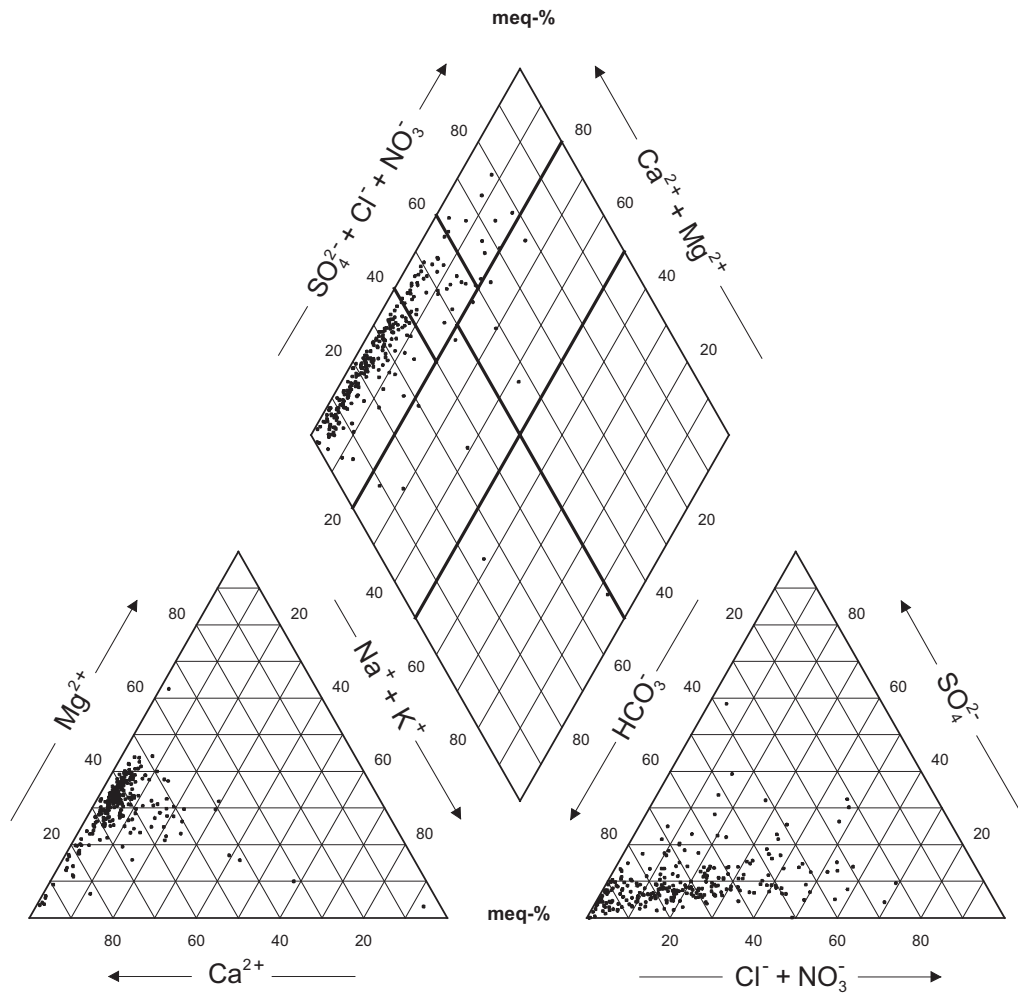


Abb. 3.5.3-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus der seichten Vorlandmolasse im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (261 Probenahmestellen)

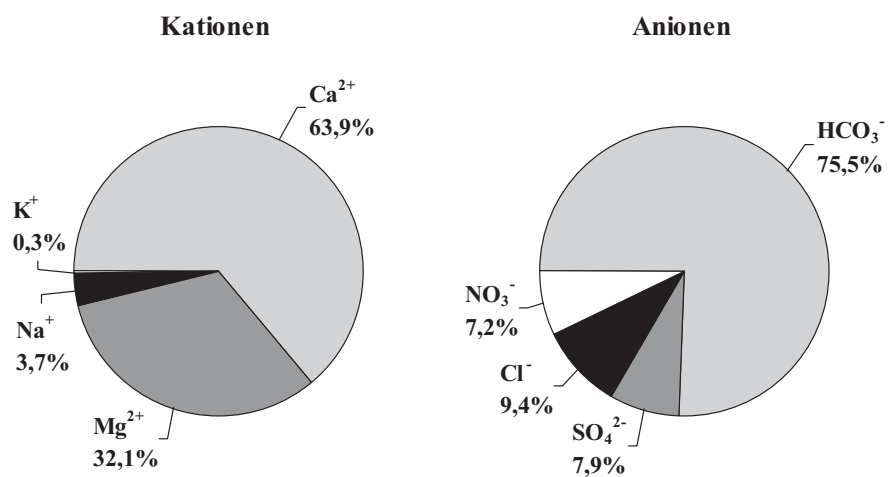


Abb. 3.5.3-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus der seichten Vorlandmolasse

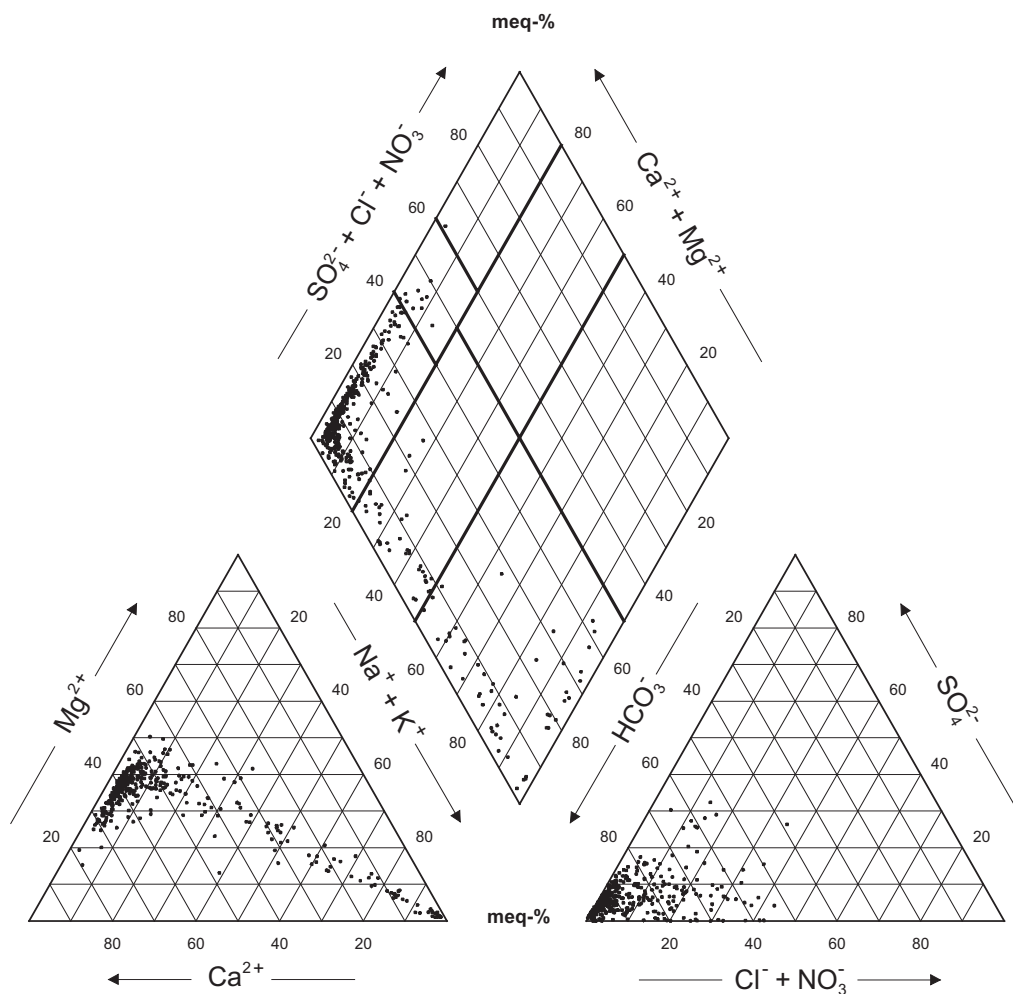


Abb. 3.5.3-4: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus der tiefen Vorlandmolasse im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (447 Probenahmestellen)

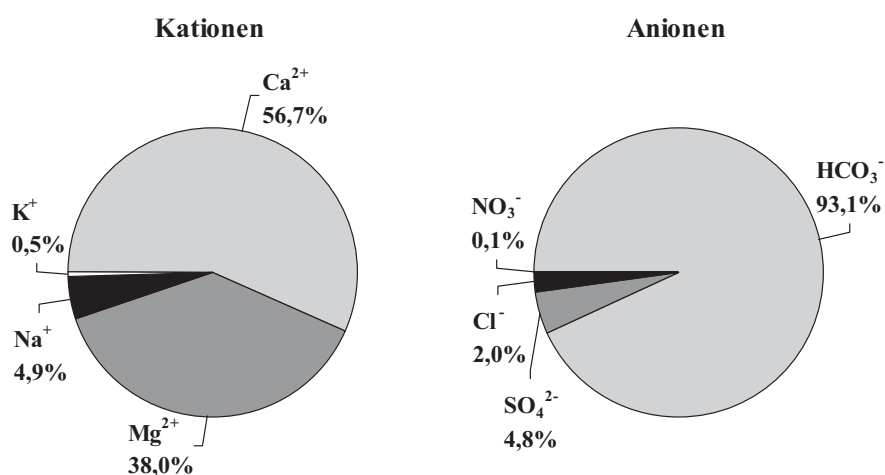


Abb. 3.5.3-5: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus der tiefen Vorlandmolasse

Gestein die entsprechenden Elemente vorliegen. Eisen wird dementsprechend in den tieferen, meist sauerstofffreien Tertiärwässern (Median 0,10 mg/l, <NG bis 0,62 mg/l) häufiger und in höheren Konzentrationen angetroffen als in oberflächennahen Tertiärwässern (Median 0,02 mg/l, <NG - 0,51 mg/l). Überschreitungen des Grenzwerts der Trinkwasserverordnung treten hier häufig auf, ebenso auf wie bei Mangan (Median 0,01 mg/l; <NG bis 0,06 mg/l).

Auffällig ist ferner ein im Vergleich zu den anderen betrachteten Grundwässern relativ hoher Gehalt an Silicium, der auf die Verwitterung der im Molassegestein reichlich vorhandenen Feldspäte zurückzuführen sein dürfte.

Die Auswertung der Spurenelementgehalte ergab für die seichte Molasse mit Medianwerten über 10 µg/l deutliche Nachweise für Strontium und Barium sowie mit Werten über 1 µg/l für Zink, Bor, Lithium, Aluminium, Titan und Uran. In der tieferen Molasse wurden in der Reihenfolge abnehmender Konzentration mit Medianwerten über 10 µg/l Strontium, Barium und Zink sowie mit über 1 µg/l Lithium und Bor gemessen. Die Arsenkonzentrationen liegen über dem allgemeinen Durchschnitt; bei einigen Brunnen mit reduzierenden Bedingungen werden die Grenzwerte der TrinkWV für Arsen überschritten. Die Elemente Barium, Lithium und Molybdän werden in der tiefen Vorlandmolasse in deutlich höheren Konzentrationen nachgewiesen als in der seichten Vorlandmolasse; umgekehrt verhält es sich für die Elemente Chrom, Lanthan, Nickel, Antimon, Vanadium und Yttrium.

3.6 Alpen

Im hydrogeologischen Großraum Alpen (vgl. Tab. 3-2 sowie BÜTTNER et al. 2003) werden die folgenden hydrogeologischen Einheiten unterschieden:

- *Faltenmolasse*
- *Flysch*
- *Helvetikum*
- *Kalkalpen in vorwiegend kalkiger Fazies*
- *Kalkalpen in vorwiegend dolomitischer Fazies*
- *Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies*

Ferner finden sich im Großraum Alpen auch vereinzelte Probenahmepunkte aus den Quartär-schottern mit vorwiegend karbonatischer Zusammensetzung (Kap. 3.5.1) sowie den quartären Grundwasserleitern im Moränenbereich (Kap. 3.5.2).

3.6.1 Faltenmolasse

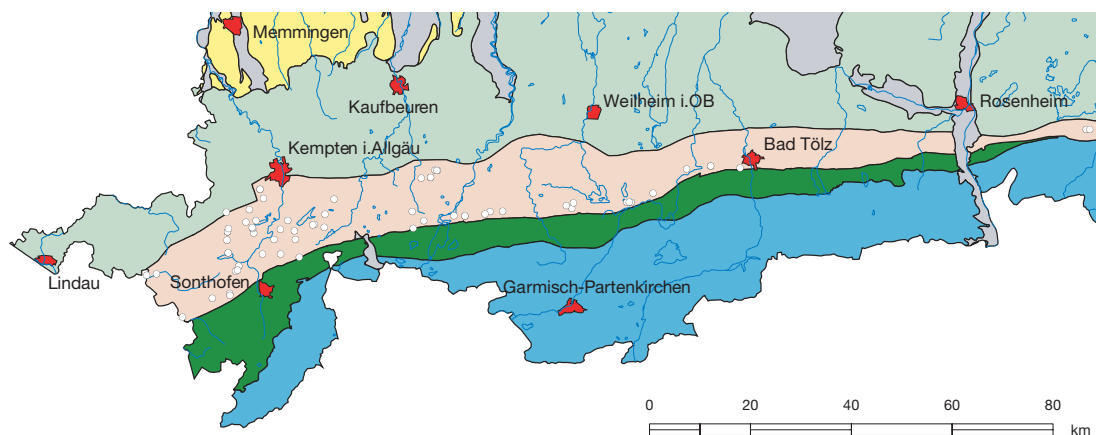


Abb. 3.6.1-1: Lage der 60 Probenahmepunkte aus der Faltenmolasse

Bei der Faltenmolasse handelt es sich vorwiegend um Ablagerungen, die während des Tertiärs aus dem sich heraushebenden Alpenkörper im voralpinen Sedimentationsbecken abgelagert wurden und, im Gegensatz zur Vorlandmolasse, durch Faltung und Überschiebung in die alpidische Deformation mit einbezogen wurden. Als Gesteine finden sich hier, in Analogie zur Vorlandmolasse, Sandsteine und Konglomerate sowie Schluff-, Ton- und Mergelsteine mit allgemein gemischt silikatisch/karbonatischem Gesteinschemismus. Die Einheiten der Faltenmolasse sind sedimentär kleinräumig verzahnt bzw. durch graduelle Faziesübergänge gekennzeichnet. Im Tertiär wurden die Gesteine von ihrem Untergrund abgeschert, gefaltet und verschuppt, so dass sie heute in Form einer bis zu 15 km breiten, W-E-streichenden Decken-/Muldenstruktur auf der autochthonen Vorlandmolasse zu liegen kommen. Nach Norden ist die Faltenmolasse durch die ungefaltete Vorlandmolasse begrenzt, nach Süden durch die Helvetikum- bzw. Flyschzone der Alpen. Die tektonisch bedingte vertikale Mächtigkeit der Faltenmolasse erreicht Werte bis über 6.000 m. Wegen der nach E zu flacher werdenden Morphologie werden

die Gesteine der Faltenmolasse dort zunehmend von quartärem Moränenmaterial und fluvioglazialen Schottern überlagert.

Bei der Faltenmolasse handelt es sich um einen Festgesteins-Kluft- bzw. Kluft-Poren-Grundwasserleiter mit überwiegend geringer bis sehr geringer Durchlässigkeit. Wegen der geringen wasserwirtschaftlichen Nutzung gibt es nur wenig Informationen über die Grundwasserverhältnisse. Wässer aus der Faltenmolasse werden, abgesehen von wenigen Ausnahmen (z.B. Immenstadt i. Allgäu), nur vereinzelt in Form gefasster Quellen zur privaten Eigenwasserversorgung genutzt.

Die Grundwasservorkommen sind dort aufgrund der sehr geringen Flurabstände und der fehlenden Überdeckung mit bindigen Horizonten als potenziell sehr verschmutzungsempfindlich anzusehen, was aber durch die hohe Grundwasserneubildungsrate und den hohen Verdünnungseffekt teilweise kompensiert wird.

Nennenswerte Grundwasservorkommen innerhalb der tieferen Faltenmolasse sind aufgrund der lithologisch-strukturellen Gegebenheiten allenfalls für den Westteil der Faltenmolasse zu erwarten. Eine Besonderheit mit lokaler wirtschaftlicher Bedeutung sind die i.A. an die Untere Meeresmolasse gebundenen Jodwässer (vgl. u.a. CARLÉ 1975), die für balneologisch-medizinische Anwendungen genutzt werden.

Von den Grundwässern aus der Faltenmolasse liegen Analysenergebnisse aus 60 Probenahmestellen mit 36 Vollanalysen vor (vgl. Abb. 3.6.1-1).

Bezüglich der Hauptkationenverhältnisse überwiegt für die Mehrzahl der Wässer Calcium deutlich gegenüber Magnesium und den Alkalimetallen Natrium und Kalium, im Falle der Anionenverhältnisse dominiert Hydrogenkarbonat noch viel deutlicher über die restlichen Anionen (Abb. 3.6.1-2 und Abb. 3.6.1-3). Die Gehalte an Calcium (Median: 72,5 mg/l) und Magnesium (Median: 18,8 mg/l) weisen die höchsten Werte unter den alpinen Wässern auf. Lediglich zwei jodhaltige Mineralwässer aus der Unteren Meeresmolasse fallen aufgrund des Überwiegens des Alkalimetalls Natrium und mit Einschränkungen auch Kalium über die Erdalkalimetalle bzw. aufgrund der deutlich erhöhten Chloridgehalte auf. Nach der Klassifikation von FURTAK & LANGGUTH (1967) im PIPER-Diagramm kommen die Wässer mit Ausnahme der beiden jodhaltigen Wässer als kleine, scharf begrenzte Punktwolke im Feld der „normal erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen Wässer“ zu liegen. Die beiden jodhaltigen Wässer aus der Unteren Meeresmolasse sind als „alkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische bzw. überwiegend chloridische Wässer“ zu bezeichnen. Die Nitrat-, Chlorid- und auch Sulfatgehalte der Wässer aus der Faltenmolasse liegen mit Medianwerten von 5,3 mg/l, 1,9 mg/l bzw. 5,5 mg/l generell niedrig und zeigen wie auch die übrigen Wässer aus dem alpinen Raum nur eine geringe anthropogene Komponente.

Die Gesamtmineralisation und damit auch die spezifische elektrische Leitfähigkeit sind mit Medianwerten von 440 mg/l bzw. rund 49 mS/m im Vergleich zu den übrigen Wässern aus dem alpinen Raum hoch. Ebenfalls hoch ist auch die Gesamthärte, die für 80% aller Wässer zwischen 9,8°dH und 19°dH liegt. Dies entspricht den Härtestufen „mittelhart“ bis „hart“ bzw. den Härtebereichen 2 und 3 nach Waschmittelgesetz. Aufgrund der vergleichsweise hohen Hydrogen-

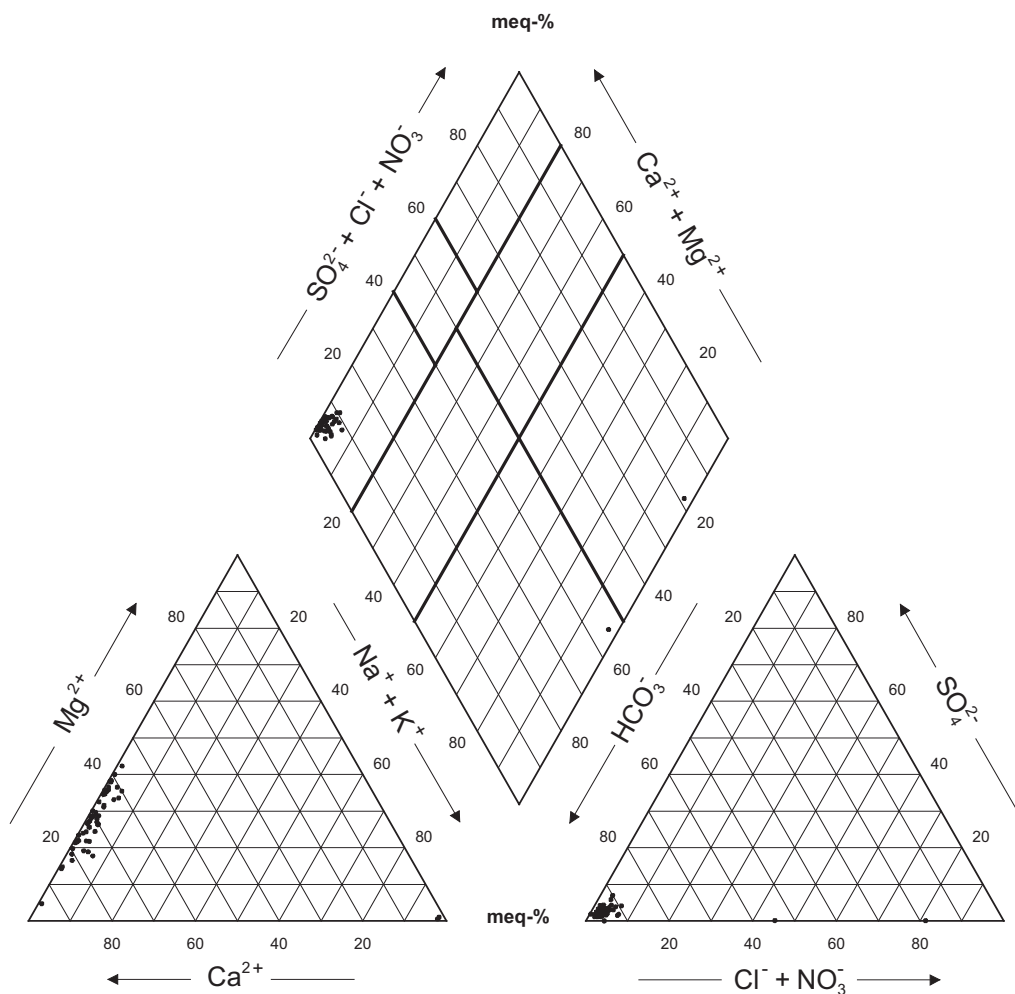


Abb. 3.6.1-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus der Faltenmolasse im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (60 Probenahmestellen)

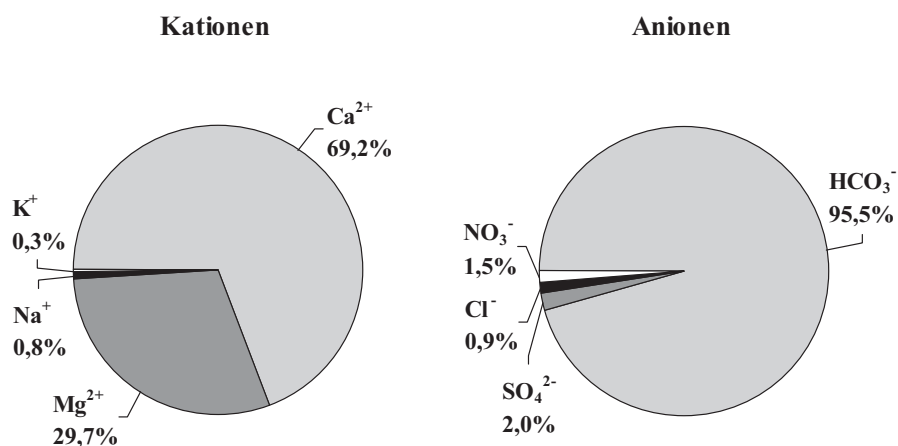


Abb. 3.6.1-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus der Faltenmolasse

karbonatgehalte (Median: 326 mg/l) und der daraus errechneten hohen Karbonathärte (Median: ca. 15°dH) lassen sich die Wässer aus der Faltenmolasse deutlich von den übrigen alpinen Wässern unterscheiden. Der pH-Wert ist mit einem Medianwert von 7,4 zwar durchwegs im neutralen bis leicht alkalischen Bereich, aber deutlich unter dem Durchschnitt der übrigen alpinen Wässer. Dies resultiert letztlich aus den innerhalb der Gruppe der alpinen Wässer auffallend hohen Gehalten an freier Kohlensäure (80% der Wässer zwischen 8 und 54 mg/l). Der Sättigungsindex bezüglich Calciumkarbonat beträgt im Median -0,5, was annähernd Gleichgewichtsbedingungen entspricht. Der Sauerstoffgehalt (Median: 7,7 mg/l) und damit auch die relative Sauerstoffsättigung (Median: 75%) sind vergleichsweise variabel und liegen allgemein unter dem Durchschnitt der übrigen alpinen Wässer. Der Lösungsinhalt an Eisen und Mangan ist mit Medianwerten unter den jeweiligen Bestimmungs- bzw. Nachweisgrenzen unbedeutend.

Hinsichtlich der Spurenelementgehalte in den Wässern aus der Faltenmolasse finden sich mit Gehalten im Median von über 10 µg/l lediglich Strontium und Barium, mit Konzentrationen über 1 µg/l Zink und Lithium. Im Vergleich zu den Wässern aus der Vorlandmolasse fallen die signifikant niedrigeren Gehalte an Silicium, Aluminium, Arsen, Bor, Cäsium, Lithium, Molybdän und Titan auf. Im Vergleich zu den Wässern aus den anderen alpinen Einheiten sind die Gehalte an Kupfer, Uran, Vanadium und Yttrium erhöht.

3.6.2 Helvetikum

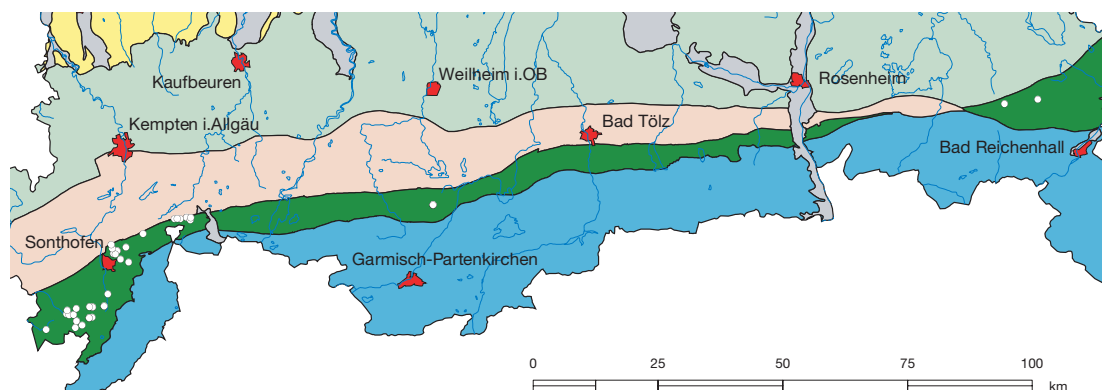


Abb. 3.6.2-1: Lage der 33 Probenahmepunkte aus dem Helvetikum

Die hydrogeologische Einheit Helvetikum ist nur im Allgäu flächig aufgeschlossen und erstreckt sich von dort als nur mehr schmaler, teilweise unterbrochener, landschaftlich kaum hervortretender Streifen parallel dem Alpenrand nach E hin bis in den Salzburger Raum. Die Hauptgesteine des Helvetikums sind Kalk- und Mergelsteine mit abschnittsweiser Einschaltung teils Glaukonit und Phosphorit führender Schluffsteine sowie von Sandsteinen. Im Zuge der Auffaltung der Alpen wurde das Helvetikum vom Südrand der Europäischen Platte abgesichert und zusammen mit dem Flysch (vgl. Kap. 3.6.3) als intern verfaltete und verschuppte Deckeneinheit dem Alpenkörper angegliedert. Nach Norden ist das Helvetikum in der Regel durch die Faltenmolasse

bzw. Vorlandmolasse begrenzt, im Allgäuer Raum teilweise auch durch den Flysch. Nach Süden wird die Grenze durch den Flysch gebildet, bereichsweise aber auch durch Einheiten der Nördlichen Kalkalpen. Am Talgrund sowie in den talnahen Bereichen der Bergflanken werden die Gesteine des Helvetikums meist von quartärem Moränenmaterial (vgl. Kap. 3.5.2) und fluvioglazialen Schottern (vgl. Kap. 3.5.1) überlagert.

Aufgrund der geringen wasserwirtschaftlichen Nutzung ist der Kenntnisstand zu den hydrogeologischen Verhältnissen im Bereich des Helvetikums gering. Im Wesentlichen handelt es sich um einen Festgesteins-Kluft-Grundwasserleiter. Je nach lokalen Gegebenheiten herrschen auch die Eigenschaften eines Karst-Kluft-Grundwasserleiters (z.B. Schrattenkalk, Seewer Kalk) bzw. eines Poren-Grundwasserleiters (z.B. Kieselkalk) vor. Entsprechend variabel sind die Durchlässigkeiten, die je nach lokaler Ausbildung von mittel bis äußerst gering reichen, sowie die gesteinschemischen Eigenschaften, die je nach Gesteinstyp karbonatisch (z.B. Seewer Kalk, Schrattenkalk), silikatisch (z.B. Grünsandsteine) und gemischt karbonatisch/silikatisch sind (z.B. Drusberg Schichten). Wässer aus dem Helvetikum werden, abgesehen von einigen kommunalen Wasserversorgern im Allgäu, nur vereinzelt in Form gefasster Quellen zur privaten Eigenwasserversorgung genutzt.

Die Grundwasservorkommen im Helvetikum sind aufgrund der bereichsweisen Ausbildung als Karst-Grundwasserleiter, wegen der allgemein geringen Flurabstände und aufgrund der meist fehlenden Überdeckung durch bindige Horizonte als potenziell sehr verschmutzungsempfindlich anzusehen. Der Gefährungsgrad ist jedoch nutzungsspezifisch als gering einzustufen und wird zudem noch durch die hohe Grundwasserneubildungsrate vermindert.

Von den Grundwässern aus dem Helvetikum liegen Analysenergebnisse aus 33 Probenahmestellen mit 28 Vollanalysen vor (vgl. Abb. 3.6.2-1).

Die Wässer aus dem Helvetikum sind bezüglich ihrer Hauptinhaltsstoffe durch das Überwiegen von Calcium (Median: 61 mg/l, entsprechend 91 meq-% der Hauptkationen) und Hydrogencarbonat (Median: 189 mg/l, entsprechend 93 meq-% der Hauptanionen) gekennzeichnet (Abb. 3.6.2-2 und Abb. 3.6.2-3). Untergeordnet treten noch Magnesium (80% der Wässer zwischen 1,1 und 13 mg/l) und Sulfat (80% der Wässer zwischen 3,0 und 16,8 mg/l) auf, während die Alkalimetalle Natrium und Kalium sowie die Anionen Chlorid und Nitrat ohne Bedeutung sind. Entsprechend kleinräumig begrenzt ist auch die Lage der Analysenergebnisse im klassifikatorischen Vierstoff-Diagramm von FURTAK & LANGGUTH (1967), demzufolge die Wässer aus dem Helvetikum durchgehend als „normal erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer“ zu klassifizieren sind.

Die berechnete Gesamtmineralisation (80% der Wässer zwischen 185 und 454 mg/l) und damit auch die spezifische elektrische Leitfähigkeit (80% der Wässer zwischen 22 und 48 mS/m) liegen, wie auch bei den meisten anderen alpinen Wässern, unter dem Durchschnitt aller Wässer. Die Gesamthärte ist ebenfalls relativ gering; sie liegt für 80% aller Wässer zwischen 6,4°dH und 14,4°dH und entspricht somit den Härtestufen „weich“ bis „etwas hart“ bzw. den Härtebereichen 1 bis 3 nach Waschmittelgesetz. Die Karbonathärte (80% der Wässer zwischen 5,8 und 14,5°dH) ist, wie auch für die anderen alpinen Wässer mit Ausnahme der Faltenmolasse zutreffend, relativ niedrig. Der pH-Wert der Wässer aus dem Helvetikum ist mit einer Spannbreite

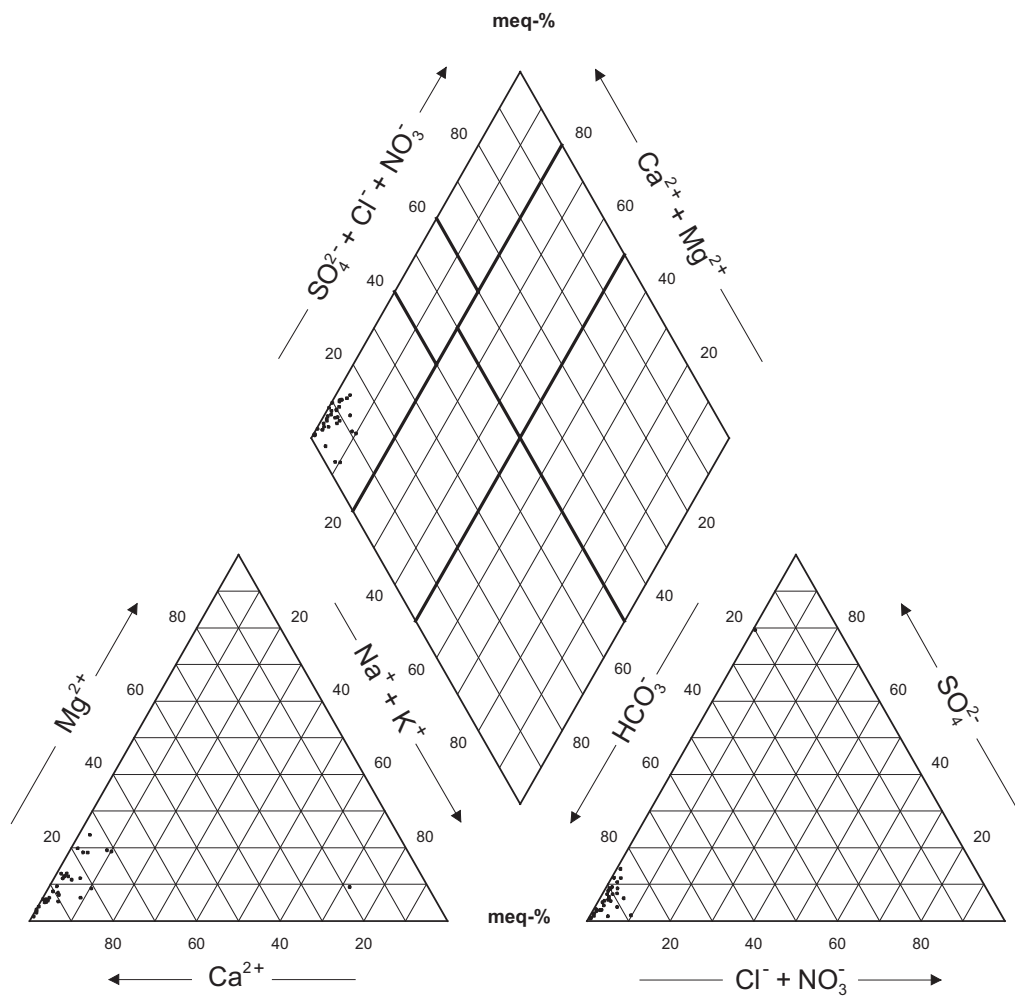


Abb. 3.6.2-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Helvetikum im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (33 Probenahmestellen)

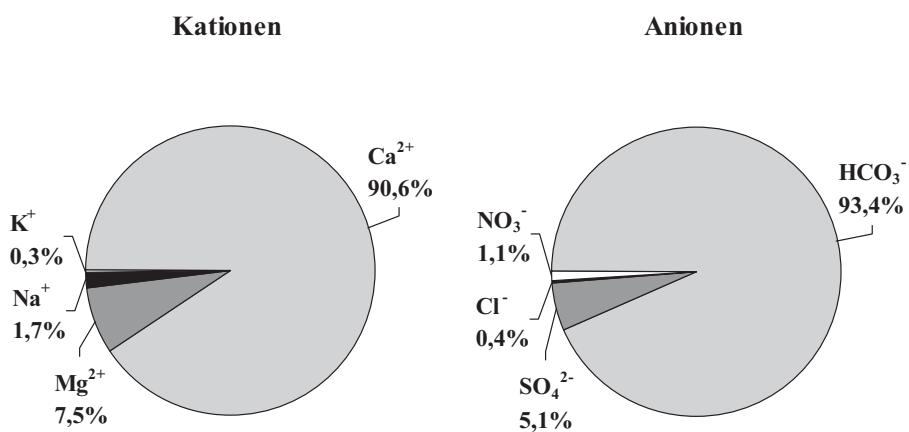


Abb. 3.6.2-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Helvetikum

von 80% der Wässer zwischen pH 7,4 und pH 7,9 durchwegs im leicht alkalischen Milieu. Entsprechend moderat ist mit einem Medianwert von 7,9 mg/l der Gehalt an freier Kohlensäure. Der Sättigungsindex bezüglich Calciumkarbonat um Null weist auf ein überwiegendes Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht der Wässer hin. Der Sauerstoffgehalt (Median: 8,9 mg/l) und damit auch die relative Sauerstoffsättigung (Median: 85%) sind für die überwiegend oberflächennahen Quellwässer generell hoch und variieren nur in engen Grenzen. Der Lösungsinhalt an Eisen und Mangan ist mit Medianwerten unter den jeweiligen Bestimmungs- bzw. Nachweisgrenzen ohne Bedeutung.

Die Spurenelementgehalte in den Wässern aus dem Helvetikum entsprechen in groben Zügen, wie schon die Hauptelemente und sonstigen Leitparameter, denen der räumlich eng vergesellschafteten Flyschwässer (Kap. 3.6.3). Mit Gehalten im Median von über 10 µg/l finden sich nur Strontium und Barium, mit Konzentrationen über 1 µg/l Zink und Lithium. Unterschiede zu den Flyschwässern zeigen sich hinsichtlich der Elemente Bor, Barium, und Silicium sowie Cer, Cobalt, Lanthan, Nickel und Vanadium. Hierbei sind die Elementkonzentrationen der erstgenannten Gruppe in den Flyschwässern erhöht, wohingegen die Elementgehalte der zweitgenannten Gruppe in den Helvetikumwässern höher liegen. Im Vergleich zu den Wässern aus den anderen alpinen Einheiten sind relativ erhöhte Gehalte an Cer, Cobalt und Lanthan festzustellen.

3.6.3 Flysch

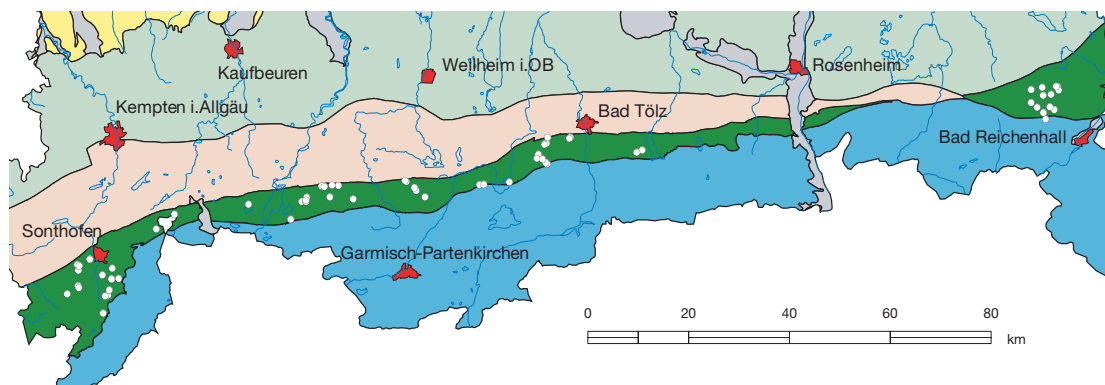


Abb. 3.6.3-1: Lage der 64 Probenahmepunkte aus dem Flysch

Die hydrogeologische Einheit Flysch steht hier als Synonym für den Rhenodanubischen Flysch, der sich als tektonisches Großbauelement entlang der Nordfront der gesamten Ostalpen vom Vorarlberger/Allgäuer Raum bis in den Salzburger Raum und darüber hinaus verfolgen lässt. Die Hauptgesteine der größtenteils monotonen, ursprünglich im Mittel rund 2 km mächtigen Schichtfolge des Flyschs sind wechselnd karbonatisch-siliziklastische, z.T. auch kieselige Abfolgen von Sand-, Schluff-, Mergel- und Tonsteinen mit nur wenigen Abschnitten konglomeratisch-brekziöser Einschaltungen. Im Zuge der Auffaltung der Alpen wurde der Flysch gegen das Oligozän unter Abscherung und Angliederung der Helvetikum-Decken (vgl. Kap. 3.6.2) dem europäischen Schelf aufgeschoben und als intern verfaltete und verschuppte Deckeneinheit dem Alpenkörper angegliedert. Nach Norden zu ist der in seiner N-S-Erstreckung bis über 5 km breite Flysch i.A. durch das Helvetikum bzw. durch die Faltenmolasse begrenzt. Nach Süden zu

wird die Grenze durch Einheiten der Nördlichen Kalkalpen gebildet. Im talnahen Bereich der Bergflanken sowie am Talgrund selbst werden die Gesteine des Flyschs meist von quartärem Moränenmaterial (vgl. Kap. 3.5.2) und fluvioglazialen Schottern (vgl. Kap. 3.5.1) überlagert.

Aufgrund der geringen wasserwirtschaftlichen Nutzung ist der Kenntnisstand zu den hydrogeologischen Verhältnissen im Bereich des Flyschs gering. Im Wesentlichen handelt es sich um einen Festgesteins-Kluft-Grundwasserleiter. Die Durchlässigkeiten variieren je nach Lithologie und lokaler Ausbildung zwischen gering und sehr gering, die gesteinschemischen Eigenschaften zwischen karbonatisch (z.B. Ofterschwanger Schichten), silikatisch (z.B. Reiselsberger Sandstein) und gemischt karbonatisch/silikatisch (z.B. Zementmergel-Serie, Tristel-Schichten). Die Wässer aus dem Flysch werden überwiegend in Form gefasster Quellen zur privaten Eigenwasserversorgung genutzt.

Das Grundwasser im Flysch ist aufgrund der allgemein geringen Flurabstände und wegen des Fehlens einer Überdeckung mit bindigen Horizonten als potenziell sehr verschmutzungsempfindlich anzusehen. Der Gefährungsgrad ist jedoch nutzungsspezifisch als gering einzustufen und wird zudem noch durch die hohe Grundwasserneubildungsrate vermindert.

Von den Grundwässern aus dem Flysch liegen Analysenergebnisse aus 64 Probenahmestellen mit 47 Vollanalysen vor (vgl. Abb. 3.6.3-1).

Die Wässer aus dem Flysch sind in ihrer physiko-chemischen Beschaffenheit denen aus dem Helvetikum sehr ähnlich (vgl. Kap. 3.6.2). Auffällig hinsichtlich der Hauptinhaltsstoffe ist wiederum das deutliche Überwiegen von Calcium (Median: 58 mg/l, entsprechend 85 meq-% der Hauptkationen) und Hydrogenkarbonat (Median: 189 mg/l, entsprechend 91 meq-% der Hauptanionen) (Abb. 3.6.3-3), wobei Magnesium mit Konzentrationen von 80% aller Wässer zwischen 2,4 und 13 mg/l eine größere Bandbreite zeigt, als im Helvetikum (Abb. 3.6.3-2). Auch bezüglich der Alkalien sowie der Anionen Chlorid und Nitrat sind im Vergleich zu den Helvetikumwässern systematisch geringfügig, aber nicht signifikant, erhöhte Werte festzustellen. Die Gehalte an Natrium und Kalium sind ebenso wie die Gehalte an Chlorid und Nitrat gering. Im klassifikatorischen Vierstoff-Diagramm von FURTA & LANGGUTH (1967) (Abb. 3.6.3-2) liegen die Analysenergebnisse entsprechend der geringen Variation der Hauptanionen- und -kationenverhältnisse als scharf begrenzte Punktwolke im Feld der „normal erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen Wässer“.

Der Mineralisierungsgrad der Flyschwässer ist wenig variabel und allgemein relativ gering. Die Gesamtmineralisation liegt für 80% der Wässer zwischen 183 und 370 mg/l, die spezifische elektrische Leitfähigkeit zwischen 23 und 42 mS/m. Die Gesamthärte beträgt für 80% aller Wässer zwischen 5,9°dH und 12,3°dH und entspricht somit den Härtestufen „weich“ bis „mittelhart“ bzw. dem Härtebereich 2 nach Waschmittelgesetz. Die Karbonathärte bewegt sich für 80% der Wässer zwischen 5,7 und 12°dH.

Der pH-Wert befindet sich mit einer Bandbreite von 80% der Wässer zwischen pH 7,4 und pH 8,0 durchwegs im leicht alkalischen Milieu. Entsprechend moderat ist auch mit einem Medianwert von 5,3 mg/l der Gehalt an freier Kohlensäure. Der Sättigungsindex bezüglich Calciumkarbonat um Null weist auf bestehende Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichte in den Wässern hin.

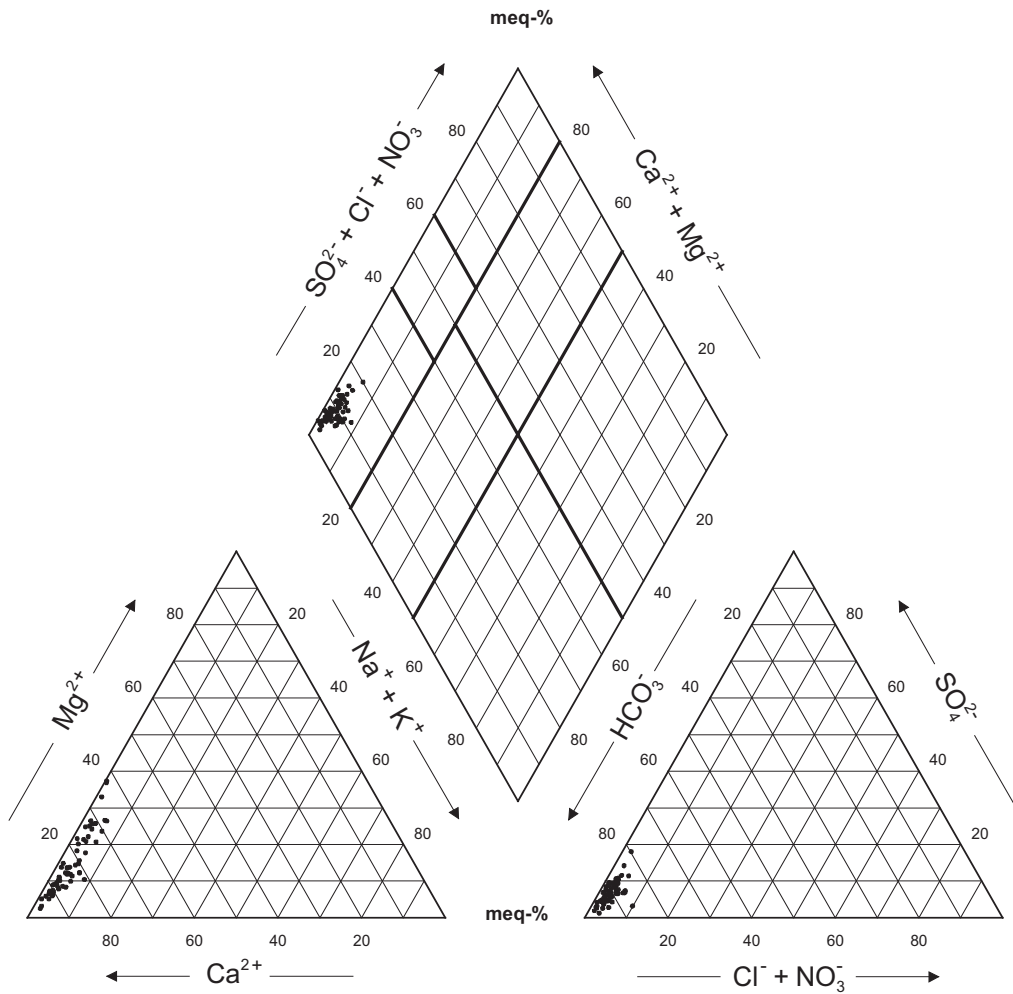


Abb. 3.6.3-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Flysch im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (61 Probenahmestellen)

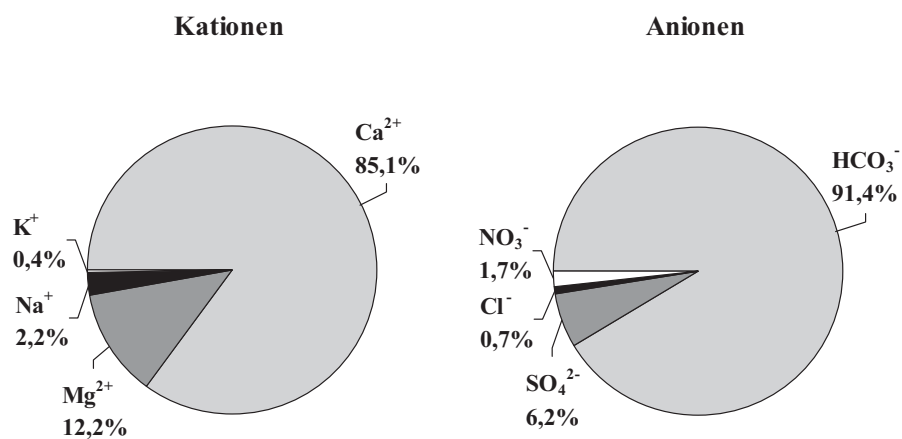


Abb. 3.6.3-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus dem Flysch

Der Sauerstoffgehalt (Median: 10 mg/l) und damit auch die relative Sauerstoffsättigung (Median: 90%) der vorwiegend oberflächennahen Quellwässer variieren nur in engen Grenzen und zeigen unter allen untersuchten Einheiten die höchsten Werte. Der Lösungsinhalt an Eisen und Mangan liegt überwiegend unter den jeweiligen Bestimmungs- bzw. Nachweisgrenzen und ist somit vernachlässigbar gering.

Die Spurenelementgehalte in den Wässern aus dem Flysch entsprechen denen der räumlich eng vergesellschafteten Helvetikumwässer (Kap. 3.6.2). Mit Gehalten im Median von über 10 µg/l finden sich nur Strontium und Barium, mit Konzentrationen über 1 µg/l Bor, Lithium und Zink. Im Vergleich zu den Wässern aus den anderen alpinen Einheiten sind relativ erhöhte Gehalte an Silicium, Bor, Barium und Lithium festzustellen sowie relativ geringere Gehalte an Aluminium, Arsen, Cadmium, Quecksilber, Nickel, Blei und Vanadium.

3.6.4 Kalkalpen in vorwiegend karbonatischer Fazies

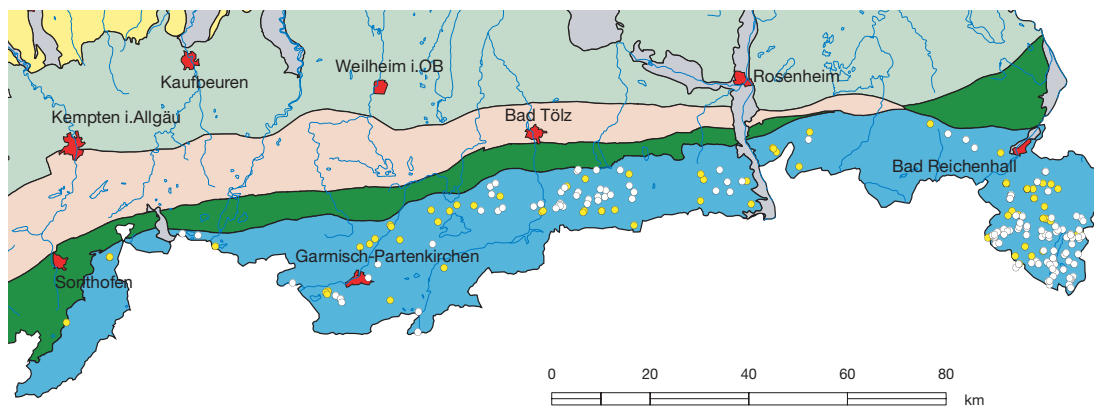


Abb. 3.6.4-1: Lage der Probenahmepunkte aus den Kalkalpen in vorwiegend kalkiger Fazies (weiße Punkte, n = 139) und aus den Kalkalpen in vorwiegend dolomitischer Fazies (gelbe Punkte, n = 70)

Die Nördlichen Kalkalpen sind eine rund 30 – 40 km breite, WSW-ENE-streichende, tektonisch-fazielle Großbaueinheit innerhalb des Oberostalpins am nördlichen Rand der Alpen. Im Zuge der alpidischen Orogenese wurden die Alpen als Falten- und Deckengebirge der Europäischen Platte aufgeschoben. So kommt es, dass die alpidisch ältesten Gesteine heute als oberstes tektonisches Stockwerk über den alpidisch jüngeren Einheiten zu liegen kommen und die triassischen Gesteine wie Wettersteinkalk und -dolomit, Hauptdolomit sowie Dachsteinkalk die Hauptgipfelbildner im Bereich der Nördlichen Alpen sind. Im Norden sind die Kalkalpen tektonisch zum Flysch abgegrenzt. Die südliche Grenze befindet sich bereits in Österreich.

In diesem Kapitel werden die Grundwasserleiter aus überwiegend Kalksteinen (Kalkalpen in vorwiegend kalkiger Fazies) und vorwiegend Dolomitsteinen (Kalkalpen in vorwiegend dolomitischer Fazies) gemeinsam beschrieben.

Bei den Gesteinen der Kalkalpen in karbonatischer Fazies handelt es sich im Wesentlichen um Festgesteins-Kluft- und Kluft-Karst-Grundwasserleiter. Aufgrund der Morphologie können oft ganze Einheiten grundwasserfrei bzw. nur episodisch Grundwasser führend sein. Die Grundwasserergiebigkeit wird wesentlich durch die tektonische Beanspruchung der Gesteine gesteuert.

Die Grundwasservorkommen in den kalkalpinen Festgesteinen werden wegen der schwierigen Erschließbarkeit in der Regel nur in Form von gefassten Quellen zur privaten Eigenwasserversorgung genutzt. In den talnahen Bereichen der Bergflanken und am Grund der oft übertieften Täler werden die Gesteine der Kalkalpen meist von quartärem Moränenmaterial (vgl. Kap. 3.5.2) und fluvioglazialen Schottern (vgl. Kap. 3.5.1) überlagert. Aufgrund der bereichsweisen Verkarstung und wegen des weitgehenden Fehlens von Deckschichten ist das Grundwasser, je nach Tiefenlage des betrachteten Stockwerks, als potenziell sehr verschmutzungsempfindlich anzusehen. Der Gefährungsgrad ist jedoch nutzungsspezifisch als gering einzustufen und wird zudem noch durch die hohe Grundwasserneubildungsrate vermindert.

Von den Grundwässern aus der Einheit Kalkalpen in vorwiegend kalkiger Fazies liegen Analysenergebnisse aus 139 Probenahmepunkten mit 121 Vollanalysen vor, aus der Einheit Kalkalpen in vorwiegend dolomitischen Fazies Analysenergebnisse aus 70 Probenahmestellen mit 43 Vollanalysen. Einen Überblick zur Lage der Probenahmepunkte gibt die Abb. 3.6.4-1.

Hinsichtlich der Hauptinhaltsstoffe zeigen die Wässer sowohl aus der vorwiegend kalkigen als auch aus der vorwiegend dolomitischen Fazies der Kalkalpen große Ähnlichkeiten. Wie schon bei den anderen alpinen Wässern fällt bei den Anionen die nahezu alleinige Vorherrschaft von Hydrogenkarbonat auf (Abb. 3.6.4-3 und Abb. 3.6.4-5). Die weiteren Hauptanionen zeigen generell sehr niedrige Konzentrationen. Gleichermäßen gering sind die Gehalte an Sulfat, wobei die vergleichsweise höheren Gehalte der Wässer aus der dolomitischen Fazies möglicherweise im Zusammenhang mit einer primären Gipsführung, oder aber im Zusammenhang mit der räumlich-stratigrafischen Nähe der Dolomite zu Gips führenden Grundwasserleitern (z.B. Hauptdolomit – Raibler Schichten) stehen. Unter den Hauptkationen dominiert in den Wässern der kalkigen Fazies Calcium (Median: 42,9 mg/l, entsprechend 84 meq-% der Hauptkationen) deutlich über Magnesium (Median: 4,8 mg/l, entsprechend 16 meq-% der Hauptkationen); in den Wässern der dolomitischen Fazies herrschen erwartungsgemäß annähernd ausgeglichene Calcium/Magnesium-Verhältnisse (Median Calcium: 40,5 mg/l, entsprechend 58 meq-% der Hauptkationen; Median Magnesium: 17,3 mg/l, entsprechend 41 meq-% der Hauptkationen) (Abb. 3.6.4-3 und Abb. 3.6.4-5). Die Gehalte an Alkalimetallen sind in beiden hydrogeologischen Einheiten vernachlässigbar gering. Entsprechend ist auch die Lage der Wässer aus der karbonatischen Fazies der Kalkalpen in den Kationen- bzw. Anionendreiecken der Piper-Diagramme (Abb. 3.6.4-2 und Abb. 3.6.4-4) aufgereiht entlang der Calcium-Magnesium-Linie und dicht gedrängt im Eck des Hydrogenkarbonats. Im klassifikatorischen Vierstoff-Diagramm von FURTAK & LANGGUTH (1967) (Abb. 3.6.4-3 und Abb. 3.6.4-5) liegen die Analysenergebnisse allesamt im Feld der „erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen Wässer“.

Auch die analytischen Leitparameter zeigen in den Wässern aus der vorwiegend kalkigen und der vorwiegend dolomitischen Fazies große Ähnlichkeiten. Der Mineralisierungsgrad ist allgemein eher gering und unter dem Durchschnitt aller untersuchten Wässer. Die Gesamtminerali-

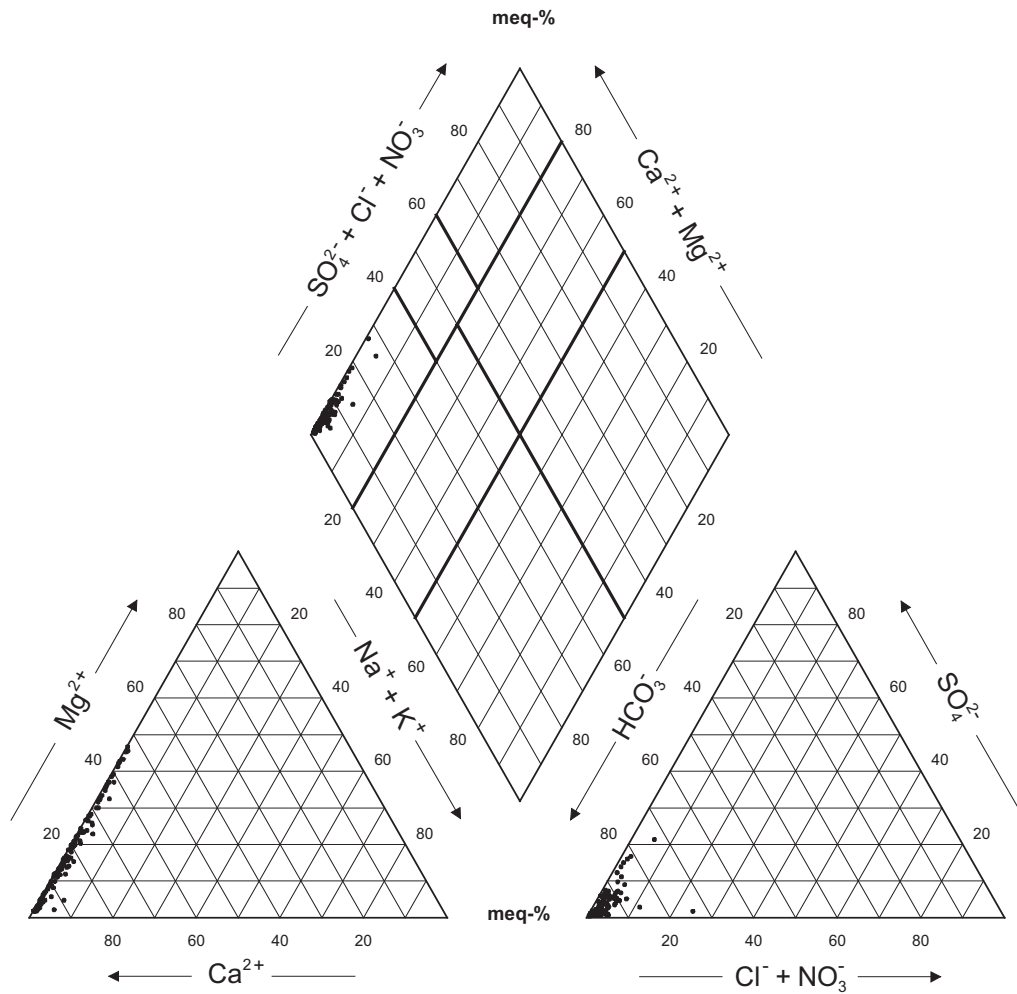


Abb. 3.6.4-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus den Kalkalpen in vorwiegend kalkiger Fazies im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (139 Probenahme-stellen)

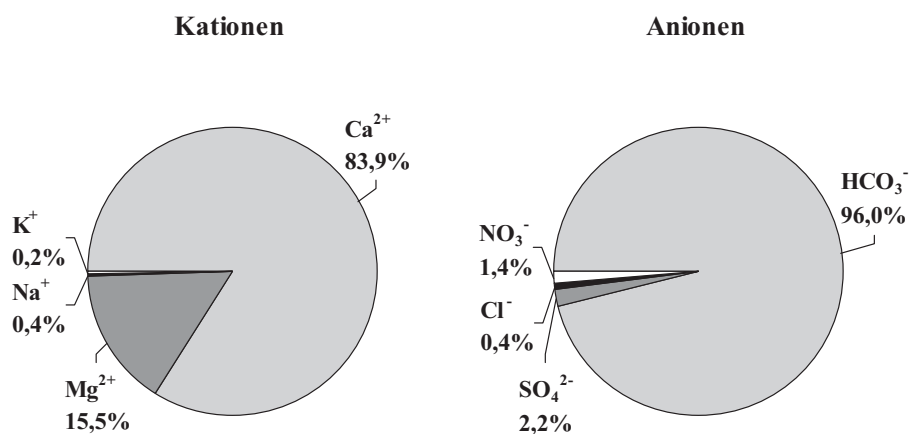


Abb. 3.6.4-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus den Kalkalpen in vorwiegend kalkiger Fazies

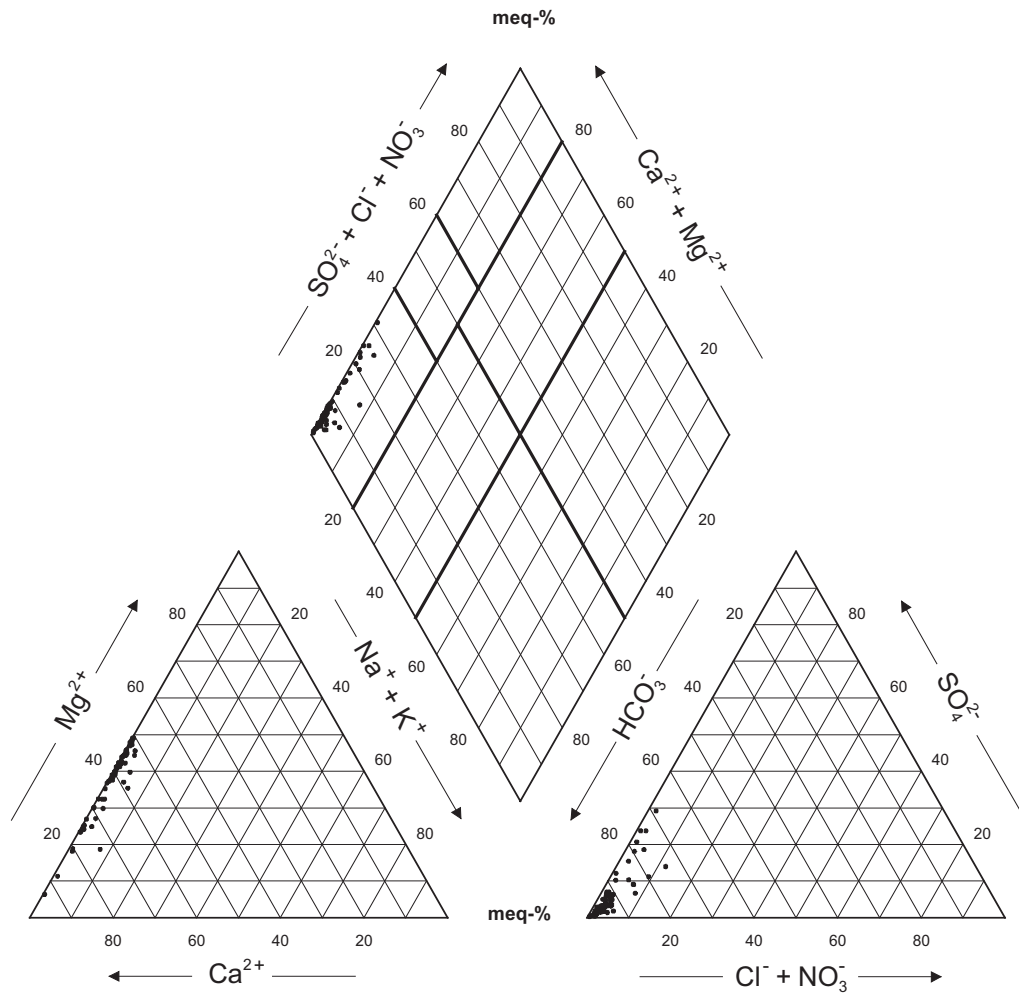


Abb. 3.6.4-4: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus den Kalkalpen in vorwiegend dolomitischer Fazies im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (69 Probenahmestellen)

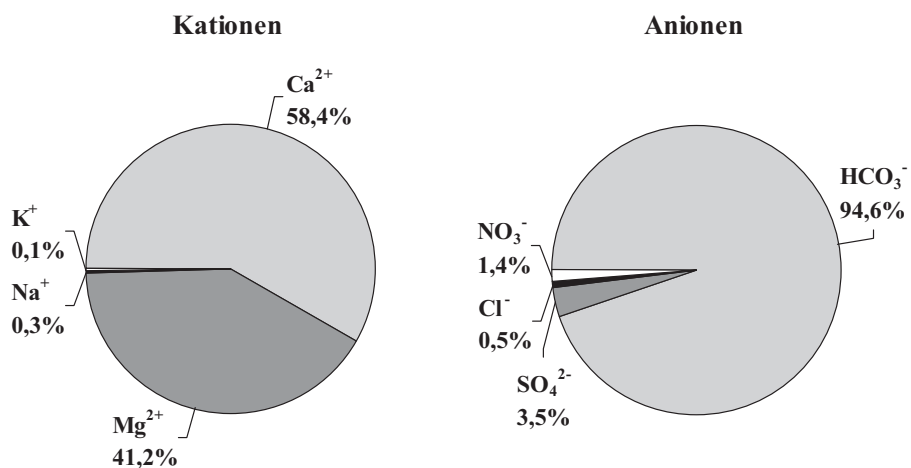


Abb. 3.6.4-5: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus den Kalkalpen in vorwiegend dolomitischer Fazies

sation beträgt im Median 211 mg/l für die Wässer der kalkigen Fazies und 264 mg/l für die Wässer der dolomitischen Fazies, die spezifische elektrische Leitfähigkeit rund 30 bzw. 32 mS/m. Ebenso liegt die Gesamthärte im unteren Bereich. Sie variiert im Fall der Wässer der kalkigen Fazies für 80% aller Proben zwischen 4,3 und 10,6°dH, was den Härtestufen „weich“ bis „mittelhart“ bzw. den Härtebereichen 1 und 2 nach Waschmittelgesetz entspricht. Die Wässer der dolomitischen Fazies sind geringfügig härter. Hier liegen 80% aller Analysen zwischen 6,5 und 13°dH, entsprechend den Härtestufen „weich“ bis „etwas hart“ bzw. den Härtebereichen 1 und 2 nach Waschmittelgesetz. Während bei den Wässern der kalkigen Fazies die Gesamthärte im Wesentlichen der Karbonathärte (Median: 7,3°dH) entspricht, zeigt sich in den Wässern der dolomitischen Fazies eine Abweichung von rund 10% zwischen der Gesamt- und der Karbonathärte (Median: 8,9°dH), die auf den bereits oben erwähnten höheren Sulfatgehalt in diesen Wässern zurückzuführen ist.

Die pH-Werte sind speziell in den Wässern aus der kalkigen Fazies die im Mittel höchsten aller untersuchten Wässer (80% aller Proben zwischen 7,6 und 8,5), die pH-Werte der Wässer aus der dolomitischen Fazies die zweithöchsten (zwischen 7,4 und 8,3) und liegen somit generell im schwach alkalischen Bereich. Der Sättigungsindex bezüglich Calciumkarbonat beträgt für beide Wassertypen rund -0,5, was auf annähernd gesättigte Verhältnisse hinweist. Die Sauerstoffgehalte (Medianwert kalkige Fazies: 9,7 mg/l, Medianwert dolomitische Fazies: 9,0 mg/l) bzw. die relative Sauerstoffsättigung (Median: 88% bzw. 84%) beider Wassertypen sind im Vergleich zu den anderen untersuchten Wässern mit die höchsten und zeigen bei einer allgemein geringen Streubreite das allgemeine Überwiegen des oxidierten Wassertypus. Die gemessenen Eisen- und Mangangehalte sind ausgesprochen gering und liegen in beiden Einheiten im Median unter den jeweiligen Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenzen.

Während die Gehalte an Spurenelementen der Wässer aus der vorwiegend kalkigen und vorwiegend dolomitischen Fazies der Kalkalpen untereinander große Ähnlichkeiten zeigen, unterscheiden sie sich relativ deutlich sowohl von den übrigen Wässern aus dem alpinen Raum (Ausnahme: Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies), als auch von den sonstigen Wässern des außer-alpinen Raums. Mit Gehalten im Median von über 10 µg/l findet sich sowohl in der kalkigen Fazies als auch der dolomitischen Fazies lediglich Strontium, mit Konzentrationen über 1 µg/l Barium, Aluminium, Bor und Zink. Mit wenigen Ausnahmen auffällig erhöht gegenüber den Spurenelementgehalten der sonstigen Wässer sind die Konzentrationen der Elemente Aluminium, Quecksilber und vor allem Antimon. Meist vergleichsweise niedrig gegenüber den Spurenelementgehalten in den außer-alpinen Wässern sind die Konzentrationen der Elemente Barium, Lithium, Rubidium, Strontium, Titan sowie mit Einschränkungen auch Cobalt und Cäsium; gegenüber den übrigen alpinen Wässern zusätzlich noch Bor. Ferner auffällig sind die im Vergleich zu allen untersuchten Wässern niedrigsten Siliciumgehalte mit Medianwerten unter der Bestimmungsgrenze.

3.6.5 Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies

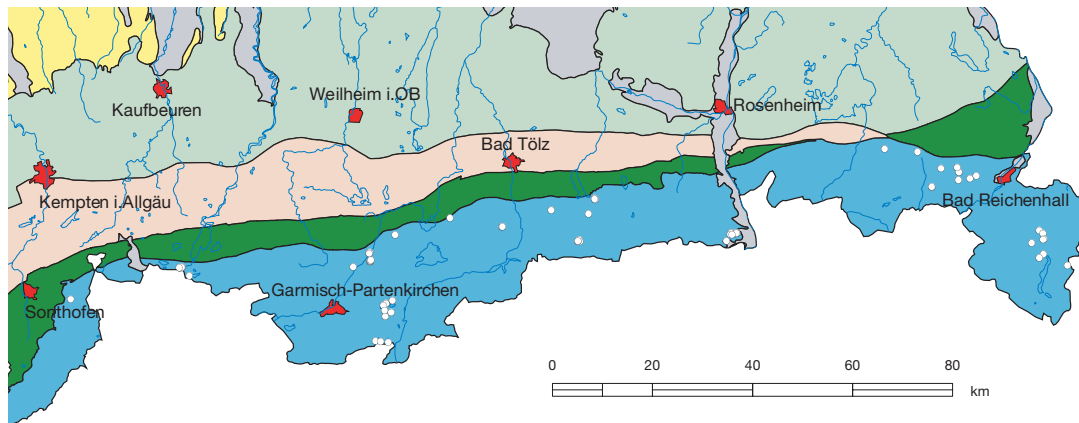


Abb. 3.6.5-1: Lage der 66 Probenahmepunkte aus den Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies

In der hydrogeologischen Einheit Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies sind im Wesentlichen die triassischen Gesteine der Raibler Schichten (Ton-, Sand- und Mergelstein; Kalk- und Dolomitstein, Rauwacke und Gips) und der Reichenhaller Schichten (Kalk- und Dolomitstein, Rauwacke, Gips) sowie das dem Permoskyth zugerechnete Haselgebirge (Salztone bzw. Salztongesteine mit Kernsalzzügen und Anhydritkomplexen sowie Rückstandstone mit Anhydritkomplexen im ausgelaugten Haselgebirge) zusammengefasst. Im Bereich des Mangfallgebirges wurden auch Proben von über Klüfte aufsteigenden „Raiblerwässern“ innerhalb des überlagernden Hauptdolomits gewonnen. Deutlich von Haselgebirge beeinflusste Wässer wurden in den östlichen Chiemgauer Alpen in drei Quellen in den Partnachschichten angetroffen. Bei den Raibler und Reichenhaller Schichten handelt es sich um Festgesteins-Kluft-Grundwasserleiter mit je nach Lithologie karbonatischem bis sulfatischem Gesteinschemismus. Die Durchlässigkeiten und damit auch die Grundwasserergiebigkeiten sind in der Regel gering bis äußerst gering. Je nach tektonischer Beanspruchung können lokal aber auch deutlich höhere Durchlässigkeiten angetroffen werden. Das Salz führende Haselgebirge weist eine extrem geringe Wasserdurchlässigkeit auf; die Rückstandstone des ausgelaugten Haselgebirges enthalten aber als Komponenten Anhydritkomplexe aus dem Haselgebirge sowie tektonisch eingebrachte Fremdgesteine, die infolge der Auflösung des Salzanteils stark aufgelockert wurden. Durch diese Auflockerungserscheinungen und durch Gipskarstbildung in den Anhydritkomplexen kann bereichsweise eine starke Wasserführung verursacht werden.

Von Raibler bzw. Reichenhaller Schichten oder vom Haselgebirge beeinflusste Grundwasservorkommen sind für die Trinkwassergewinnung ohne wesentliche Bedeutung. Gering mineralisierte Wässer dienen jedoch vereinzelt in Form gefasster Quellen der öffentlichen Trinkwasserversorgung und der privaten Eigenwasserversorgung von landwirtschaftlichen Anwesen und Almen. Höher mineralisierte Wässer werden seit alters her für balneologisch-medizinische Anwendungen genutzt; ebenso wurde und wird in Bad Reichenhall aus Solen aus dem Haselgebirge Salz gewonnen.

Wegen des weitgehenden Fehlens von bindigen Deckschichten ist das Grundwasser im Bereich der Kalkalpen, je nach Tiefenlage des betrachteten Stockwerks, als potenziell meist sehr verschmutzungsempfindlich anzusehen. Der Gefährungsgrad ist jedoch nutzungsspezifisch als gering einzustufen und wird zudem noch durch die hohe Grundwasserneubildungsrate vermindert.

Von den Grundwässern aus der Einheit Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies liegen Analysenergebnisse aus 66 Probenahmepunkten mit 35 Vollanalysen vor (vgl. Abb. 3.6.5-1). Als Hauptkationen finden sich in den Wässern aus der vorwiegend salinaren Fazies der Kalkalpen Calcium (80% der Wässer zwischen 46 und 258 mg/l) und Magnesium (80% der Wässer zwischen 8,8 und 64 mg/l) in vergleichsweise variablen Mengenverhältnissen von $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ im Bereich von 10 bis 1 (Abb. 3.6.5-2). Die Alkalimetalle Natrium und Kalium sind mit Mediangehalten von 0,8 bzw. 0,5 mg/l deutlich untergeordnet (Abb. 3.6.5-3). Jedoch finden sich hier bei drei haselgebirgsbeeinflussten Proben aus den Partnachsichten auch erhöhte Konzentrationen an Natrium (Abb. 3.6.5-2). Unter den Hauptanionen sind die Medianwerte der Hydrogenkarbonat- und Sulfatgehalte (57 bzw. 42 meq-%) ungefähr gleich (Abb. 3.6.5-3). Die Streubreite der $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ -Verhältnisse in den Einzelproben hingegen ist, wie schon bei den Hauptkationen, beträchtlich (Abb. 3.6.5-2). Die Hydrogenkarbonatgehalte variieren hierbei für 80% der Wässer lediglich zwischen 163 und 276 mg/l, die Sulfatgehalte jedoch zwischen 4,6 und 753 mg/l. Die Chlorid- und Nitratgehalte sind generell sehr niedrig. Nur in den drei haselgebirgsbeeinflussten Proben aus den Partnachsichten finden sich auch erhöhte Chloridgehalte. Im klassifikatorischen Vierstoff-Diagramm von FURTAK & LANGGUTH (1967) (Abb. 3.6.5-2) liegen die Analysen mit Ausnahme dieser drei Wasserproben in den Feldern der „normal erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen Wässer“ bis zu den „normal erdalkalischen, überwiegend sulfatischen Wässern“.

Unter den analytischen Leitparametern zeigen die Gesamtmineralisation und die korrespondierende spezifische elektrische Leitfähigkeit mit 80% aller Wässer zwischen 262 und 1296 mg/l bzw. 31 und 175 mS/m eine große Bandbreite mit allgemeiner Tendenz hin zu hohen Werten. Entsprechend verhält sich auch die Gesamthärte, die für 80% aller Wässer zwischen 9°dH und 53°dH, entsprechend den Härtestufen „mittelhart“ bis „sehr hart“ und den Härtebereichen 2 bis 4 nach Waschmittelgesetz schwankt. Deutlich geringer ist die Variationsbreite der Karbonathärte, die für 80% der Wässer zwischen 7,5 und 12,7°dH liegt.

Der pH-Wert beträgt für 80% der Wässer zwischen 7,2 und 8,0 und befindet sich somit durchwegs im neutralen bis leicht alkalischen Bereich. Der Sättigungsindex bezüglich Calciumkarbonat weist den höchsten Wert innerhalb der Gruppe der alpinen Wässer auf. Er beträgt im Median nur -0,3, was auf weitgehend gesättigte Verhältnisse schließen lässt. Die Sauerstoffgehalte (80% der Wässer zwischen 3,6 und 10 mg/l) bzw. die relative Sauerstoffsättigung (80% der Wässer zwischen 30 und 91 %) haben eine im Vergleich zu den anderen Wässern aus dem alpinen Raum höhere Variabilität und zeigen für einzelne Grundwasservorkommen voll reduzierte Bedingungen. Die gemessenen Eisen- und Mangangehalte sind trotzdem ausgesprochen gering und liegen, wie schon für die anderen alpinen Wässer, fast ausnahmslos unter den jeweiligen Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenzen.

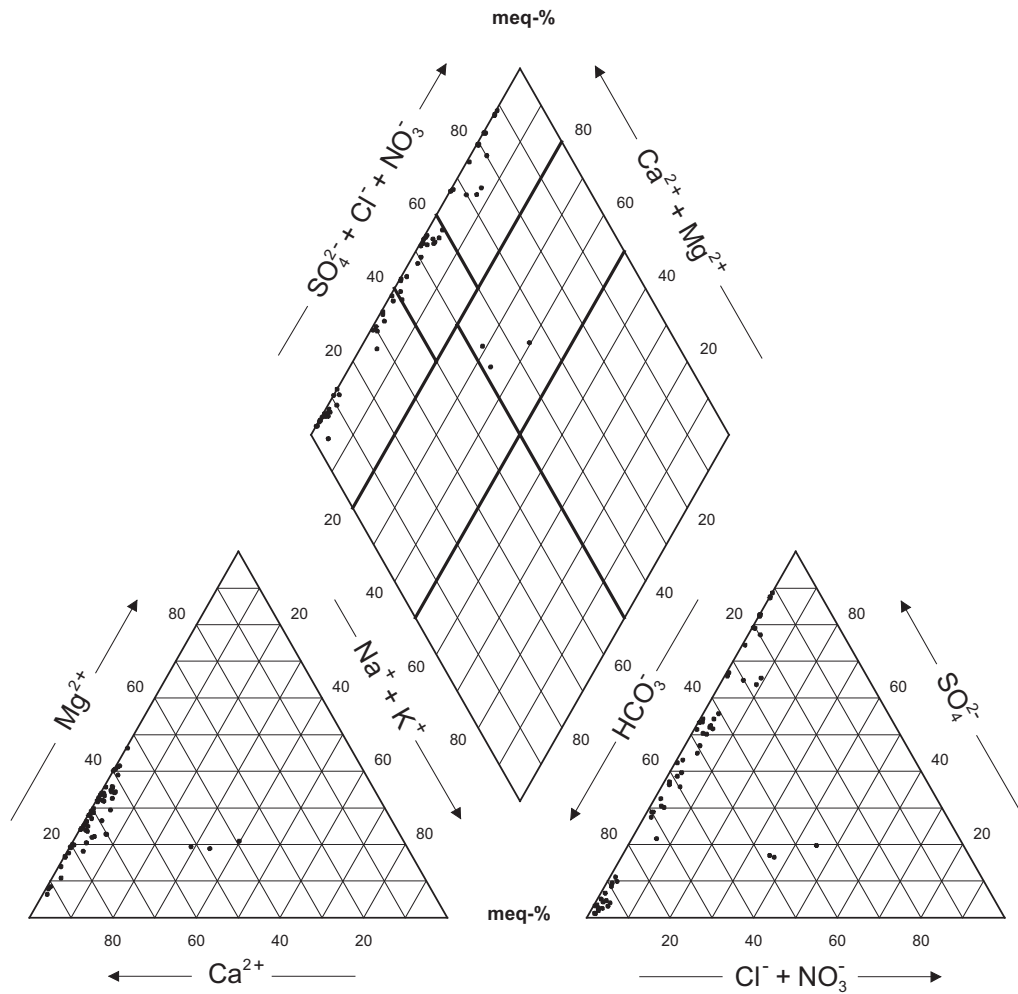


Abb. 3.6.5-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus den Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies im PIPER-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (64 Probenahmestellen)

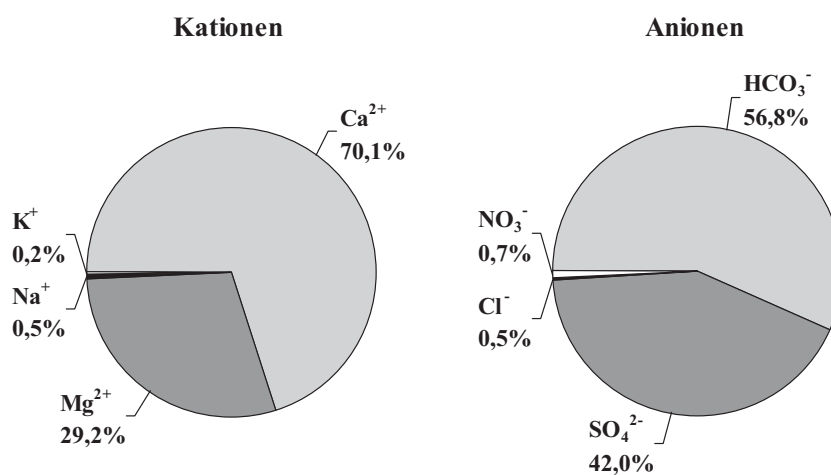


Abb. 3.6.5-3: Prozentuale Verteilung der Medianwerte (meq-%) der wichtigsten Kationen und Anionen der Grundwässer aus den Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies

Unter den Spurenelementen zeigen nur Strontium und Barium Mediangehalte über 10 µg/l. Mit Mediangehalten zwischen 1 und 10 µg/l finden sich in der Reihenfolge abnehmender Konzentration Zink, Bor, Lithium, Aluminium und Molybdän. Mit wenigen Ausnahmen auffällig erhöht gegenüber den Spurenelementgehalten der sonstigen Wässer sind die Konzentrationen der Elemente Silber, Antimon, Strontium und vor allem Molybdän. Gegenüber den übrigen Wässern aus dem alpinen Raum finden sich in vergleichsweise erhöhten Konzentrationen ferner die Elemente Arsen, Bor, Cäsium, Nickel, Uran und Zink. Wie die anderen Wässer aus dem alpinen Raum liegen die Siliciumgehalte auch hier deutlich unter dem Durchschnitt aller Grundwässer.

4 Parameter der Grundwasserbeschaffenheit

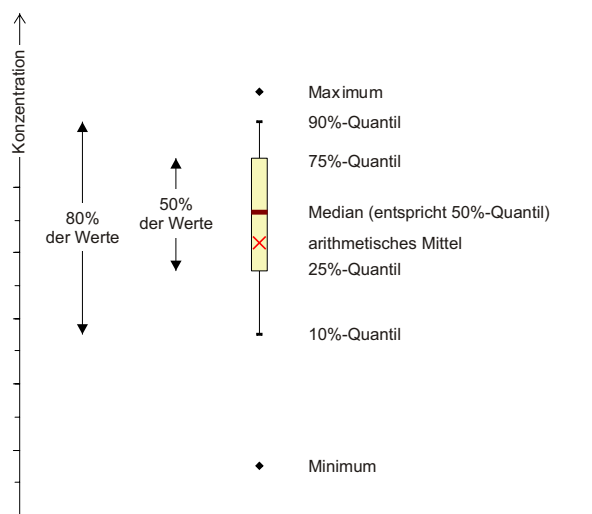


Abb. 4-1: Darstellung der statistischen Maßzahlen in den Spannweitendiagrammen im Anhang 2.

Im Folgenden werden die charakteristischen Werteverteilungen der untersuchten Parameter der Grundwasserbeschaffenheit in den unterschiedlichen hydrogeologischen Einheiten Bayerns beschrieben.

Im Anhang 2 sind die Verteilungen in Spannweitendiagrammen („Boxplots“) mit Signaturen nach HÖTZL, H. & WITTHÜSER, K. (1999) dargestellt (Erläuterung s. Abb. 4-1). Nicht weiter betrachtet werden wegen durchgehend sehr selten erfolgter Nachweise die routinemäßig gemessenen Elemente Bromid, Nitrit, Phosphat und Ammonium; die entsprechenden statistischen Maßzahlen dieser Inhaltsstoffe sind jedoch in den Tabellen

im Anhang 1 aufgelistet. Weitere Parameter, die direkt mit anderen Größen korreliert sind (z.B. Sauerstoffsättigung und Sauerstoffgehalt), sind nur an einer Stelle erläutert. Bei den Parametern F^- , Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ und TOC werden in den Tabellen von Anhang 1 sowie den Spannweitendiagrammen von Anhang 2 die numerischen Werte im Bereich zwischen der Nachweis- und der Bestimmungsgrenze (s. Kap. 2.2) angegeben. Dabei ist zu beachten, dass für diese Werte ein erhöhter Messfehler vorliegt (bis ca. 30%). Das Vorgehen wurde gewählt, da hierdurch zumindest qualitativ zusätzliche Informationen zu den Häufigkeitsverteilungen der Parameter in den unterschiedlichen hydrogeologischen Einheiten gewonnen werden konnten.

Wassertemperatur (Anhang 2-1)

80% aller gemessenen Temperaturen der Grundwässer Bayerns bewegen sich im Bereich von etwa 7 bis 12 °C. Diese Werte liegen im Schwankungsbereich des langjährigen Mittels der Umgebungstemperatur, die sich mit der mittleren Temperatur des Untergrunds im oberflächennahen Bereich deckt. Tiefengrundwässer weisen entsprechend dem geothermischen Tiefengradienten (in Bayern in der Regel ca. 3–4 °C pro 100 m Tiefe) je nach Tiefenlage entsprechend höhere Werte auf. Hierzu zählen insbesondere die Wässer des salinen Zechsteins, des überdeckten Malms und der tiefen Vorlandmolasse. Der hohe 90%-Quantil im überdeckten Malm (28,6 °C) deutet auf das geothermische Potential dieses ergiebigen Tiefengrundwasserleiters hin. Die Maximaltemperatur von 64,8 °C wurde dort in der Bohrung Altdorf bei Landshut gemessen – einer geothermischen Anomalie im überdeckten Malm mit einem Gradienten von ca. 12 °C/100 m (WROBEL et al. 2002). Die niedrigsten Wassertemperaturen werden erwartungsgemäß in den Alpen mit ihren Hochlagen gemessen.

pH-Wert (Anhang 2-2)

Der pH-Wert des Grundwassers ist mit entscheidend für die chemischen Gleichgewichtsreaktionen und die Löslichkeit vieler Stoffe im Wasser. Während Grundwasserleiter mit karbonatischem Gesteinschemismus neutral bis leicht alkalisch gepuffert sind, weisen silikatische Grundwasserleiter in der Regel pH-Werte im sauren Bereich auf. Da aufgrund der relativ guten Löslichkeit des Calciumkarbonats bereits geringe Kalkanteile im Grundwasserleiter ausreichen, um im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht gepufferte Grundwässer zu erhalten, weisen die meisten Wässer eine recht geringe Streuung der pH-Werte im neutralen bis leicht alkalischen Bereich auf. Lediglich die weitestgehend karbonatfreien Grundwasserleiter enthalten überwiegend saure Grundwässer. Hierzu zählt das Grundgebirge mit Ausnahme des Wunsiedler Marmorzugs, wobei hier erwartungsgemäß die Wässer aus dem Kristallin in saurer bis intermediärer Fazies die geringsten Werte aufweisen, sowie der salinare Zechstein, der Buntsandstein, die Trias der Bodenwöhrer Bucht, Bereiche der Kreide und das Braunkohlentertiär. Im Perm treten sowohl saure als auch alkalische Wässer auf.

Spezifische elektrische Leitfähigkeit (Anhang 2-3)

Die spezifische elektrische Leitfähigkeit wird durch den Mineralgehalt des Wassers bestimmt und ist daher mit der Gesamtmineralisation korreliert (Beschreibung s. Absatz Gesamtmineralisation). In der TrinkWV wird ein zulässiger Höchstwert der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit von 250 mS/m bei 20 °C vorgegeben.

Sauerstoffgehalt (Anhang 2-4)

Der Sauerstoffgehalt in mg/l ist direkt mit der Sauerstoffsättigung korreliert (Beschreibung s. Absatz Gesamtmineralisation).

Sauerstoffsättigung (Anhang 2-5)

Durch seinen das Redoxpotential steuernden Einfluss ist die Sauerstoffsättigung von großer Bedeutung für das Lösungspotential und die chemischen Gleichgewichte im Grundwasser. Junge und oberflächennahe Grundwässer sind auf Grund ihrer überwiegend atmosphärischen Beeinflussung in der Regel sauerstoffreich, während die (älteren) Tiefenwässer aufgrund meist biogener Sauerstoffzehrender Prozesse im Grundwasserleiter häufig sauerstoffarm bis sauerstofffrei sind. Dementsprechend weisen die Wässer aus dem überdeckten Malm und auch der tiefen Vorlandmolasse die geringsten Sauerstoffgehalte der betrachteten Wässer auf. Geringe Sauerstoffgehalte herrschen außerdem in den salinaren Wässern vor. Die sauerstoffarmen Wässer der Kreide, des Braunkohlentertiärs und der Quartärschotter sind auf organische Anteile im Gestein zurückzuführen, die eine Sauerstoffzehrung begünstigen.

Freie Kohlensäure (CO₂frei) (Anhang 2-6)

Die freie Kohlensäure im Grundwasser steuert über das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht die Löslichkeit der im Festgestein vorhandenen Karbonate.

80% aller Werte der freien Kohlensäure liegen zwischen 6 und 46 mg/l. Sehr hohe Werte an freier Kohlensäure wurden im salinaren Zechstein gemessen und auch die anderen salinaren

Wässer weisen erhöhte Werte an freiem CO₂ auf. Die relativ geringsten Werte an freier Kohlensäure werden in den Grundwasserleitern der Alpen beobachtet, die dementsprechend unter den karbonatischen Grundwasserleitern die Wässer mit den geringsten Gehalten an Calcium und Hydrogenkarbonat enthalten.

Fluorid (Anhang 2-7)

Fluorid tritt im Grundwasser in der Regel nur in Spuren auf; im Allgemeinen werden in Süßwässern Fluoridgehalte von kleiner 1 mg/l gemessen (MATTHESS 1994). Für Fluorid gilt ein Grenzwert der TrinkWV von 1,5 mg/l.

Der höchste gemessene Fluoridgehalt betrug annähernd 10 mg/l in einem Thermalwasser aus dem überdeckten Malm. In der weitaus überwiegenden Zahl der Wässer lag der Fluoridgehalt unter der Nachweisgrenze. Häufigere Nachweise erfolgten in den Wässern aus den salinaren Grundwasserleitern (höchste Werte im salinaren Zechstein mit einem Median von 2,4 mg/l) sowie aus dem Paläozoikum und bei den thermalen Tiefenwässern des überdeckten Malms. Der Grenzwert der TrinkWV wird nur vereinzelt geogen überschritten.

Chlorid (Anhang 2-8)

Der überwiegende Anteil der bekannten Chlorvorräte ist im Meerwasser mit im Mittel 19,4 g/l enthalten; das Niederschlagswasser meerferner Gebiete enthält etwa 1 mg/l Chlorid (MATTHESS 1994). Chlorid wird im Grundwasser geogen vorwiegend im Bereich von Salzlagerstätten angetroffen; der anthropogene Eintrag ins Grundwasser, z.B. aus der Straßensalzung oder chloridhaltigen Düngemitteln, kann stellenweise beträchtlich sein. Die TrinkWV gibt für Chlorid einen Grenzwert von 250 mg/l vor.

Im Allgemeinen liegen die Chloridwerte der untersuchten Grundwässer zwischen 1 und 50 mg/l (Median knapp 11 mg/l). Die höchsten Chloridgehalte im Bereich von mehreren g/l werden im salinaren Zechstein gemessen und stammen hier aus Steinsalzablagerungen. Die sonstigen Grundwasserleiter mit Chloridkonzentrationen der Wässer deutlich über dem Durchschnitt sind weitgehend identisch mit den entsprechenden Wässern hoher Nitratkonzentrationen (z.B. Keuper und Muschelkalk in Nordbayern und Quartärschotter und seichte Vorlandmolasse in Südbayern), so dass diese erhöhten Chloridwerte größtenteils auf anthropogene Einträge zurückzuführen sind. Geringe Chloridwerte von meist unter 10 mg/l werden auch hier in den landwirtschaftlich gering genutzten Gebieten, bzw. in Tiefengrundwasserleitern angetroffen, wobei die Grundwässer der Alpen die niedrigsten Werte mit Medianen im Bereich der Chloridkonzentration im Niederschlagswasser von 1 mg/l aufweisen. Der hohe Schwankungsbereich der Chloridwerte des überdeckten Malms ist auf bereichsweise geogen erhöhte Chloridkonzentrationen des dortigen Tiefengrundwassers zurückzuführen.

Nitrat (Anhang 2-9)

Nitrat tritt im Grundwasser nur selten geogen auf; überwiegend entstammt es der landwirtschaftlichen Nutzung und wird entsprechend am häufigsten in oberflächennahen Grundwässern intensiv landwirtschaftlich bearbeiteter Gebiete angetroffen. Nitrat ist als nicht sorbierbares Anion sehr mobil; in reduzierten Wässern wird es jedoch mikrobiell abgebaut. Durch die TrinkWV wird für Nitrat ein Grenzwert von 50 mg/l vorgegeben.

Die gemessene Nitratverteilung in den bayerischen Grundwässern zeigt eine hohe Nutzungsabhängigkeit mit den höchsten Nitratwerten in den oberflächennahen Grundwasserleitern intensiv landwirtschaftlich genutzter Gebiete, wie dem Muschelkalk und Keuper in Nordbayern mit zahlreichen Sonderkulturen sowie dem Nördlinger Ries, der seichten Vorlandmolasse und den Quartärschottern des Alpenvorlands. Die geringsten Nitratgehalte finden sich in den Grundwässern der Alpen und des Grundgebirges mit ihrer geringen landwirtschaftlichen Nutzung und hohen Grundwasserneubildungsraten sowie in Tiefengrundwasserleitern wie dem überdeckten Malm und der tiefen Vorlandmolasse. Als vorwiegend anthropogen beeinflusster Parameter dürfte die Nitratkonzentration langfristig die höchsten Schwankungen der hier untersuchten Inhaltsstoffe des Grundwassers aufweisen.

Sulfat (Anhang 2-10)

Wenngleich Schwefel in der Lithosphäre nicht sehr häufig ist, wird er wegen seiner geochemischen Mobilität verbreitet im Grundwasser angetroffen, vorwiegend in Form des Sulfats. Sulfat tritt sowohl geogen, insbesondere in Evaporiten, als auch anthropogen aufgrund von Atmosphäreintrag (saurer Regen) oder in Form löslicher Sulfatverbindungen aus Düngemitteln auf. Für Sulfat ist in der TrinkWV ein Grenzwert von 240 mg/l angegeben.

Die höchsten Sulfatwerte – meist über dem Grenzwert der TrinkWV – werden geogen in den Wässern der salinaren Grundwasserleiter von Zechstein, Muschelkalk, Keuper und Kalkalpen angetroffen. Die relativ hohen Sulfatkonzentrationen in den Wässern des karbonatisch-klastischen Muschelkalks können auch auf hydraulische Verbindungen zur salinaren Fazies des Mittleren Muschelkalks zurückgeführt werden; die hohen Sulfatgehalte im Unteren Keuper werden dagegen überwiegend durch anthropogene Einflüsse verursacht. Deutlich überdurchschnittliche Sulfatgehalte werden darüber hinaus in den Wässern des Lias, der silikatischen Quartärschotter und des Braunkohlentertiärs angetroffen. Die geringsten Sulfatgehalte weisen die Grundwässer der Alpen und des sauren bis intermediären Kristallins auf. Dass die Wässer des überdeckten Malms und der tiefen Vorlandmolasse im Mittel geringfügig niedrigere Sulfatgehalte aufweisen, als die oberflächennäheren Bereiche der gleichen Grundwasserleiter (unbedeckter bis teilbedeckter Malm bzw. seichte Vorlandmolasse) kann auf anthropogene Einflüsse aber auch auf eine Sulfatreduktion in den sauerstoffärmeren Tiefengrundwasserleitern zurückzuführen sein.

Hydrogenkarbonat (Anhang 2-11)

Hydrogenkarbonat ist ein bedeutendes Hauptanion im Grundwasser. Hohe Hydrogenkarbonatgehalte werden in Wässern aus karbonatischen Grundwasserleitern angetroffen, wobei aufgrund der guten Löslichkeit des Calciumkarbonats bereits geringe Kalkgehalte ausreichen, um relativ hohe Hydrogenkarbonatwerte zu erreichen. Beispiele hierfür sind die Grundwässer aus dem Dogger-Eisensandstein und der Vorlandmolasse, die bei geringen Karbonatgehalten einen vorwiegend silikatischen Gesteinschemismus aufweisen.

Niedrige Hydrogenkarbonatgehalte der Wässer werden in den weitgehend karbonatfreien Grundwasserleitern des Grundgebirges sowie des Buntsandsteins, der Trias und Kreide der Bodenwöhrer Bucht, des Braunkohlentertiärs sowie des Perms angetroffen. Die im Vergleich zu

den Grundwasserleitern der Voralpen geringeren Hydrogenkarbonatgehalte in den Grundwässern der Alpen sind auf die geringen Gehalte an freier Kohlensäure (s. Anhang 2-6) sowie auf ein teilweise sehr geringes Alter der Wässer und damit nicht vollständig eingestellte Lösungs-gleichgewichte zurückzuführen.

Natrium (Anhang 2-12)

Natrium bildet sehr gut lösliche Salze und kommt im Grundwasser im Allgemeinen mit Gehalten von 1 bis 20 mg/l vor (MATTHESS 1994). Natrium wird auch häufig anthropogen ins Grundwasser eingetragen (z.B. Straßensalzung). Der Grenzwert der TrinkWV beträgt 200 mg/l.

80% der gemessenen Natriumgehalte liegen zwischen etwa 1 und 16 mg/l. Deutlich erhöhte Werte von mehreren g/l finden sich erwartungsgemäß in den NaCl-beeinflussten Wässern des salinaren Zechsteins. Die Grundwässer der anderen evaporitischen Grundwasserleiter, die stärker Gips beeinflusst sind, weisen Natriumwerte auf, die nicht wesentlich über dem Durchschnitt aller Wässer liegen. Weitere Grundwasserleiter mit bereichsweise erhöhten Natriumkonzentrationen sind der überdeckte Malm und die tiefe Vorlandmolasse, wo die Natriumwerte durch Ionenaustauschprozesse in größeren Tiefen erhöht sind (s. Kap. 3). Einige Grundwasserleiter mit erhöhten Natriumgehalten der Wässer decken sich mit den höchsten Nitratgehalten (z.B. Muschelkalk, Keuper, seichte Vorlandmolasse und Quartärschotter). Diese Natriumverteilungen dürften anthropogen beeinflusst sein. Die niedrigsten Natriumwerte werden in den Wässern der Nördlichen Kalkalpen gemessen (Mediane etwa 0,2 mg/l).

Kalium (Anhang 2-13)

Kalium kommt ähnlich Natrium häufiger in Evaporiten vor, weist jedoch wegen seiner geringeren geochemischen Mobilität (bevorzugte Anlagerung z.B. an Tonminerale) im Mittel niedrigere Konzentrationen im Grundwasser auf als Natrium; Gehalte im Bereich von einigen Zehner mg/l sind laut MATTHESS (1994) ungewöhnlich. Da Kalium ein wichtiges Element des Pflanzenstoffkreislaufs ist, wird es häufig als Dünger aufgegeben. Nach TrinkWV gilt für Kalium ein Grenzwert von 12 mg/l.

80% aller Messwerte des Kaliums liegen zwischen ungefähr 0,4 und 6 mg/l. Die höchsten Werte werden in den Wässern aus dem salinaren Zechstein angetroffen; weiterhin weisen die Wässer aus der salinaren Fazies des Mittleren Keupers in der Regel deutlich erhöhte Kaliumgehalte auf. Dagegen liegen die Kaliumkonzentrationen der Wässer des salinaren Muschelkalks nur geringfügig über denen der Süßwässer aus dem Muschelkalk und ebenso sind die Kaliumkonzentrationen der Wässer aus der salinaren Fazies der Nördlichen Kalkalpen zwar gegenüber den sonstigen Wässern aus den Nördlichen Kalkalpen deutlich erhöht, liegen jedoch nur im mittleren Bereich aller Wässer. Überdurchschnittliche Kaliumgehalte werden insbesondere noch in den Wässern des Mittleren und Oberen Keupers, des Lias und des Braunkohlentertiärs (hier bei hoher Schwankungsbreite) angetroffen. Die niedrigsten Kaliumkonzentrationen mit Werten überwiegend unter der Bestimmungsgrenze weisen die Wässer aus den Nördlichen Kalkalpen (außer salinare Fazies) auf.

Calcium (Anhang 2-14)

Calcium ist das häufigste Kation im Grundwasser und liegt in Grundwasserleitern aus calcium-karbonathaltigen Gesteinen meist in Konzentrationen zwischen 60 und 100 mg/l vor (MERKEL & SPERLING 1996). Diese Werte stimmen gut mit den Beobachtungen aus den bayerischen Grundwässern überein: die karbonatischen Grundwasserleiter (z.B. der Alpen und Voralpen) weisen Calciumgehalte von mehreren Zehner bis über Hundert mg/l auf. Die höchsten Calciumgehalte im Bereich von mehreren Hunderter bis über Tausend mg/l finden sich in den salinaren Grundwässern; hier wird der Calciumgehalt vom Löslichkeitsprodukt des Gipses bestimmt. Geringe Calciumkonzentrationen von einigen mg/l bis wenigen Zehner mg/l finden sich in den Wässern aus den silikatischen Grundwasserleitern des Grundgebirges, dem Buntsandstein, der Trias der Bodenwöhrer Bucht, Bereichen der Kreide, dem Braunkohlentertiär und dem Perm. Im Kristallin weisen die Wässer aus sauren bis intermediären Gesteinen wesentlich geringere Calciumgehalte auf (Median: 4,3 mg/l) als aus basischen bis ultrabasischen Gesteinen (Median 24,6 mg/l).

Magnesium (Anhang 2-15)

Magnesium ist ein häufiger Bestandteil im Grundwasser, der wegen seiner geringeren Verbreitung in der Lithosphäre jedoch meist in niedrigeren Konzentrationen als Calcium vorkommt. Allgemein liegen die Magnesiumwerte der Süßwässer unter 40 mg/l (MATTHESS 1994).

80% der hier gemessenen bayerischen Grundwässer weisen Magnesiumgehalte im Bereich zwischen 2 und 40 mg/l auf. Da Evaporite meist auch gut lösliche Magnesiumsalze enthalten, finden sich in den salinaren Grundwässern überdurchschnittliche Magnesiumkonzentrationen, die jedoch bis auf den salinaren Zechstein selten Konzentrationen von 100 mg/l überschreiten. Die dolomitischen Grundwasserleiter der Alpen führen Wässer, die zwar Magnesiumgehalte deutlich über dem Mittel der anderen alpidischen Grundwasserleiter (mit Ausnahme der salinaren Fazies) jedoch im mittleren Bereich aller Grundwässer aufweisen. Die geringste Magnesiumführung wurde in den Wässern aus der sauren bis intermediären Fazies des Kristallins festgestellt (Median 1,7 mg/l).

Eisen (Anhang 2-16)

Höhere Gehalte an Eisen sind an reduzierte Grundwässer gebunden, während sauerstoffhaltige Grundwässer Eisen nicht oder allenfalls in Spuren enthalten (MATTHESS 1994). Für Eisen gilt ein Grenzwert nach TrinkWV von 0,2 mg/l.

Dementsprechend korreliert die beobachtete Verteilung der Eisengehalte in den Grundwässern negativ mit der Verteilung der Sauerstoffgehalte (Anhang 2-4). Hohe Eisengehalte meist über 0,1 mg/l finden sich demnach vor allem in den häufig sauerstoffarmen bis sauerstofffreien Tiefenwässern (z.B. überdeckter Malm und tiefe Vorlandmolasse) sowie der Kreide der Bodenwöhrer Bucht und dem Braunkohlentertiär. Niedrige Eisengehalte meist unter 0,1 mg/l werden dagegen in den überwiegend oberflächennahen und sauerstoffreichen Wässern (z.B. Kristallin, Quartärschotter, Alpen) angetroffen. Bis auf die Wässer des salinaren Zechsteins werden Eisengehalte über 10 mg/l nur sehr selten beobachtet. Etwa 25% aller gemessenen Wässer überschreiten den Grenzwert der TrinkWV; für die Nutzung als Trinkwasser werden diese Wässer in der Regel belüftet, was zur Ausfällung des Eisens führt.

Mangan (Anhang 2-17)

Der Grenzwert der TrinkWV für Mangan von 0,05 mg/l wird etwa von 10% aller gemessenen Grundwässer überschritten. Mangan weist ein zum Eisen analoges Lösungsverhalten auf, d.h. es wird vorwiegend in sauerstoffarmen bis sauerstofffreien Wässern gefunden. Dementsprechend wird Mangan in höheren Konzentrationen in Wässern aus dem salinaren Zechstein, der Trias der Bodenwöhrer Bucht, der Kreide der Bodenwöhrer Bucht, dem überdeckten Malm und der tiefen Vorlandmolasse gemessen. Die Mangangehalte überschreiten jedoch Werte von 1 mg/l nur selten (Ausnahme: salinarer Zechstein). Überwiegend niedrige Werte, die meist unter der Bestimmungsgrenze für Mangan von 0,002 mg/l liegen, finden sich dagegen in den Grundwasserleitern mit meist sauerstoffreichen Wässern wie dem Kristallin, dem unbedeckten bis teilbedeckten Malm, dem Quartär und den Grundwasserleitern der Alpen.

Silicium (Anhang 2-18)

Silicium ist in der Erdkruste sehr häufig vertreten, weist jedoch nur eine geringe geochemische Mobilität auf. Die SiO_2 -Konzentrationen natürlicher Grundwässer liegen nach MATTHESS (1994) meist zwischen 1 und 30 mg/l (entspricht 0,47 bis 14 mg/l Silicium); in MERKEL & SPERLING (1996) wird ein Mittelwert von etwa 12 bis 17 mg/l (5,6 bis 7,9 mg/l Silicium) angegeben. Das Silicium im Wasser stammt meist aus der Silikatverwitterung.

80% der Siliciumkonzentrationen der untersuchten Wässer liegen in einem engen Bereich zwischen 1,6 und 8,3 mg/l (Median: 3,8 mg/l). Entsprechend dem geochemischen Inventar weisen die Wässer aus den Grundwasserleitern mit silikatischem Gesteinschemismus höhere Siliciumkonzentrationen auf. Die höchsten Werte werden (bei allerdings relativ geringer Probenzahl) in den Wässern der tertiären Vulkanite und des Wunsiedler Marmorzugs (eventuell aus der Verwitterung des Kalksilikatfelsens) sowie der basischen bis ultrabasischen Gesteine des Kristallins gefunden. Deutlich überdurchschnittliche Siliciumgehalte finden sich darüber hinaus in Wässern der Trias der Bodenwöhrer Bucht, dem Braunkohlentertiär, der Molasse und dem sauren bis intermediären Kristallin. Die niedrigsten Siliciumgehalte werden in den Grundwässern der Alpen angetroffen (Mediane unter 2 mg/l); die Wässer aus den Nördlichen Kalkalpen überschreiten meist die Bestimmungsgrenze von 1 mg/l. Das Grundwasser im überdeckten Malm weist deutlich höhere Siliciumgehalte auf, als im unbedeckten bis teilbedeckten Malm. Dies dürfte auf den Zustrom siliciumreicherer Wässer der Molasse bzw. der Kreide zurückzuführen sein, die flächenhaft in den tiefen Malm infiltrieren.

Organischer Gesamtkohlenstoff TOC (Anhang 2-19)

Die Gehalte an organischem Gesamtkohlenstoff liegen bei den betrachteten Grundwässern meist unter der Bestimmungs- bzw. Nachweisgrenze. Werte deutlich über dem Durchschnitt aller Grundwasserleiter werden im salinaren Zechstein, Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper sowie in den Kalkalpen festgestellt. In quartären Grundwasserleitern treten erhöhte Kohlenstoffgehalte bei Wässern im Kontakt mit Mooren auf. In der Regel finden sich keine quantifizierbaren Kohlenstoffgehalte in den Wässern aus Kristallin, Perm, Malm, Trias und Kreide der Bodenwöhrer Bucht und Braunkohlentertiär.

Gesamtmineralisation (Anhang 2-20)

Die Gesamtmineralisation wurde aus den gemessenen Konzentrationen der Haupt- und Nebenelemente berechnet (s. Kap. 2.2). Die Werte von 80% aller untersuchten Wässer liegen im Bereich von etwa 80 bis 750 mg/l (Median: 475 mg/l). Die Wässer des salinen Zechsteins weisen die höchste Gesamtmineralisation auf, danach folgen die anderen salinen Grundwässer. Grundwässer mit einem überdurchschnittlich hohen Mineralgehalt finden sich des weiteren im Muschelkalk und im Unteren Keuper. Mineralarme Wässer überwiegen im Grundgebirge, wobei hier die Wässer aus dem sauren bis intermediären Kristallin die geringsten Mineralgehalte aller Grundwässer in Bayern aufweisen. Weitere Grundwasserleiter mit meist mineralarmen Grundwässern sind der Buntsandstein sowie die Trias und Kreide der Bodenwöhrer Bucht.

Gesamthärte (Anhang 2-21)

Die Gesamthärte in °dH (deutsche Härte) wird aus dem Gehalt des Wassers an den Erdalkalimetallen Calcium und Magnesium errechnet (s. Kap. 2.2). Dementsprechend deckt sich die Verteilung der Gesamthärten mit der Verteilung dieser Elemente (Anhang 2-14 und 2-15).

Karbonathärte (Anhang 2-22)

Die Karbonathärte in °dH (deutsche Härte) wird aus dem Gehalt des Wassers an Hydrogencarbonat errechnet (s. Kap. 2.2). Somit stimmt die Verteilung der Karbonathärten mit der von Hydrogencarbonat überein (Anhang 2-11).

Sättigungsindex (Calciumkarbonat) (Anhang 2-23)

Der Sättigungsindex für Calciumkarbonat (SI) ist ein Maß für die Ausbildung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts. Wässer mit einem Sättigungsindex nahe null befinden sich im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, bei Werten über null liegt eine Übersättigung vor und die Wässer neigen zur Kalkausfällung, während bei Werten unter null eine Kalkaggressivität vorliegt, die ein metallkorrosives Verhalten der Wässer bewirkt. Entsprechend dem Gesteinschemismus weisen die karbonatischen Grundwasserleiter Wässer mit einem SI um null auf, d.h. sie befinden sich mehr oder weniger im Sättigungsgleichgewicht. Aufgrund ihrer Pufferung ist die Spannbreite der SI-Werte für diese Wässer relativ gering. Größere Spannweiten liegen für die silikatisch-karbonatischen Grundwasserleiter vor, in denen für einen Teil der Wässer je nach lokaler Gesteinszusammensetzung ein Defizit an Calciumkarbonat besteht (z.B. Dogger, Vorlandmolasse, Zechstein, Quartärschotter silikatisch). Die Wässer aus den silikatischen Grundwasserleitern weisen in der Regel einen deutlich negativen SI, d.h. eine Calciumkarbonat-Untersättigung auf (Grundgebirge außer Wunsiedler Marmorzug, Tertiäre Vulkanite, Perm, Buntsandstein, Trias und Kreide der Bodenwöhrer Bucht sowie Braunkohlentertiär).

Basekapazität (Anhang 2-24)

Die Basekapazität wird aus dem NaOH-Verbrauch im Gelände bis pH 8,2 bestimmt (Kap. 2.2) und ist direkt mit dem Gehalt an freier Kohlensäure korreliert. Daher entspricht die Verteilung der Basekapazitäten der der freien Kohlensäure (Anhang 2-6).

Säurekapazität (Anhang 2-25)

Die Säurekapazität wird aus dem HCl-Verbrauch bis pH 4,3 bestimmt (Kap. 2.2) und ist direkt mit dem Gehalt an Hydrogenkarbonat korreliert. Daher entspricht die Verteilung der Säurekapazitäten der von Hydrogenkarbonat (Anhang 2-11).

Silber (Anhang 2-26)

Silber wird als geochemisch seltenes Element im Grundwasser nur in geringen Konzentrationen gefunden. MATTHESS (1994) gibt eine maximale Löslichkeit von Silber in sauerstoffhaltigem Wasser von 10 µg/l an.

Dementsprechend kann Silber in den Grundwässern Bayerns nur selten nachgewiesen werden, wobei als Maximalwert 3,1 µg/l (Probe aus der salinaren Fazies des Muschelkalks) festgestellt wurde. Auffällig sind die durchgehenden und relativ hohen Silberwerte in Wässern der salinaren Fazies des Muschelkalks (Median 0,43 µg/l) und des Unteren Keupers (Median 0,11 µg/l) sowie die häufigen Nachweise in der salinaren Fazies der Kalkalpen (75%-Quantil: 0,53 µg/l).

Aluminium (Anhang 2-27)

Der Grenzwert der TrinkWV liegt für Aluminium bei 200 µg/l. Nach MATTHESS (1994) betragen die Aluminiumgehalte im natürlichen Grundwasser in der Regel nur wenige Zehner bis Hunderter µg/l.

Diese Konzentrationen geben die Obergrenze der in den bayerischen Grundwässern gemessenen Aluminiumwerte wieder; 90% der Werte liegen unter 32,2 µg/l. Aluminium wird in den Wässern insgesamt weit verbreitet nachgewiesen; die zahlreichen Werte kleiner Bestimmungsgrenze sind darauf zurückzuführen, dass die Bestimmungsgrenze der verwendeten Analytik im Vergleich zu anderen Spurenelementen relativ hoch liegt (0,85 µg/l).

Die höheren festgestellten Aluminiumkonzentrationen in den Grundwässern des Buntsandsteins, des Paläozoikums und des Kristallins korrespondieren gut mit den höheren Aluminiumgehalten in Silikatgesteinen und der besseren Aluminiumlöslichkeit bei niedrigen pH-Werten; jedoch werden auch in neutralen bis leicht alkalischen Grundwässern aus silikatarmen Gesteinen wie den Karbonatgesteinen der Kalkalpen kaum geringere Aluminiumwerte ermittelt. Aluminium wird in den oberflächennahen Grundwässern der silikatischen Aquifere auch anthropogen mobilisiert (Versauerung). Der Grenzwert der TrinkWV wird geogen in größeren Probenzahlen in Wässern aus dem Paläozoikum und dem Buntsandstein sowie vereinzelt im Kristallin, in den quartären Grundwasserleitern im Moränenbereich sowie im Dogger und in der Kreide überschritten.

Arsen (Anhang 2-28)

Die zulässigen Höchstgehalte für Arsen nach TrinkWV liegen bei 10 µg/l. HEINRICHS (1996) berichtet von geogen erhöhten Arsengehalten in den Grundwässern des Keupers in Nordbayern; BAYER & HENKEN-MELLIES (1998) fanden Arsen führende Sedimentlagen in der Oberen Süßwassermolasse. Auch anthropogene Erhöhungen der Arsengehalte im Grundwasser, z.B. im Einflussbereich von Mülldeponien, wurden beobachtet.

90% der hier untersuchten Wässer weisen Arsenkonzentrationen von unter 3,2 µg/l auf. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen geogen deutlich erhöhte Arsenkonzentrationen in den Wässern des salinaren Zechsteins und des salinaren Muschelkalks, wobei diese Wässer in der Regel ohnehin keine Trinkwasserqualität aufweisen. Weitere Grundwässer mit geogen erhöhten Arsengehalten finden sich vor allem im Mittleren und Oberen Keuper (90%-Quantil über 17 µg/l). Vereinzelte Grundwasserproben mit erhöhten Arsengehalten sind im Buntsandstein, in den quartären Grundwasserleitern im Moränenbereich, im Unteren Keuper, in der Vorlandmolasse, der Faltenmolasse, dem Kristallin in saurer bis intermediärer Fazies, dem Muschelkalk, den karbonatischen Quartärschottern, dem Perm und dem Dogger zu finden. Ein Vergleich dieser Grundwasserleiter zeigt einen Trend zum bevorzugten Auftreten von Arsen in Evaporiten und in klastischen Sedimentgesteinen.

Gold (Anhang 2-29)

Für die bayerischen Grundwässer liegen die Messwerte der Goldgehalte überwiegend unter der Bestimmungsgrenze von 0,03 µg/l. Der Maximalwert von 1,24 µg/l wurde in einer Wasserprobe aus dem salinaren Muschelkalk ermittelt. Bei 90% der Wässer betragen die Goldgehalte unter 0,07 µg/l.

Bor (Anhang 2-30)

Bor findet sich geogen angereichert in Sand- und Tonsteinen, in Vulkangebieten und in terrestrischen Verdunstungsbereichen (MATTHESS 1994). In den meisten Grundwässern betragen die Borgehalte einige µg/l bis Zehner µg/l (MERKEL & SPERLING 1998). Als Bestandteil von Waschmitteln kann Bor auch auf anthropogene Belastungen hinweisen. Bor wird häufig im Abstrom von Deponien gemessen. Der Grenzwert der TrinkWV liegt bei 1 mg/l.

Die in den Grundwässern Bayerns festgestellten Borgehalte liegen im Median bei etwa 6 µg/l mit Maximalwerten bis knapp 3 mg/l. Deutlich erhöhte Borkonzentrationen finden sich in Wässern aus den salinaren Faziesbereichen von Zechstein, Mittlerem Keuper und Muschelkalk. Darüber hinaus sind die Borgehalte im Grundwasser des Muschelkalks, des Keupers und des Perms erhöht. Grenzwertüberschreitungen finden sich für Bor außer in den salinaren Wässern vereinzelt in den Einheiten der Molasse und des Quartärs in den Moränenbereichen.

Barium (Anhang 2-31)

Für die Wässer öffentlicher Versorgungseinrichtungen in den USA, in die allerdings auch Oberflächenwässer mit eingehen, wurde für Barium ein Medianwert von 43 µg/l angegeben (MATTHESS 1994). In KONARSKE et al. (1998) wurde für 250 Messstellen ein Median von 50 µg/l sowie ein 90-Perzentil von 170 µg/l ermittelt.

Barium ist in nahezu allen Grundwasserproben nachweisbar, wobei eine Konzentration von 1 mg/l nur selten überschritten wird. Der Medianwert liegt in guter Übereinstimmung mit den Messwerten anderer Untersuchungen bei 30 µg/l mit einem 90%-Quantil von 161 µg/l. Relativ erhöhte Bariumgehalte finden sich in den Grundwässern des Keupers und des Perms; die geringsten Werte werden in den Wässern der karbonatischen Einheiten der Kalkalpen sowie im Kristallin festgestellt.

Beryllium (Anhang 2-32)

Bei Beryllium handelt es sich um ein stark toxisches Element (z.B. MERKEL & SPERLING 1998). Dennoch ist Beryllium, wahrscheinlich wegen seiner Seltenheit, nicht in der TrinkWV aufgeführt. Bei den hier untersuchten Wässern liegen über die Hälfte der Werte unter der Nachweisgrenze und 90% aller Werte betragen unter 0,1 µg/l. Grundwasserleiter in denen etwas häufigere Nachweise erfolgten sind das Grundgebirge mit Paläozoikum und Kristallin, der Buntsandstein und die Kreide; die Maximalwerte bewegen sich meist im Bereich von einigen µg/l, nur selten Zehner µg/l. Die Gesteine dieser Grundwasserleiter weisen nach LINHARDT & ZARBOK (2002) ebenfalls erhöhte Berylliumgehalte auf.

Wismut (Anhang 2-33)

Wismut ist in den untersuchten Grundwässern generell nur in geringen Mengen vertreten; 75% der Werte liegen unter der Bestimmungsgrenze von 0,008 µg/l. Der Maximalwert von 10,6 µg/l wurde im hochmineralisierten salinen Zechstein ermittelt. Grundwasserleiter mit tendenziell höheren Wismutgehalten der Grundwässer sind ansonsten das Paläozoikum, der Muschelkalk sowie der Untere Keuper und der Dogger.

Cadmium (Anhang 2-34)

SCHLEYER & KERNDORFF (1992) geben für die Cadmiumgehalte der Grundwässer in Deutschland Medianwerte von < 0,1 µg/l an. Der Grenzwert für Cadmium gemäß TrinkWV liegt bei 5 µg/l.

Anhand des vorliegenden Datensatzes ergibt sich ein Medianwert aller Proben in Höhe der Bestimmungsgrenze von 0,01 µg/l. Der Grenzwert der TrinkWV wird nur von wenigen Einzelproben überschritten. Grundwasserleiter mit einer Tendenz zu höheren Cadmiumgehalten im Grundwasser sind außer dem hochmineralisierten salinen Zechstein das Paläozoikum, der Buntsandstein, die Trias und Kreide der Bodenwöhrer Bucht, die salinare Fazies des Mittleren Keupers und das Kristallin in der sauren bis intermediären Fazies.

Cer (Anhang 2-35)

Die Verbindungen von Cer weisen im Wasser eine geringe Löslichkeit auf, weswegen Nachweise von Cer allenfalls in geringen Mengen vorliegen (MATTHESS 1994).

Aufgrund der geringen Bestimmungsgrenze (0,006 µg/l) liegen trotz geringer Cergehalte in den Wässern bei über 50% der Entnahmestellen quantitative Nachweise von Cer vor. Der Medianwert aller Wässer liegt bei 0,007 µg/l; die höchste gemessene Cerkonzentration von 29,83 µg/l stammt aus einer Grundwasserprobe im sauren bis intermediären Kristallin. Die relativ höchsten Cerkonzentrationen wurden für die Grundwässer des Perms und der Kreide der Bodenwöhrer Bucht ermittelt (Medianwert 0,05 µg/l).

Cobalt (Anhang 2-36)

Cobalt kommt im Grundwasser allgemein nur in Gehalten von wenigen µg/l vor (HEM 1985).

Es kann aufgrund der geringen Bestimmungsgrenze (0,004 µg/l) häufig in den Grundwässern

nachgewiesen werden, jedoch durchwegs in recht geringen Konzentrationen. Die Maxima liegen im Bereich von 10 µg/l (Ausnahme: höhere Werte im Kristallin); der Medianwert aller Probenahmepunkte beträgt knapp 0,05 µg/l. Die relativ höchsten Cobaltwerte sind in den Grundwässern der salinaren Fazies des Mittleren Keupers (Median 1,06 µg/l) und der Kreide (Median 0,74 µg/l) zu beobachten, während die Wässer der karbonatischen Einheiten in den Kalkalpen (Median um 0,020 µg/l) die geringsten Gehalte aufweisen. Übereinstimmend mit diesen Beobachtungen ermittelten LINHARDT & ZARBOK (2002) in den Gesteinen der Kreide den höchsten Medianwert der Cobaltkonzentrationen aller untersuchten Gesteinseinheiten (69 mg/kg).

Chrom (Anhang 2-37)

Chrom wird im Grundwasser in Spurenkonzentrationen verhältnismäßig verbreitet gefunden, wobei die Werte in der Regel unter 10 µg/l liegen (MATTHESS 1994). Der Grenzwert der TrinkWV liegt für Chrom bei 50 µg/l.

In den meisten der auf Chromgehalte untersuchten Grundwasser-Entnahmestellen konnte Chrom quantitativ bestimmt werden, wobei Werte von 10 µg/l nur selten überschritten werden. Der Medianwert aller Grundwasserproben von 0,351 µg/l stimmt gut mit dem entsprechenden Wert amerikanischer Wasserwerke von 0,43 µg/l (DURFOR & BECKER 1964) überein. Deutlich überdurchschnittliche Werte finden sich im salinaren Zechstein, im salinaren Muschelkalk und im Unteren Keuper. Es wurden keine geogenen Überschreitungen des Grenzwerts der TrinkWV festgestellt.

Cäsium (Anhang 2-38)

Geogenes Cäsium wird in den Grundwässern Bayerns weit verbreitet in geringen Gehalten gefunden (Median: 0,008 µg/l); nur in seltenen Fällen werden Werte im Bereich von Zehner µg/l festgestellt. Grundwasserleiter mit Cäsiumwerten der Wässer deutlich über dem Durchschnitt sind der salinare Zechstein, der überdeckte Malm (hier fällt auf, dass im unbedeckten bis teilbedeckten Malm deutlich geringere Werte vorliegen), die Trias und Kreide der Bodenwöhrer Bucht und das Perm. Die niedrigsten Werte finden sich in den Wässern der Alpen, wobei hier die salinare Fazies der Kalkalpen die relativ höchsten Werte aufweist.

Kupfer (Anhang 2-39)

Kupfer kommt in der Lithosphäre verhältnismäßig häufig vor. Entsprechend ist Kupfer auch in den Grundwässern Bayerns im Regelfall in geringen Konzentrationen nachweisbar. Anhand der Spannweitendiagramme für Kupfer fällt auf, dass im Gegensatz zu den meisten anderen Spurenstoffen die Spannweiten der Konzentrationen in den Wässern der verschiedenen Grundwasserleiter eine relativ geringe Abweichung voneinander aufweisen. Kupfer ist somit eines der wenigen Spurenelemente, das kaum eine grundwasserleitertypische Verteilung aufweist. Eine Ausnahme bilden die Wässer des salinaren Zechsteins mit deutlich erhöhten Werten (Median 60,26 µg/l). Ansonsten liegen die Kupferkonzentrationen in der Regel unter 10 µg/l. Geogene Überschreitungen des Grenzwerts der TrinkWV für Kupfer (2 mg/l) konnten nicht festgestellt werden.

Deutlich erhöhte Kupferkonzentrationen können im Trinkwasser bei Hausinstallationen aus Kupferleitungen und sauren Wässern auftreten, da Kupfer bei niedrigem pH in Lösung geht.

Quecksilber (Anhang 2-40)

Die meisten Quecksilberverbindungen sind schwer löslich. Daher werden im Grundwasser im Allgemeinen nur geringe Quecksilbergehalte gemessen. Die TrinkWV gibt für Quecksilber einen Grenzwert von 1 µg/l vor.

Die in den Grundwässern Bayerns festgestellten Quecksilbergehalte liegen über den von anderen Autoren angegebenen geogenen Gehalten (z.B. SCHLEYER & KERNDORFF 1992: < 0,1 µg/l). Wenngleich der Median aller Werte unter der Bestimmungsgrenze liegt, beträgt der 90-Perzentilwert über 0,3 µg/l. Während z.B. WIKLANDER (1970) anhand von 36 Messungen keinen Zusammenhang zwischen den gemessenen Quecksilbergehalten und der Art des Grundwasserleiters finden konnte, zeigt das hier untersuchte Datenkollektiv von insgesamt 2912 Probenahmestellen Zusammenhänge zum Grundwasserleiter auf. Dass die gemessenen Werte geogenen Ursprungs sind, wird durch die Tatsache unterstützt, dass die höchsten gemessenen Medianwerte in den eindeutig nicht oder gering anthropogen beeinflussten Wässern des salinen Zechsteins und der Nördlichen Kalkalpen zu finden sind. Insgesamt überschreiten die Grundwässer an 90 Probenahmestellen den in der TrinkWV vorgegebenen Grenzwert. Die Grenzwertüberschreitungen sind über zahlreiche Grundwasserleiter verteilt und die Maximalwerte liegen mit Ausnahme des salinen Zechsteins durchgehend im Bereich von einigen µg/l. Insgesamt wird Quecksilber recht häufig in den Grundwässern des Alpen- und Voralpenraums (mit Ausnahme des Flyschs) und in den salinen Grundwässern sowie häufiger in Wässern aus dem sauren bis intermediären Kristallin als aus dem basischen bis ultrabasischen Kristallin gemessen. Weitere Wässer mit häufig höheren Quecksilbergehalten kommen aus dem Buntsandstein, dem Keuper, dem Malm und der Kreide.

Lanthan (Anhang 2-41)

Lanthan wird in den untersuchten Wässern recht verbreitet nachgewiesen. Der Maximalwert von über 13 µg/l wurde im sauren bis intermediären Kristallin festgestellt. Die gemessenen Gehalte liegen ansonsten in der Regel unter 1 µg/l; der Medianwert aller Proben beträgt knapp 0,1 µg/l. Lanthanwerte deutlich über dem Mittelwert aller Wässer werden im salinen Zechstein, im Buntsandstein, dem Perm, dem Kristallin und der Kreide festgestellt. Dies weist auf ein bevorzugtes Auftreten in silikatischen Grundwasserleitern hin.

Lithium (Anhang 2-42)

Das Alkalimetall Lithium kommt in der Natur relativ selten vor, ist aufgrund seiner verhältnismäßig guten Löslichkeit jedoch häufig im Grundwasser nachweisbar, meist in Konzentrationen zwischen 1 und 500 µg/l (MATTHESS 1994). Höhere Gehalte werden in Thermalwässern und in Solen erreicht.

Die Lithiumkonzentrationen von 80% der untersuchten Wässer liegen im Bereich von 0,37 bis 25,5 µg/l. Den allgemeinen Beobachtungen entsprechend wurden in den salinen Wässern deutlich erhöhte Lithiumgehalte gemessen, insbesondere in den mineralreichen Wässern des salinen

Zechsteins. Weitere Grundwasserleiter mit hohen Lithiumgehalten der Wässer sind der Perm, der Mittlere und Obere Keuper und die Kreide. Die geringsten Lithiumgehalte wurden in den Wässern aus den Nördlichen Kalkalpen gemessen.

Molybdän (Anhang 2-43)

Im Allgemeinen werden im Grundwasser Molybdängehalte von 0,1 bis 5 µg/l gemessen (MERKEL & SPERLING 1998).

Der Medianwert aller gemessenen Grundwasserentnahmestellen liegt für die untersuchten bayerischen Grundwässer bei etwas über 0,1 µg/l und damit am unteren Rand der von anderen Autoren angegebenen Spannbreite. Relativ erhöhte Gehalte werden in den salinaren Wässern und hier vor allem in den Wässern des salinaren Zechsteins gemessen. Durch Molybdänwerte über dem Durchschnitte fallen weiterhin der überdeckte Malm und die tiefe Vorlandmolasse auf. In den 26 Probenahmestellen der Trias der Bodewöhrer Bucht und der Kreide konnte Molybdän dagegen nur in nicht quantifizierbaren Spuren gefunden werden.

Nickel (Anhang 2-44)

Nickel ist geochemisch relativ häufig verbreitet. Für die Nickelgehalte im Grundwasser werden aus anderen Untersuchungen (z.B. MERKEL & SPERLING 1998) Werte im Bereich von mehreren µg/l angegeben. Der Grenzwert der TrinkWV beträgt 20 µg/l.

Die Auswertung der vorliegenden Grundwasserentnahmestellen ergab für die bayerischen Grundwässer einen Medianwert von etwa 0,5 µg/l; der Maximalwert von knapp 416 µg/l stammt aus einer Wasserprobe im Kristallin. Ansonsten liegen die festgestellten Obergrenzen im Bereich von Zehner µg/l. Relativ hohe Nickelgehalte treten in den salinaren Wässern mit Ausnahme des salinaren Zechsteins sowie in der Kreide, im Buntsandstein und im Muschelkalk auf. Die relativ geringsten Konzentrationen wurden im Bereich der alpinen Grundwasserleiter gefunden. Überschreitungen des Grenzwerts der TrinkWV kommen häufiger in den nicht für Trinkwasserzwecke nutzbaren Wässern des salinaren Muschelkalks und nur vereinzelt in mehreren weiteren Grundwasserleitern vor.

Blei (Anhang 2-45)

Nach MERKEL & SPERLING (1998) ergibt sich für deutsche Grundwässer eine mittlere Bleikonzentration von 1,9 µg/l und ein Maximalwert von 9 µg/l. Der Grenzwert der TrinkWV liegt bei 10 µg/l.

In den gemessenen Grundwässern wurde ein deutlich niedrigerer Medianwert von knapp 0,05 µg/l festgestellt, wobei Überschreitungen des Grenzwerts der TrinkWV vereinzelt in Wässern aus dem sauren bis intermediären Kristallin, dem salinaren Zechstein, dem Buntsandstein und der seichten Vorlandmolasse sowie dem salinaren Muschelkalk und den dolomitischen Grundwasserleitern der Kalkalpen vorkommen. Für alle Grundwasserleiter außer dem salinaren Zechstein liegt der 90%-Quantil der Messwerte unter 1 µg/l.

Rubidium (Anhang 2-46)

Hinsichtlich des geochemischen Verhaltens ähnelt das Rubidium dem Kalium. Über die Verbreitung von Rubidium im Grundwasser liegen in der Literatur nur wenige Daten vor.

Insgesamt ist Rubidium in den Wässern Bayerns recht verbreitet nachweisbar. Der Medianwert aller Wässer beträgt knapp 0,8 µg/l, wobei 80% aller Messwerte zwischen 0,2 und 4,7 µg/l liegen. Die höchsten Werte wurden in den mineralreichen Wässern des salinaren Zechsteins ermittelt, höhere Werte liegen auch in der Trias und Kreide der Bodenwöhrer Bucht, im Perm, im überdeckten Malm und im Buntsandstein vor. Die relativ geringsten Werte entfallen auf die Nördlichen Kalkalpen. Die Werte für die Wässer aus dem Kristallin und Paläozoikum liegen im mittleren Bereich.

Antimon (Anhang 2-47)

Nach MERKEL & SPERLING (1998) liegen die Antimonkonzentrationen im Grundwasser bei deutlich unter 1 µg/l und meist weniger als 0,1 µg/l. Der Grenzwert der TrinkWV beträgt 5 µg/l.

Die hier festgestellten Antimongehalte ergeben einen Medianwert von 0,023 µg/l; der Maximalwert von 18,4 µg/l stammt von einer Probe aus dem salinaren Zechstein. Geogene Überschreitungen des Grenzwerts der TrinkWV sind bei Antimon sehr selten. Die höchsten Antimongehalte für Wässer mit Trinkwasserqualität wurden in den karbonatischen Grundwasserleitern der Kalkalpen festgestellt (Medianwerte ca. 0,15 µg/l). Sehr geringe Werte fanden sich hingegen für die Wässer der vorgelagerten Einheiten von Flysch und Helvetikum und wiederum relativ hohe Werte wurden in den Wässern der Quartärablagerungen des Alpenvorlands, die überwiegend aus dem Abtragungsschutt der Alpen aufgebaut sind, gemessen.

Selen (Anhang 2-48)

Selen zeigt chemisch ein ähnliches Verhalten wie Schwefel und ist in größeren Mengen toxisch. SCHLEYER & KERNDORFF (1992) geben Hintergrundkonzentrationen für Selen von 0,1 bis 136 µg/l an. Der Grenzwert der TrinkWV liegt bei 10 µg/l.

Mit der verwendeten Messtechnik (ICP-MS) konnte Selen lediglich in Werten über 1,58 µg/l quantitativ bestimmt werden. Insofern kann für das Datenkollektiv nur der 90-% Quantil von 3,34 µg/l angegeben werden. In den meisten Grundwasserleitern liegen die Selenkonzentrationen unter der Bestimmungsgrenze. Häufigere Nachweise und damit Grundwasserleiter mit einer Tendenz zu höheren Selenkonzentrationen der Wässer finden sich in Perm, salinarem Zechstein, Buntsandstein, Muschelkalk (einschließlich salinarer Fazies), salinarer Fazies des Mittleren Keupers, den Quartärschottern im Alpenvorland sowie den Kalksteinen der Nördlichen Kalkalpen. Geogene Überschreitungen des Grenzwerts der TrinkWV kommen für Selen häufiger in den salinaren Wässern (mit Ausnahme der salinaren Fazies der Nördlichen Kalkalpen) sowie in den quartären Grundwasserleitern im Moränenbereich und nur vereinzelt in mehreren weiteren Grundwasserleitern vor.

Zinn (Anhang 2-49)

75% der hier untersuchten Wässer weisen Zinnkonzentrationen von unter 0,05 µg/l auf. Der maximal gemessene Wert von über 25 µg/l stammt aus einer Wasserprobe des salinen Muschelkalks. Die Zinngehalte fast aller Wässer liegen unter 1 µg/l, wobei deutlich erhöhte Werte im salinen Zechstein und etwas erhöhte Werte in den Wässern aus dem Malm, der Kreide der Bodenwöhrer Bucht und der Vorlandmolasse gefunden werden.

Strontium (Anhang 2-50)

Das Verhalten von Strontium ähnelt dem des Calciums. Nach MATTHESS (1994) liegen die Strontiumgehalte im Allgemeinen bei 10 bis 1.000 µg/l, wobei in hoch mineralisierten Wässern auch erheblich höhere Werte ermittelt werden.

Die vorliegenden Strontiumwerte ergeben einen Medianwert von 127 µg/l mit 80% aller Werte im Bereich von 22,2 bis 561 µg/l. Diese Spannweite stimmt gut mit den Angaben anderer Autoren überein. Strontium konnte in allen Wässern nachgewiesen werden, wobei der geringste gemessene Wert in einer Probe aus dem unbedeckten bis teilbedeckten Malm 1,25 µg/l beträgt. Die höchsten Strontiumwerte werden in den salinen Grundwässern gefunden, wobei auch im Perm, im Muschelkalk und im Keuper überdurchschnittliche Strontiumkonzentrationen gemessen werden. Die niedrigsten Strontiumgehalte weisen die Wässer aus den karbonatischen Grundwasserleitern der Nördlichen Kalkalpen auf.

Thorium (Anhang 2-51)

Bei einer Bestimmungsgrenze von 0,01 µg/l wurde in etwas weniger als der Hälfte aller Grundwässer Thorium gefunden; 25% der Wässer weisen Thoriumgehalte über 0,03 µg/l auf. Abgesehen von den hoch mineralisierten salinen Zechsteinwässern werden die höchsten Thoriumgehalte in den hydrogeologischen Einheiten des Paläozoikums (Median 0,06 µg/l) gefunden. Die Maximalwerte liegen bei den Süßwässern im Bereich von einigen µg/l.

Titan (Anhang 2-52)

In den untersuchten Probenahmestellen wurde Titan bei einer Bestimmungsgrenze von 0,2 µg/l recht häufig verbreitet nachgewiesen. Lediglich in den Wässern aus den karbonatischen Grundwasserleitern der Nördlichen Kalkalpen konnte Titan in über der Hälfte der Proben nicht quantitativ bestimmt werden. Die höchsten Titanwerte werden in den salinen Wässern nachgewiesen, wobei hier Werte von über 1 mg/l erreicht werden. Der Medianwert aller Wässer liegt bei knapp 1 µg/l; in den Süßwässern werden 100 µg/l nur selten überschritten. Mit deutlich überdurchschnittlichen Werten fallen die Wässer aus den triassischen Gesteinseinheiten des nordbayerischen Deckgebirges (Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper) sowie dem Paläozoikum auf.

Thallium (Anhang 2-53)

Thallium konnte in den untersuchten Probenahmestellen bei einer Bestimmungsgrenze von 0,004 µg/l in über der Hälfte der Proben nicht quantitativ bestimmt werden. Die Maximalwerte

in den unterschiedlichen Grundwasserleitern liegen mit wenigen Ausnahmen bei unter 1 µg/l. Relativ höhere Werte wurden in Wässern aus salinaren Einheiten sowie aus der Kreide gefunden. In den Gesteinen der Kreide wurden von LINHARDT & ZARBOK (2002) entsprechend erhöhte Thalliumgehalte gefunden. Die dolomitischen Einheiten der Nördlichen Kalkalpen weisen deutlich höhere Thalliumwerte als die dortigen Kalke auf.

Uran (Anhang 2-54)

Uran ist in der Erdkruste mit 4 mg/kg relativ häufig verbreitet. Es kann in verschiedenen Wertigkeiten auftreten, wobei die höher oxidierten Formen besser löslich sind. Aus anderen Untersuchungen ist bekannt, dass Uran im Grundwasser weit verbreitet und in geringen, jedoch grundwasserleiterspezifisch unterschiedlichen Konzentrationen auftritt (in: MATTHESS 1994). Diese Ergebnisse können durch die hier vorliegende Untersuchung bestätigt werden. Der Median aller Proben liegt bei knapp 0,4 µg/l, wobei 80% aller Messwerte zwischen 0,007 und 2,9 µg/l betragen. Die festgestellten Maximalwerte liegen für die Süßwässer bei einigen Zehner µg/l. Höhere Urankonzentrationen treten vorwiegend in den salinaren Grundwässern auf. Andere Grundwasserleiter mit Uranwerten der Grundwässer deutlich über dem Durchschnitt aller Proben sind insbesondere der Mittlere und Obere Keuper, das Perm, die fluvioglazialen Quartärschotter des Alpenvorlands und die Molasse.

Vanadium (Anhang 2-55)

Vanadium wird im Grundwasser in der Regel mit Gehalten unter 10 µg/l gemessen, wobei in Thermalwässern auch Maximalwerte von einigen Hundert µg/l festgestellt wurden (MATTHESS 1994).

Vanadium ist in den untersuchten Grundwässern recht weit verbreitet nachweisbar. Der Medianwert beträgt 0,26 µg/l; der maximal gemessene Wert von 88,1 µg/l entstammt einer Probe im salinaren Zechstein. Werte über 10 µg/l werden nur vereinzelt in wenigen Grundwasserleitern festgestellt. Lediglich im salinaren Muschelkalk werden häufiger Vanadiumwerte deutlich über 10 µg/l gemessen (90%-Perzentil: 18,86 µg/l). Im Mittel leicht überdurchschnittliche Vanadiumwerte werden in den Wässern aus dem Schichtstufen- und Bruchschollenland, nicht jedoch aus dem überdeckten Malm und der Kreide gemessen. Deutlich unterdurchschnittliche Gehalte finden sich in den Wässern aus dem Paläozoikum.

Yttrium (Anhang 2-56)

MÖLLER et al. (1997) geben für Thermal- und Mineralwässer aus dem Schwarzwald Yttriumwerte von 266 bis 32129 pmol/kg (0,024 bis 2,86 µg/l) an.

Dieser Messbereich stimmt gut mit der Spannweite der hier untersuchten Grundwässer überein. Insgesamt wurde Yttrium recht weit verbreitet gemessen, wobei 90% aller Werte unter 0,2 µg/l betragen (Median: 0,027 µg/l). Überdurchschnittlich hohe Werte werden außer im hoch mineralisierten salinaren Zechstein in den Wässern aus dem Paläozoikum, dem Kristallin, dem Buntsandstein und der Kreide gefunden. Der Maximalwert von 44,3 µg/l stammt von einer Wasserprobe aus dem sauren bis intermediären Kristallin. Die niedrigsten Werte wurden in den Grundwässern aus den dolomitischen Grundwasserleitern der Nördlichen Kalkalpen, den quartären

Grundwasserleitern im Moränenbereich, dem Mittleren und Oberen Keuper und dem Muschelkalk festgestellt.

Zink (Anhang 2-57)

Zink wird im Grundwasser recht verbreitet vorgefunden, wobei die Werte im Allgemeinen 10 µg/l nicht überschreiten (MATTHESS 1994). SCHLEYER & KERNDORFF (1992) fanden in den westdeutschen Grundwässern Medianwerte zwischen <10 und 30 µg/l.

Die Zinkgehalte der untersuchten Grundwasserentnahmestellen liegen im Allgemeinen zwischen 1 und 50 µg/l (Median: 6,5 µg/l). Überdurchschnittliche Zinkgehalte finden sich erneut in den salinaren Wässern; außerdem wurden in den Wässern aus der Kreide der Bodenwöhrer Bucht überdurchschnittliche Zinkgehalte festgestellt.

5 Weiterführende statistische Untersuchungen

Ziel der statistischen Analyse der Daten zur Grundwasserbeschaffenheit ist letztlich die Erhöhung der Prognosegenauigkeit unbeobachteter Werte zur besseren Einschätzung des zu erwartenden (Hintergrund-)Wertebereichs für verschiedene Parameter. Die multivariaten Untersuchungen dienten dabei folgenden Teilzielen:

- Überprüfung der vorgenommenen Unterteilung in hydrogeologische Einheiten
- Aufdecken von Beziehungen zwischen einzelnen Parametern

Die bisher erzielten Ergebnisse können hier nur in Ausschnitten wiedergegeben werden. Eine ausführlichere Darstellung ist als weitere Veröffentlichung in Vorbereitung.

Die Ausscheidung von mehr als 30 verschiedenen hydrogeologischen Einheiten erfolgte primär anhand stratigrafischer und petrografischer Daten (s. Tab. 3-2). Zu überprüfen war, inwiefern diese Unterteilung auch unter rein hydrochemischen Gesichtspunkten sinnvoll ist. Denkbar wäre beispielsweise, dass die Wässer verschiedener Einheiten sich hinsichtlich der Beschaffenheit nicht signifikant unterscheiden, und die betreffenden Einheiten somit sinnvollerweise zusammenzufassen wären. Dies hätte die Vorteile, einerseits die Klassifizierung übersichtlicher zu gestalten, und andererseits den Stichprobenumfang für einzelne Einheiten zu erhöhen. Ein anderer Aspekt, der in diesem Zusammenhang untersucht wurde, ist die Frage, welche Inhaltsstoffe als Leitstoffe bei der Unterscheidung der Einheiten dienen können. Besondere Berücksichtigung finden hierbei die Spurenelemente. Dadurch lassen sich u.U. auch Wässer unklarer Zuordnung oder Mischwässer besser klassifizieren. Außerdem könnte diese Information zur besseren quantitativen Abschätzung anthropogener Beeinträchtigungen genutzt werden.

Voruntersuchungen

In der ersten Phase der multivariaten Untersuchungen wurde die Eignung verschiedener Methoden anhand eines Teildatensatzes überprüft, der Probenahmepunkte aus dem Bereich des Grundgebirges, des Sandsteinkeupers („Keuper“), des Dogger-Eisensandsteins („Dogger“) und des

Malms enthält. Dafür standen Daten von 597 Probenahmestellen mit Messwerten für 38 ausgewählte Parameter zur Verfügung.

Aufgrund der relativ kleinen Datenmenge lassen sich die Ergebnisse übersichtlicher darstellen als für den kompletten Datensatz. Die Ergebnisse entstammen größtenteils der Arbeit von KLAAS (2003). Sie illustrieren einerseits deutlich die Problematik der Klassifizierung, andererseits lässt sich damit auch das Potential der verschiedenen Methoden gut darstellen.

Mittels Diskriminanzanalyse wurde untersucht, wie gut sich die vier Grundwasserleiter anhand der Beschaffenheitsdaten unterscheiden lassen, und welche der 38 untersuchten Parameter dabei entscheidend sind. Tatsächlich lassen sich mit den drei bestimmten Diskriminanzfunktionen 94% der Probenahmestellen richtig zuordnen. Abb. 5-1 zeigt die Werte der Probenahmepunkte für die erste und zweite Diskriminanzfunktion, die Grundgebirge, Keuper und Malm/Dogger auftrennen. Die dritte, hier nicht darstellbare Diskriminanzfunktion trennt die letzten beiden Grundwasserleiter.

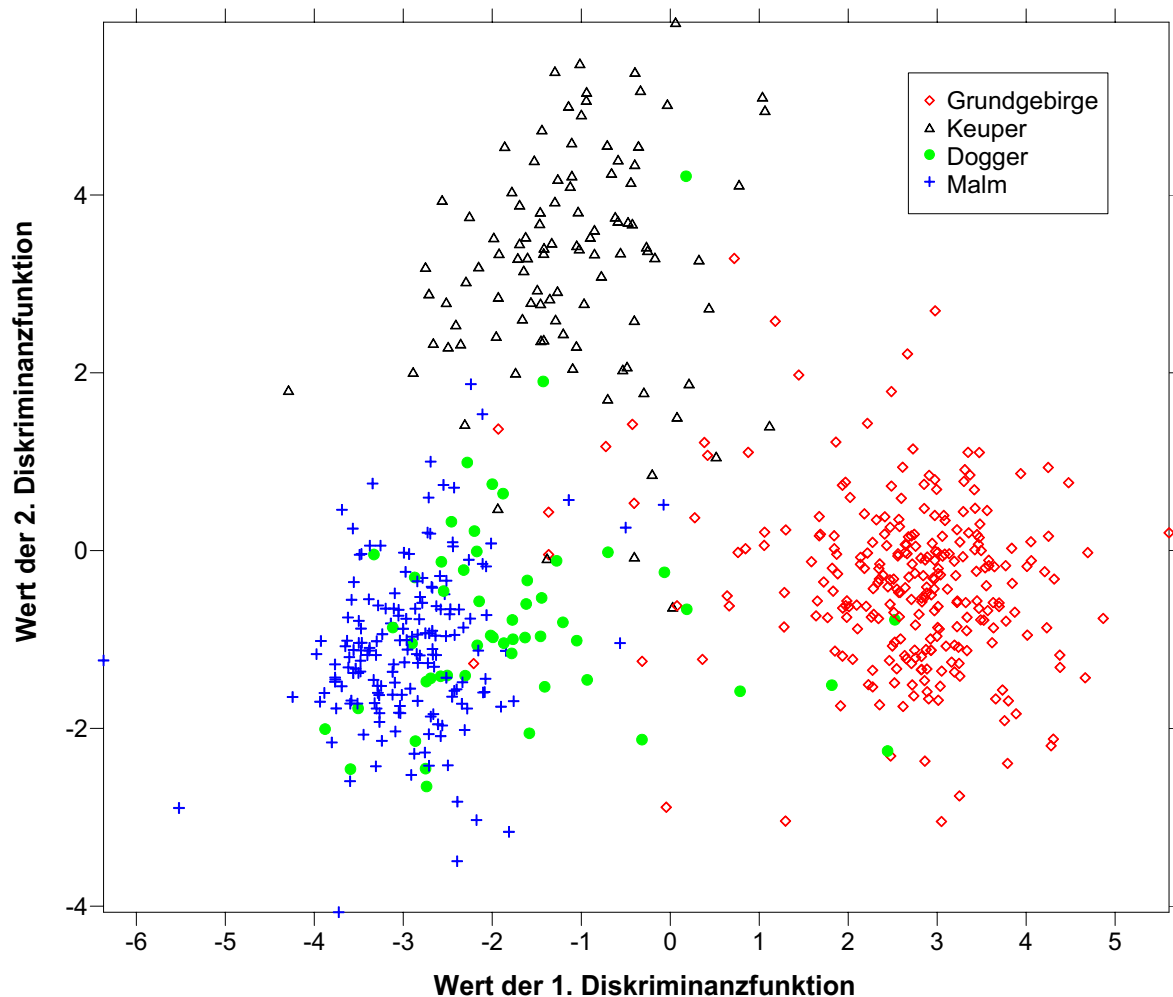


Abb. 5-1: Werte der einzelnen Probenahmepunkte für die erste und zweite Diskriminanzfunktion

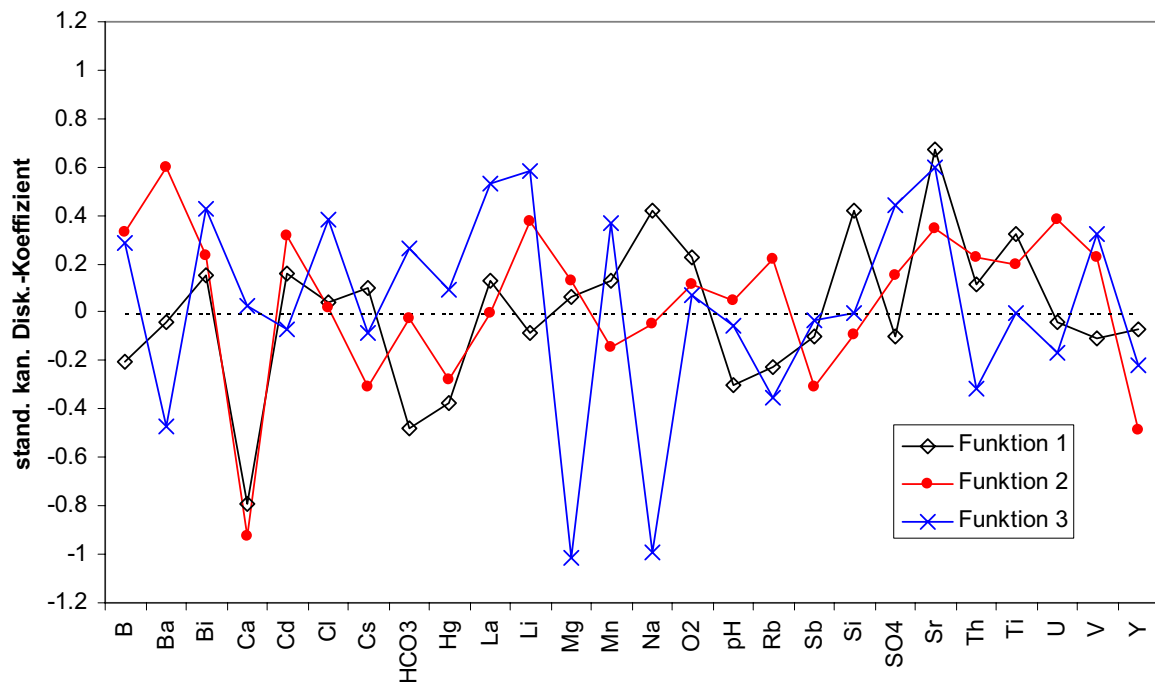


Abb. 5-2: Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten der einzelnen Parameter

Die erste Diskriminanzfunktion trennt das Grundgebirge von den restlichen Grundwasserleitern ab. Hierfür spielen v.a. die Ca-, Sr-, HCO₃-, Si- und Na-Konzentrationen eine wichtige Rolle (Abb. 5-2). Dies sind Parameter, die die karbonatischen von den silikatischen Wässern unterscheiden. Die zweite Diskriminanzfunktion trennt die Keuperwässer ab, wobei neben Ca verschiedenen Spurenelementen, v.a. Ba und Y, eine wichtige Rolle zukommt. Die dritte Diskriminanzfunktion trennt die Doggerwässer von den Malmwässern, hauptsächlich gestützt auf die Mg- und Na-Konzentrationen.

Die anhand stratigrafisch-lithologischer Kriterien vorgenommene Klassifizierung hat also offensichtlich durchaus Relevanz für die Beschaffenheitsdaten. Andererseits stellt sich allerdings die Frage, ob eine Klassifizierung allein aufgrund der Beschaffenheitsdaten eine ähnliche Aufteilung vornehmen würde. Dies wurde anhand der Verfahren der Dimensionsreduktion und der unüberwachten Klassifizierungsverfahren überprüft.

Mittels Korrespondenzanalyse wurde die Dimensionalität des Datensatzes von 38 auf zwei Dimensionen reduziert, wodurch noch 32% der Varianz der Werte erklärt wird. Im Allgemeinen wird solch ein niedriger Wert als problematisch für die Interpretation der Ergebnisse angesehen. Allerdings lassen sich daraus durchaus wichtige Hinweise bezüglich der Klassifizierung des Datensatzes ableiten.

Abb. 5-3 gibt die Ergebnisse der Korrespondenzanalyse für die Spaltenpunkte (Parameter) wieder. Parameter, die in dieser Darstellung eng beieinander liegen, weisen im Datensatz ein ähnliches Verhalten auf. Dies gilt z.B. für die in Karbonat- und salinaren Wässern hohe Werte aufweisenden Parameter HCO₃, pH, Ca, Mg, B, Li und SO₄. Die enge Nachbarschaft von Cl und Na dürfte

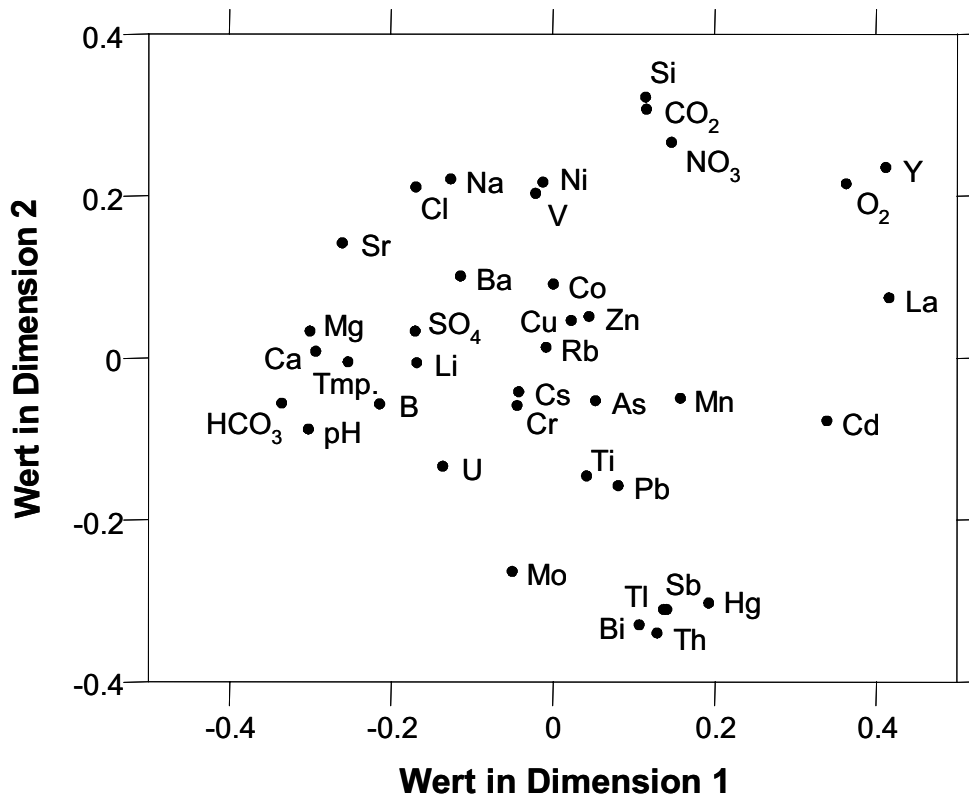


Abb. 5-3: Lage der Spaltenpunkte (Parameter) im zweidimensionalen Diagramm der Korrespondenzanalyse

vor allem durch salinare Wässer geprägt sein, hier könnten u.U. aber auch Streusalzeinträge eine Rolle spielen. Die enge Vergesellschaftung von freier Kohlensäure, Si und NO_3 wird zu einem nicht unwesentlichen Teil durch die nitratfreien und siliciumreichen Sauerlinge in der nördlichen Oberpfalz bestimmt, sowie durch reduzierte Wässer aus dem Bereich des Sandsteinkupers.

Analog gilt für die Darstellung der Zeilenpunkte (Probenahmepunkte), dass die Ähnlichkeiten zwischen einzelnen Probenahmepunkten in Abb. 5-4 in etwa proportional zu ihrem Abstand in der zweidimensionalen Darstellung sind. Dabei ist zu beachten, dass im Gegensatz zur Diskriminanzanalyse die stratigrafisch-lithologische Klassifizierung nicht mit eingeflossen ist. Trotzdem lassen sich die Keuper- und Grundgebirgswässer anhand ihrer Lage in dem Diagramm deutlich unterscheiden, wogegen die Malm- und Doggerwässer sich dazwischen anordnen. Anders als bei der Diskriminanzanalyse (Abb. 5-1) lassen sich letztere allerdings nicht unterscheiden. Dagegen spielt die Lage im Raum eine entscheidende Rolle: Die Doggerwässer entstammen fast ausnahmslos dem Bereich der nördlichen Frankenalb, d.h. nördlich der Linie Berching – Beratzhausen und sind von den Malmwässern aus dem gleichen Gebiet nicht zu unterscheiden. Dies ist offensichtlich darauf zurückzuführen, dass die im Bereich des Doggersandsteins gewonnenen Wässer im Bereich des Malms infiltriert sind und dort ihre hydrochemische Signatur erhielten, die bei der anschließenden Passage durch den Doggersandstein im Liegenden weitgehend erhalten blieb.

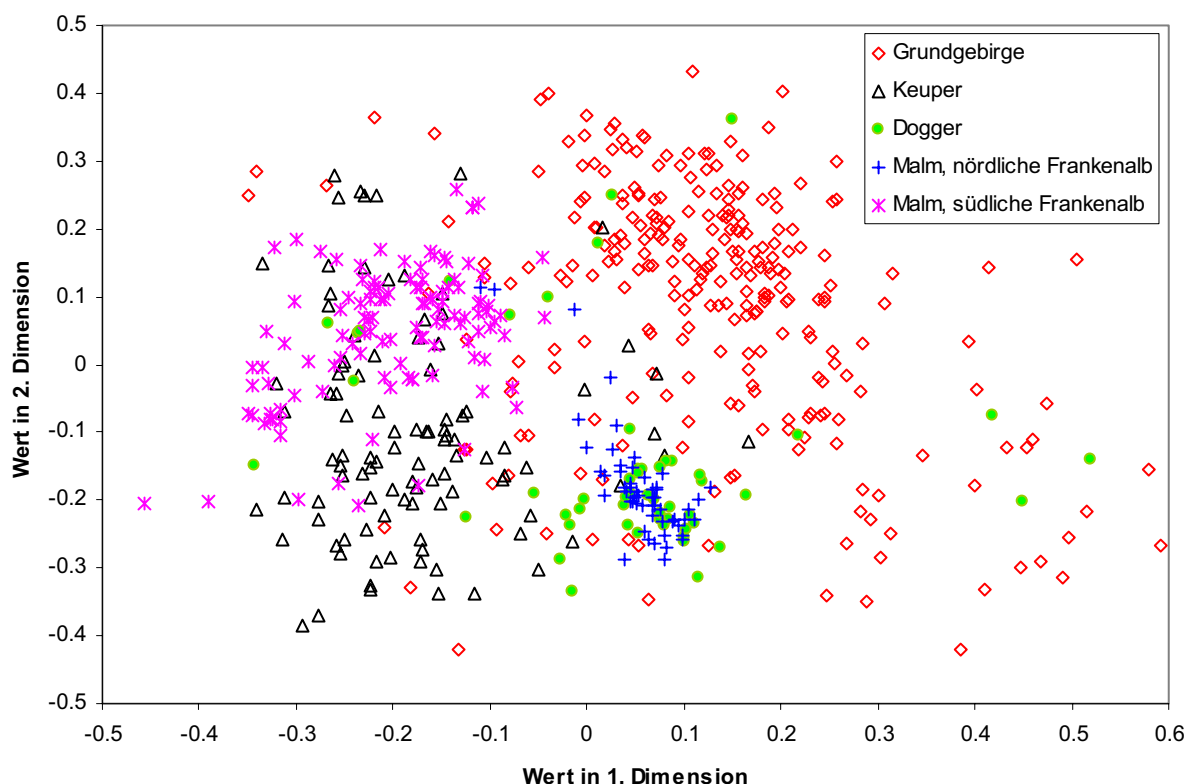


Abb. 5-4: Lage der Zeilenpunkte (Probenahmepunkte) im zweidimensionalen Diagramm der Korrespondenzanalyse

Die Malmwässer der südlichen Frankenalb sind davon deutlich abgesetzt. Die Unterschiede zwischen den Wässern der nördlichen und südlichen Frankenalb sind v.a. bei den Spurenelementen deutlich ausgeprägt. Die Wässer der nördlichen Frankenalb weisen im Vergleich v.a. hohe Bi-, Cd-, Hg-, Sb-, Th-, Ti- und Tl-Konzentrationen auf.

Die Hauptkomponentenanalyse ergab acht Hauptkomponenten mit einem Eigenwert >1 , die zusammen 71% der Varianz erklären (Tab. 5-1). Nur die erste Hauptkomponente weist hohe Ladungen für die Hauptinhaltsstoffe auf, v.a. für Parameter, die typischerweise bei karbonatischen

Tabelle 5-1: Eigenwerte und erklärte Varianz der ersten acht Hauptkomponenten

Hauptkomponente	Eigenwert	% der Varianz	kumulierte Varianz [%]
1	9,16	24,1	24,1
2	5,22	13,7	37,8
3	3,36	8,8	46,7
4	2,94	7,7	54,4
5	2,38	6,3	60,7
6	1,47	3,9	64,6
7	1,32	3,5	68,0
8	1,22	3,2	71,2

Wässern stark erhöht sind (Ca, Mg, HCO₃). Daneben laden aber auch Cl und Na hoch, die eher auf salinare Wässer verweisen. Diese Parameter werden auch in der Korrespondenzanalyse in enger Nachbarschaft angeordnet (Abb. 5-3). Die hohe Ladung der Wassertemperatur ist mit den höheren Temperaturen der Malm- und Doggerwässer im Vergleich zu den oberflächennahen Grundgebirgswässern zu erklären (Abb. 5-5).

Die dritte Hauptkomponente weist stark negative O₂- und NO₃-Ladungen, sowie hohe Ladungen für Rb, Cs und Li auf. Die restlichen Hauptkomponenten werden fast ausschließlich von Spurenelementen bestimmt. Auffallend sind die fünfte Hauptkomponente mit hohen Ladungen für Co und Ni, und die sechste mit hohen Ladungen für Cu, Zn und Pb, die oft in ähnlichen Vergesellschaftungen als Erze vorgefunden werden.

Ohne großen Informationsverlust lassen sich die Probenahmepunkte anstelle der gemessenen Parameter durch diese acht voneinander unabhängigen Hauptkomponenten charakterisieren. Damit wurde eine hierarchische Clusteranalyse durchgeführt. Dabei ergab sich eine recht gleichmäßige Zunahme der Streuung (quadrierte euklidische Distanzen der einzelnen Probenahmepunkte vom jeweiligen Clusterzentrum) mit abnehmender Zahl der Cluster. Es zeigte sich jedoch ein relativ starker Anstieg der Streuung beim Übergang von sieben auf sechs Cluster. Im zweiten Schritt wurde deshalb eine Clusterzentrenanalyse für sieben Cluster durchgeführt.

Zwischen 50 und 70% der Keuper-, Dogger- und Malmwässer wurden jeweils einem dominierenden Cluster zugeordnet. Die Grundgebirgswässer wurden im Wesentlichen auf die Cluster 4, 6 und 7 aufgeteilt (Abb. 5-6). Umgekehrt werden die meisten Cluster zu 75% oder mehr von einzelnen Grundwasserleitern dominiert. Lediglich die Cluster 2 und 3 werden zu annähernd gleichen Teilen von Dogger- und Malmwässern, bzw. Grundgebirgs- und Malmwässern bestimmt.

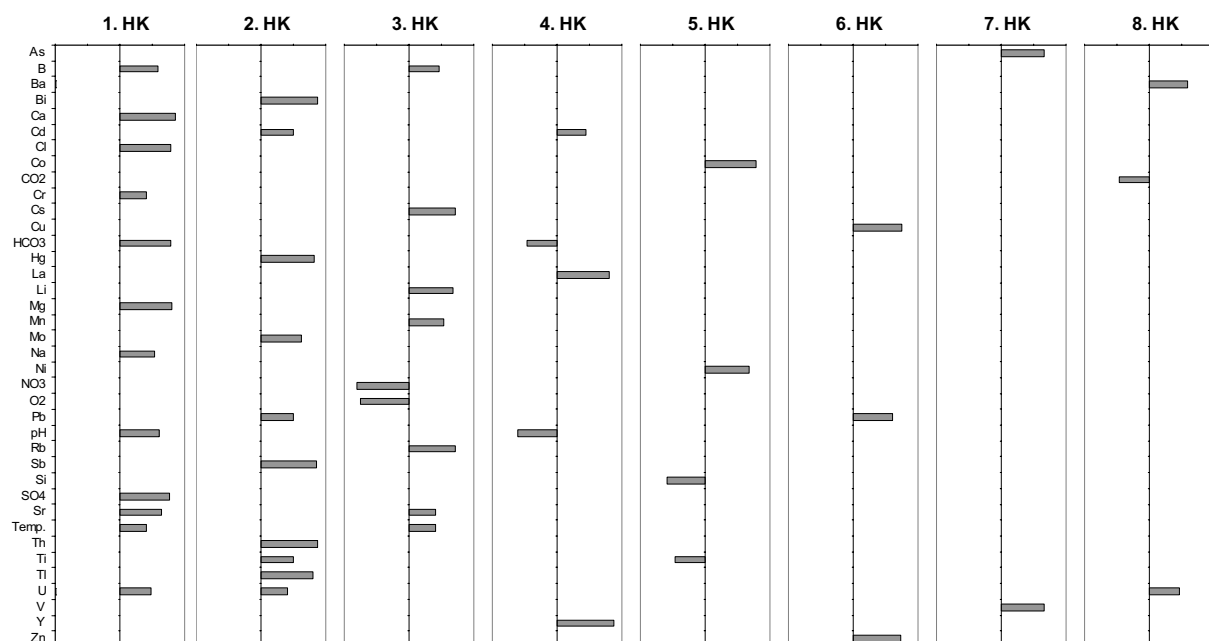


Abb. 5-5: Ladungen der ersten acht Hauptkomponenten (Wertebereich jeweils [-1; 1]). Der Übersichtlichkeit halber sind nur Ladungen dargestellt, deren Betrag größer als 0,4 ist.

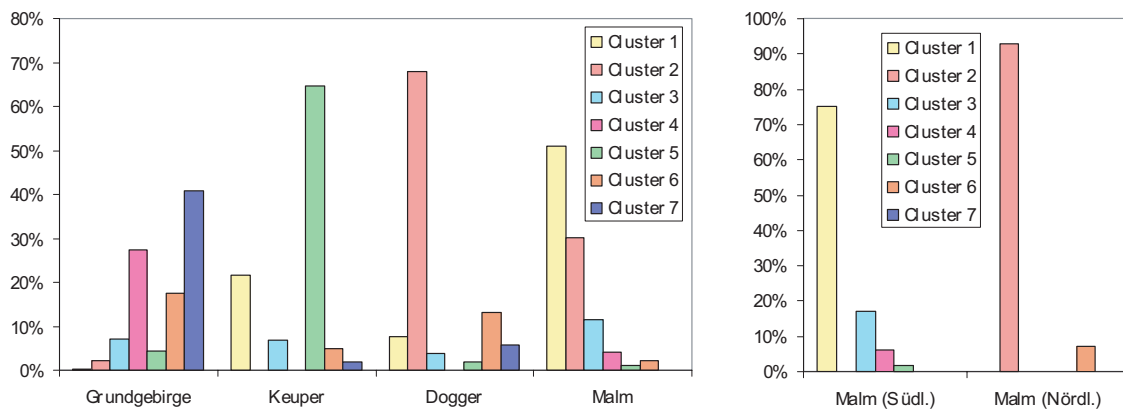


Abb. 5-6: Prozentuale Aufteilung der Probenahmepunkte der vier Hauptgrundwasserleiter (links) bzw. des Malm der südlichen und der nördlichen Frankenalb (rechts) auf 7 Cluster (Clusterzentrenanalyse)

Bei detaillierterer Betrachtung wird auch die bereits bei der Korrespondenzanalyse aufgefallene Unterteilung der Malmwässer bestätigt. Die Malmwässer der südlichen Frankenalb werden überwiegend in das Cluster 1 eingeordnet, auf das auch ein wesentlicher Anteil der Keuperwässer entfällt. Die Wässer der nördlichen Frankenalb werden hingegen zu über 90% dem Cluster 2 zugeordnet, in das auch die Mehrzahl der Doggerwässer eingruppiert wird.

Zusammenfassend lässt sich Folgendes festhalten:

1. Die auf der Basis stratigrafisch-lithologischer Kriterien vorgenommene Klassifizierung der Grundwasserleiter lässt sich anhand der Beschaffenheitsdaten bestätigen (Diskriminanzanalyse). Für die Abtrennung der Grundwasserleiter erwiesen sich einzelne Spurenelemente (Sr, Ba, Y) als essenziell.
2. Wesentlich deutlicher als die Unterschiede zwischen den stratigrafisch-lithologischen Einheiten Malm und Dogger erwiesen sich allerdings die zwischen der nördlichen und der südlichen Frankenalb (Korrespondenzanalyse). Hierfür sind eine Reihe von Spurenelementen verantwortlich, während die Unterschiede bei den Hauptinhaltsstoffen nicht ins Gewicht fallen.
3. Die ermittelten Hauptkomponenten der Faktorenanalyse lassen sich hydrochemisch gut interpretieren. Hauptinhaltsstoffe spielen nur für zwei der acht Hauptkomponenten eine Rolle. Die stratigrafisch-lithologische Klassifizierung des Datensatzes wird von der Clusteranalyse in etwa bestätigt. Eine detailliertere Analyse bestätigt allerdings die von der Korrespondenzanalyse aufgedeckte Unterteilung der Malmwässer, sowie die Ähnlichkeit der Dogger- und Malmwässer der nördlichen Frankenalb.

Die Ergebnisse weisen auf die Bedeutung räumlicher Trends innerhalb einzelner hydrogeologischer Einheiten hin, zu deren Beschreibung sich geostatistische Methoden anbieten. Untersuchungen dazu sind aber noch in Arbeit.

Kompletter Datensatz

Von den über 5.700 Probenahmepunkten des kompletten Datensatzes wurden verschiedene Teildatensätze mit möglichst wenigen Fehlstellen ausgewählt. Im Folgenden werden die Ergebnisse des 17 Parameter und 5.441 Probenahmepunkte umfassenden Datensatzes dargestellt. Analog wurde auch ein aus 51 Parametern und 2.932 Probenahmepunkten bestehender Teildatensatz untersucht. Da die Ergebnisse des letzteren denen des ersten Teildatensatzes sehr ähnlich sind, wird an dieser Stelle auf eine umfassende Darstellung verzichtet.

Tabelle 5-2: Eigenwerte und erklärte Varianz der ersten vier Hauptkomponenten des kompletten Datensatzes (17 Parameter)

Komponente	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte Varianz [%]
1	4,780	28,2	28,2
2	2,68	15,8	44,0
3	2,04	12,0	55,9
4	1,21	7,1	63,1

Parameter, die sehr eng mit einzelnen (z.B. Sauerstoffgehalt und Sauerstoffsättigung) oder mehreren anderen Parametern (z.B. Karbonathärte, Gesamtmineralisation, spezifische elektrische Leitfähigkeit) korreliert sind, wurden von der Analyse ausgenommen. Für die Hauptkomponentenanalyse und die Diskriminanzanalyse wurden einzelne fehlende Werte durch den Mittelwert für den jeweiligen Parameter ersetzt. Mit Ausnahme der Selbstorganisierenden Karte wurden nur die 27 hydrogeologischen Einheiten berücksichtigt, für die Daten von jeweils mindestens 20 Probenahmepunkten vorlagen.

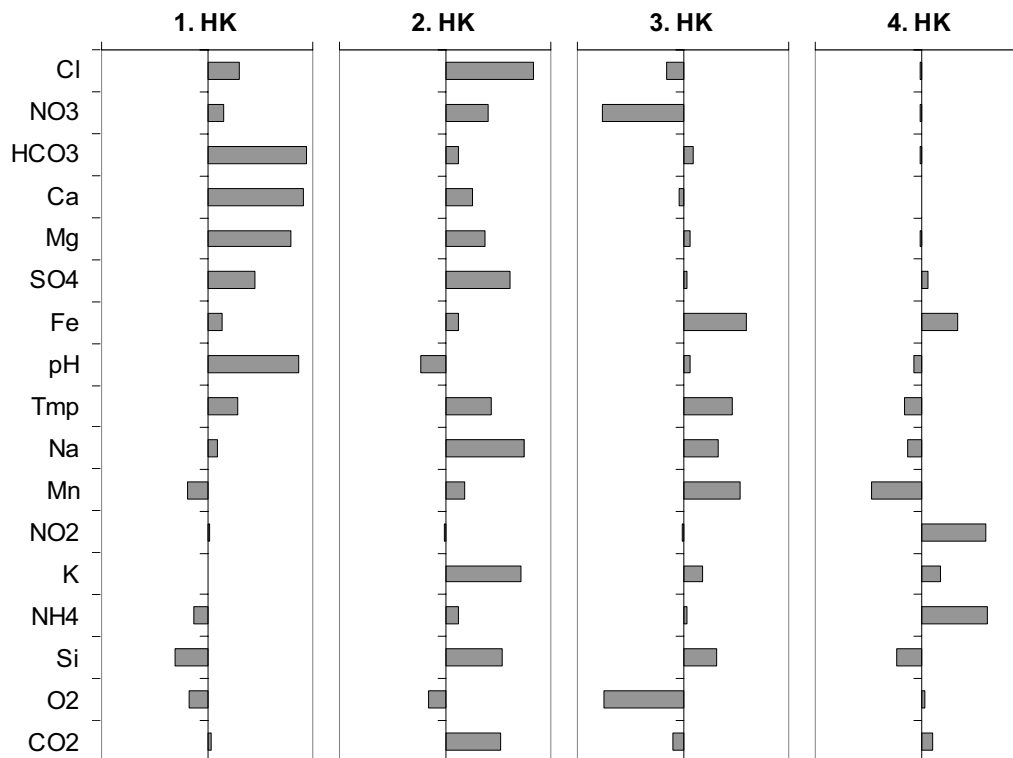


Abb. 5-7: Ladungen der ersten vier Hauptkomponenten (Wertebereich jeweils [-1; 1])

Tabelle 5-3: Durch Diskriminanzanalyse vorgenommene Zuordnung der einzelnen Probenahmestellen zu den hydrogeologischen Einheiten (Nummerierung s. Tab. 3-1). Angegeben ist jeweils der Prozentsatz der Gesamtzahl der Probenahmepunkte der jeweiligen Einheit; die Anzahl der Probenahmestellen ist in der letzten Spalte angegeben. Der Übersichtlichkeit halber sind Werte <5% grau, zwischen 5% und 10% blau, zwischen 10% und 20% lila, und Werte > 20% rot wiedergegeben.

	1.1	1.3	1.4	3.1	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.10	3.11	3.12	3.13	3.14	3.15	5	6.1	6.2	6.3	6.4	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	Anzahl
Hydrogeologische Einheit	1.1	1.3	1.4	3.1	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.10	3.11	3.12	3.13	3.14	3.15	5	6.1	6.2	6.3	6.4	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	Anzahl
1.1	50	11	11	4	6	0	0	0	0	0	0	0	9	2	0	0	4	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	91
1.3	4	76	7	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	730
1.4	7	5	75	5	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57
3.1	0	0	4	59	7	0	0	0	0	4	7	0	0	0	7	0	0	7	0	4	0	0	0	0	0	0	0	27
3.3	8	10	1	5	47	3	1	1	1	9	1	1	1	1	0	1	4	2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	294
3.4	0	0	0	1	0	37	1	27	1	2	5	1	6	0	0	1	8	4	0	5	0	0	0	0	0	0	0	146
3.5	0	0	0	0	0	8	84	0	7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76
3.6	0	0	0	1	1	13	1	61	4	4	0	0	2	1	0	0	3	3	0	6	0	0	0	0	0	0	0	163
3.7	0	0	0	0	0	5	19	0	70	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57
3.8	0	1	0	6	5	6	1	4	2	36	5	2	3	5	4	1	6	4	1	4	6	1	0	0	0	0	0	510
3.10	0	0	0	7	0	3	0	0	3	0	53	13	0	0	0	3	10	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	30
3.11	0	2	0	2	3	0	0	0	0	0	14	48	10	4	3	3	3	2	0	1	0	2	0	0	0	0	0	249
3.12	0	0	0	0	0	1	0	4	0	2	4	12	36	1	0	15	1	15	4	5	0	0	0	0	1	0	0	655
3.13	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	3	0	62	2	7	0	4	0	7	12	0	0	0	0	0	0	68
3.14	0	9	0	3	0	0	0	0	3	3	0	6	0	0	74	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35
3.15	0	0	0	4	0	0	0	2	0	0	0	0	4	4	0	67	0	7	4	7	0	0	0	0	0	0	0	45
5	0	4	0	4	6	8	2	3	3	3	4	5	0	1	3	9	40	2	0	0	1	3	0	0	1	0	0	103
6.1	0	0	0	0	0	4	0	5	1	4	2	0	4	3	0	3	7	37	12	6	0	5	0	2	1	0	2	667
6.2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	4	1	0	2	0	17	35	4	12	12	3	2	8	7	1	260
6.3	0	1	1	5	2	4	0	7	0	3	1	2	2	5	0	3	4	4	2	36	12	3	1	0	0	0	0	263
6.4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	9	0	1	1	2	0	23	57	0	0	0	0	0	0	453
7.1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	17	0	2	67	5	3	0	2	0	58
7.2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	9	53	21	9	0	0	34
7.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	3	0	0	3	15	67	5	0	0	60
7.4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	3	1	8	3	54	25	3	137
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	2	5	79	8	66
7.6	0	0	2	0	0	0	2	0	7	0	0	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	0	23	55	60

Tabelle 5-4: Durch Lernende Vektorquantisierung vorgenommene Zuordnung der einzelnen Probenahmestellen zu den hydrogeologischen Einheiten (Nummerierung s. Tab. 3-1). Angegeben ist jeweils der Prozentsatz der Gesamtzahl der Probenahmepunkte der jeweiligen Einheit; die Anzahl der Probenahmestellen ist in der letzten Spalte angegeben. Der Übersichtlichkeit halber sind Werte <5% grau, zwischen 5% und 10% blau, zwischen 10% und 20% lila, und Werte > 20% rot wiedergegeben.

	1.1	1.3	1.4	3.1	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.10	3.11	3.12	3.13	3.14	3.15	5	6.1	6.2	6.3	6.4	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	Anzahl
1.1	32	27	1	0	26	0	0	0	0	4	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	91
1.3	0	90	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	730
1.4	4	67	23	0	4	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57
3.1	4	22	7	11	22	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	27
3.3	0	19	0	0	64	1	0	0	0	7	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	294
3.4	0	0	0	0	0	35	3	22	1	12	1	1	5	1	0	1	4	8	0	3	2	0	0	0	0	0	0	146
3.5	0	0	0	0	0	4	88	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	76
3.6	0	1	1	0	1	2	4	72	1	7	0	0	1	1	0	0	1	2	0	3	2	0	0	0	0	0	0	163
3.7	0	0	0	0	0	2	19	4	67	4	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57
3.8	2	5	1	1	4	1	0	1	1	58	0	2	3	1	1	0	0	4	0	1	14	0	0	0	0	0	0	510
3.10	0	0	3	0	7	0	3	0	3	7	30	17	13	0	0	0	0	7	0	0	7	0	0	0	0	0	0	30
3.11	1	5	0	0	4	0	0	0	0	4	0	49	18	1	1	0	0	4	1	0	4	0	1	3	0	0	1	249
3.12	0	0	0	0	2	1	0	0	0	15	0	8	57	3	0	0	1	10	2	0	4	0	0	1	0	0	0	655
3.13	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	3	3	56	0	0	0	7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	68
3.14	3	23	0	0	6	0	0	0	0	17	0	3	0	0	43	0	0	7	0	3	0	0	0	0	3	0	0	35
3.15	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	11	38	7	0	18	2	9	0	0	9	0	0	0	0	0	0	45
5	2	11	0	1	5	2	3	2	0	5	2	4	6	2	0	0	40	4	0	2	6	0	0	0	2	0	3	103
6.1	0	0	0	0	1	5	1	3	0	6	0	3	18	1	0	1	2	33	10	2	4	1	0	1	2	1	2	667
6.2	1	0	0	0	3	3	0	0	0	3	1	3	13	1	0	1	1	12	28	17	30	3	3	3	9	4	2	260
6.3	0	5	1	0	3	1	2	8	0	13	1	2	4	0	0	1	0	6	2	2	30	0	2	2	0	0	0	263
6.4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4	0	0	1	2	0	0	2	0	2	86	0	0	0	0	0	0	0	453
7.1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	5	22	2	0	0	2	7	10	0	7	33	2	2	3	2	0	58
7.2	6	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	6	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	71	6	0	0	3	34
7.3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	3	0	2	0	8	62	17	2	0	60
7.4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	3	1	4	1	0	0	0	0	0	1	1	2	1	4	4	64	7	1	137
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	2	0	0	0	3	0	2	2	18	62	2	66
7.6	0	0	0	0	0	2	8	0	5	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	3	5	8	7	58	60

Die Hauptkomponentenanalyse extrahierte vier Hauptkomponenten mit Eigenwerten >1 , die zusammen 63% der Varianz erklären (Tab. 5-2). Ähnlich wie in der Voruntersuchung laden v.a. die für karbonatische Wässer charakteristischen Parameter Ca, Mg, HCO_3 und pH-Wert hoch auf der ersten Hauptkomponente (Abb. 5-7). Die zweite Hauptkomponente wird v.a. durch Cl, SO_4 , Na, K und Si bestimmt. Die dritte Hauptkomponente weist stark negative Ladungen für O_2 und NO_3 , und stark positive Ladungen für Fe und Mn auf, die für reduzierte Wässer typisch sind. Auf der vierten Hauptkomponente laden v.a. NO_2 und NH_4 hoch.

Mittels Diskriminanzanalyse wurden 17 Diskriminanzfunktionen bestimmt, die einen signifikanten Beitrag zur Klassifizierung leisten. Damit wurden 50% aller Probenahmepunkte korrekt klassifiziert. Gehäuft auftretende fehlerhafte Zuordnungen weisen auf geringe Unterschiede zwischen den jeweiligen Einheiten hin (Tab. 5-3). Dies ist z.B. bei den Einheiten 3.4 (Muschelkalk karbonatisch-klastisch) und 3.6 (Unterer Keuper), 3.10 (Lias) und 3.11 (Dogger), 3.12 (Malm unbedeckter bis teilbedeckt) und 6.1 (Quartärschotter karbonatisch), 6.1 (Quartärschotter karbonatisch) und 6.2 (Quartär, Moränen), 6.2 (Quartär, Moränen) und 7.1 (Faltenmolasse), 6.3 (Vorlandmolasse seicht) und 6.4 (Vorlandmolasse tief), sowie zwischen den Einheiten 7.1 bis 7.6 (verschiedene alpine Gesteinseinheiten, Helvetikum und Flysch) der Fall.

Die Ergebnisse der Lernenden Vektorquantisierung werden analog zu denen der Diskriminanzanalyse dargestellt. Da für erstere keine Normalverteilung erforderlich ist, wurden hierfür die nicht logarithmierten Werte verwendet. Der Anteil der korrekten Zuordnungen ist mit 56% etwas höher als bei der Diskriminanzanalyse. Im Wesentlichen ergibt sich trotz der unterschiedlichen Verfahren ein der Diskriminanzanalyse sehr ähnliches Bild (Tab. 5-4). Allerdings wurden bei der Lernenden Vektorquantisierung falsch klassifizierte Probenahmestellen überwiegend wenigen hydrogeologischen Einheiten zugeordnet, während sich die Fehlklassifikationen der Diskriminanzanalyse stärker auf verschiedene Einheiten verteilen.

Offensichtlich überlappen sich die Wertebereiche der Parameter für die verschiedenen Einheiten so stark, dass sie mit den Methoden der überwachten Klassifizierung nicht sauber getrennt werden können. Dennoch könnten sich die Verteilungen verschiedener Parameter im Vergleich dieser Einheiten signifikant voneinander unterscheiden, was sich z.B. in signifikant unterschiedlichen Perzentilwerten manifestieren würde. Dies wurde mit der Selbstorganisierenden Karte untersucht. Die Verwendung der Selbstorganisierenden Karte anstelle der zunächst verwendeten Korrespondenzanalyse hat sich als vorteilhaft erwiesen, da erstere bei großen Datensätzen glattere und einfacher zu interpretierende Strukturen bei vergleichbarer Erklärungsleistung (Anteil erklärter Varianz) liefert. Die Ergebnisse werden ähnlich wie für die Korrespondenzanalyse (s.o.) visuell dargestellt.

Zusätzlich wurde auch die Verteilung der Probenahmestellen der einzelnen Einheiten im zweidimensionalen Raum der Grafik auf signifikante Unterschiede geprüft. Dafür wurde der Kolmogorov-Smirnov-Z-Test verwendet. Damit ist es möglich, signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Einheiten auch bei starker Überlappung zu identifizieren. Für die Selbstorganisierende Karte wurden zwar auch Einheiten mit weniger als 20 Probenahmepunkten verwendet, für den Test auf signifikante Unterschiede wurden sie aber nicht berücksichtigt.

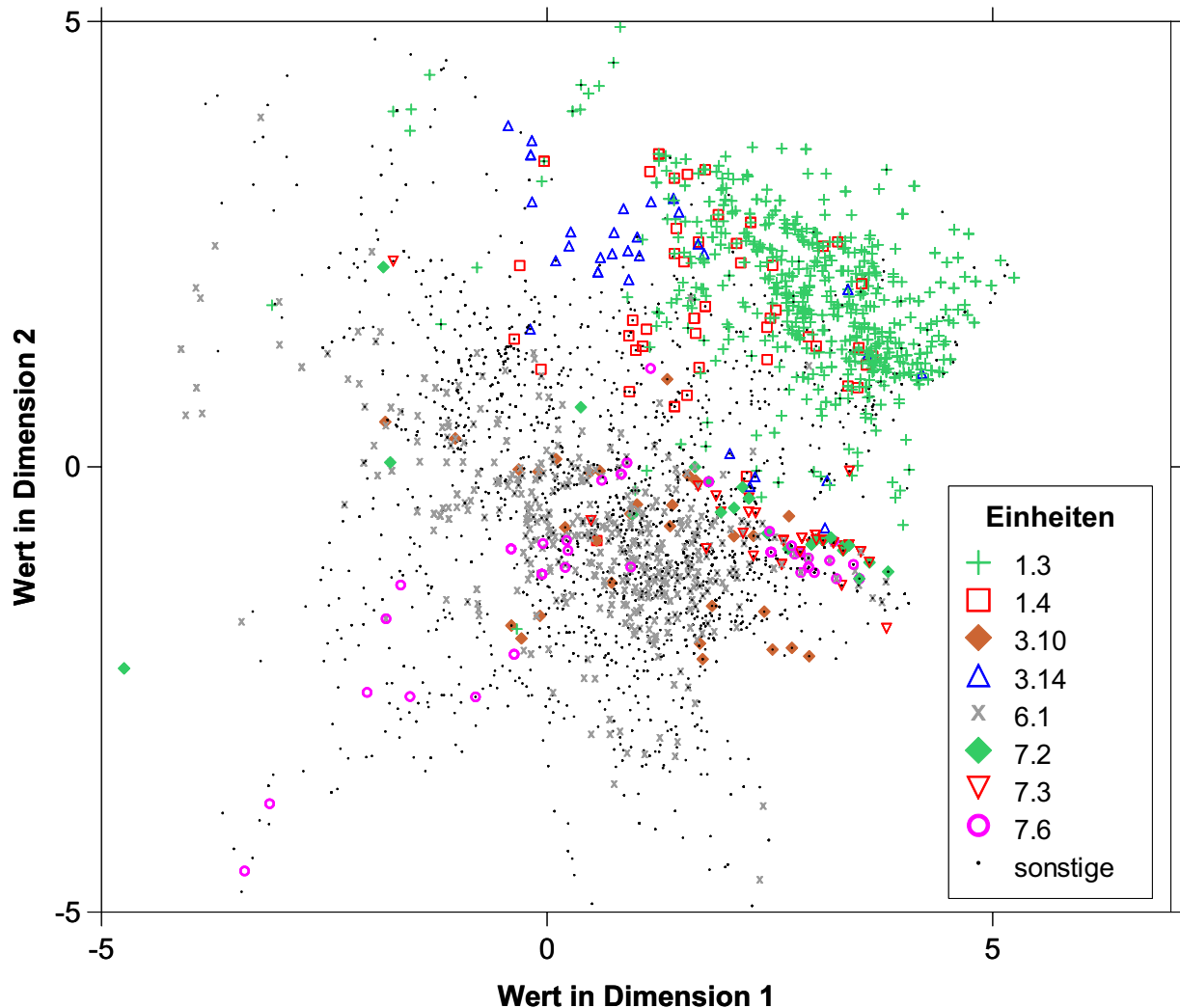


Abb. 5-8: Lage der Probenahmepunkte ausgewählter hydrogeologischer Einheiten in der Selbstorganisierenden Karte (1.3 Kristallin sauer bis intermediär, 1.4 Kristallin basisch bis ultrabasisch, 3.10 Lias, 3.14 Kreide, 6.1 Quartärschotter karbonatisch, 7.2 Helvetikum, 7.3 Flysch, 7.6 Kalkalpen salinar)

Als Maß für die Güte der Selbstorganisierenden Karte wurde das Bestimmtheitsmaß, d.h. das Quadrat der Pearson-Korrelation zwischen den Abständen aller Punkte zueinander in der zweidimensionalen Abbildung der Selbstorganisierenden Karte und der jeweiligen euklidischen Distanz im 17-dimensionalen Raum der Daten berechnet; es beträgt 0.69. Der Anteil der erklärten Varianz ist damit noch höher als der der ersten vier Komponenten der Hauptkomponentenanalyse (s.o.) und belegt die Vorzüge des nicht-linearen gegenüber dem linearen Verfahren der Dimensionsreduktion.

Die Lage der Probenahmestellen in der Selbstorganisierenden Karte wird in Abb. 5-8 gezeigt. Der Übersichtlichkeit halber ist nur der zentrale Teil dargestellt. Einzelne hydrogeologische Einheiten sind markiert. Wie vermutet, überlappen sich die Bereiche fast aller Einheiten sehr stark. Trotzdem lassen sich die Schwerpunkte der Verteilungen der Probenahmepunkte i.d.R. gut unterscheiden. So grenzen sich beispielsweise die Einheiten 1.3 und 1.4 (verschiedene Ein-

Die Untersuchung auf signifikante Unterschiede der Verteilungen der Parameterwerte zwischen den Einheiten wurde nicht für alle Parameter einzeln durchgeführt, sondern für die Koordinaten der entsprechenden Knotenvektoren in der Selbstorganisierenden Karte. Unterscheiden sich diese zwischen verschiedenen Einheiten signifikant, so lässt sich daraus, unter Berücksichtigung des Netzwerkfehlers, auch auf signifikante Unterschiede zwischen den Verteilungen vieler Parameter schließen. Der Umkehrschluss gilt jedoch u.U. für stark anisotrope Verteilungen im zweidimensionalen Raum der Selbstorganisierenden Karte nicht. Da einerseits aber die meisten Verteilungen keine deutliche Anisotropie aufweisen und andererseits die meisten Unterschiede ohnehin signifikant waren, wurde auf eine detailliertere Untersuchung verzichtet.

Tabelle 5-5: Mittels Kolmogorov-Smirnov-Z-Test bestimmte Irrtumswahrscheinlichkeit der Ablehnung der Nullhypothese, dass die Einheiten sich hinsichtlich der Rechtswerte oder Hochwerte der Datenvektoren in der Selbstorganisierenden Karte signifikant unterscheiden. Der Übersichtlichkeit halber sind die Werte zusätzlich farbig kodiert. Grau: Werte $<0,01$; blau: Werte zwischen 0,01 und 0,05; lila: Werte zwischen 0,05 und 0,1, rot: Werte größer 0,1. Zusätzlich ist die Anzahl der Probenahmestellen (kursiv) angegeben.

[illegible]

Probenahmestellen gefunden, so dass die Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren sind. Die starken Ähnlichkeiten zwischen den Einheiten 7.2 (Helvetikum) und 7.3 (Flysch) sind allerdings auf sehr ähnliche lithologische und hydrogeologische Eigenschaften zurückzuführen. Entsprechend sind auch die Ähnlichkeiten der salinaren Fazies des Muschelkalks (Einheit 3.5) und des Mittleren Keupers (Einheit 3.7) anhand der Petrografie der Grundwasserleiter zu erklären. Die Proben aus dem Lias (Einheit 3.10) hingegen weisen trotz des geringen Stichprobenumfangs eine sehr große Streuung auf (Abb. 5-8), die die Aufdeckung signifikanter Unterschiede zu weiteren hydrogeologischen Einheiten erschwert.

Die Darstellung in der Selbstorganisierenden Karte lässt sich auch für detailliertere Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen verschiedenen Einheiten nutzen. So werden beispielsweise die Wässer aus der tiefen Molasse (Einheit 6.4) in der Selbstorganisierenden Karte im Vergleich zu denen der seichten Molasse (Einheit 6.3) stärker in der linken oberen Ecke der Grafik angeordnet. Das Gleiche gilt für den Vergleich zwischen den Wässern aus dem vollständig überdeckten Malm (Einheit 3.13) und dem unbedeckten bis teilbedeckten Malm

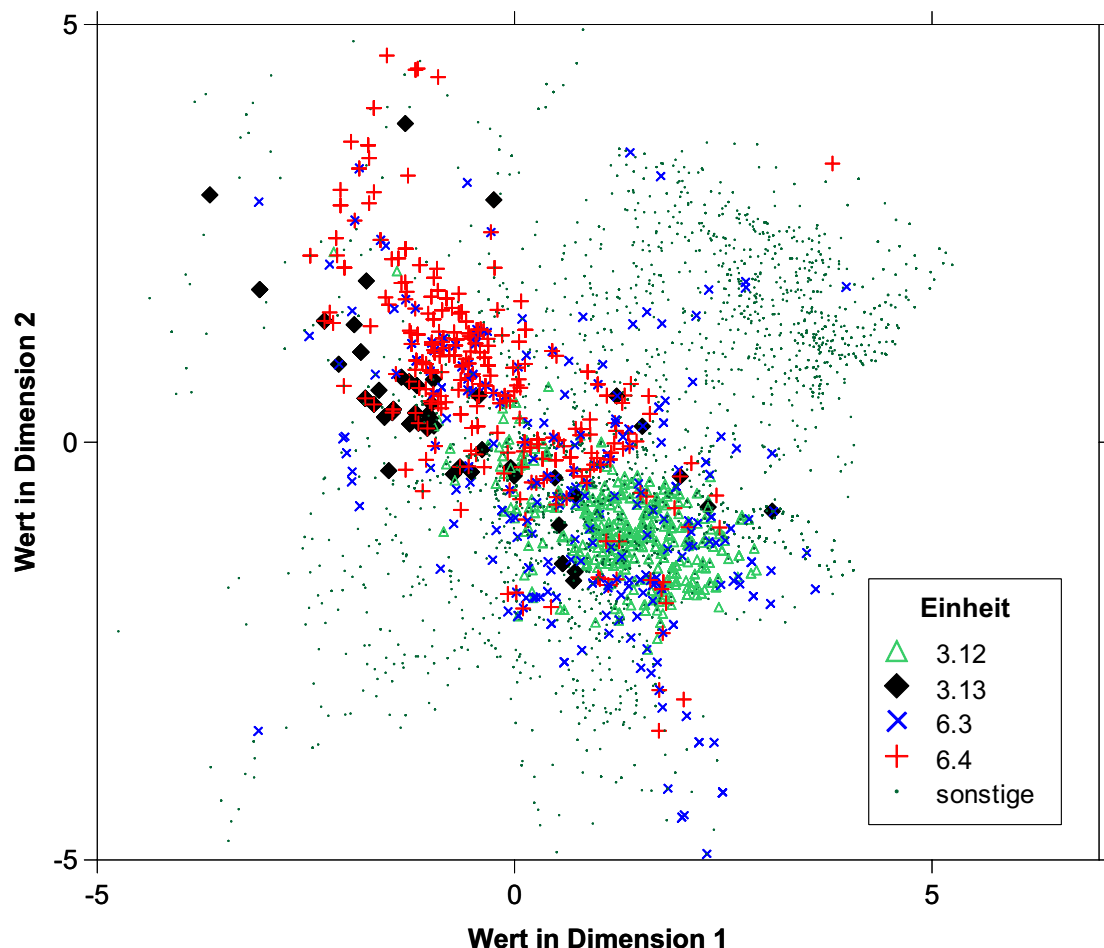


Abb. 5-9: Lage der Probenahmepunkte der Einheiten 3.12 (Malm, nicht oder teilüberdeckt), 3.13 (Malm, überdeckt), sowie 6.3 (Tertiär, seichte Molasse) und 6.4 (Tertiär, tiefe Molasse) in der Selbstorganisierenden Karte

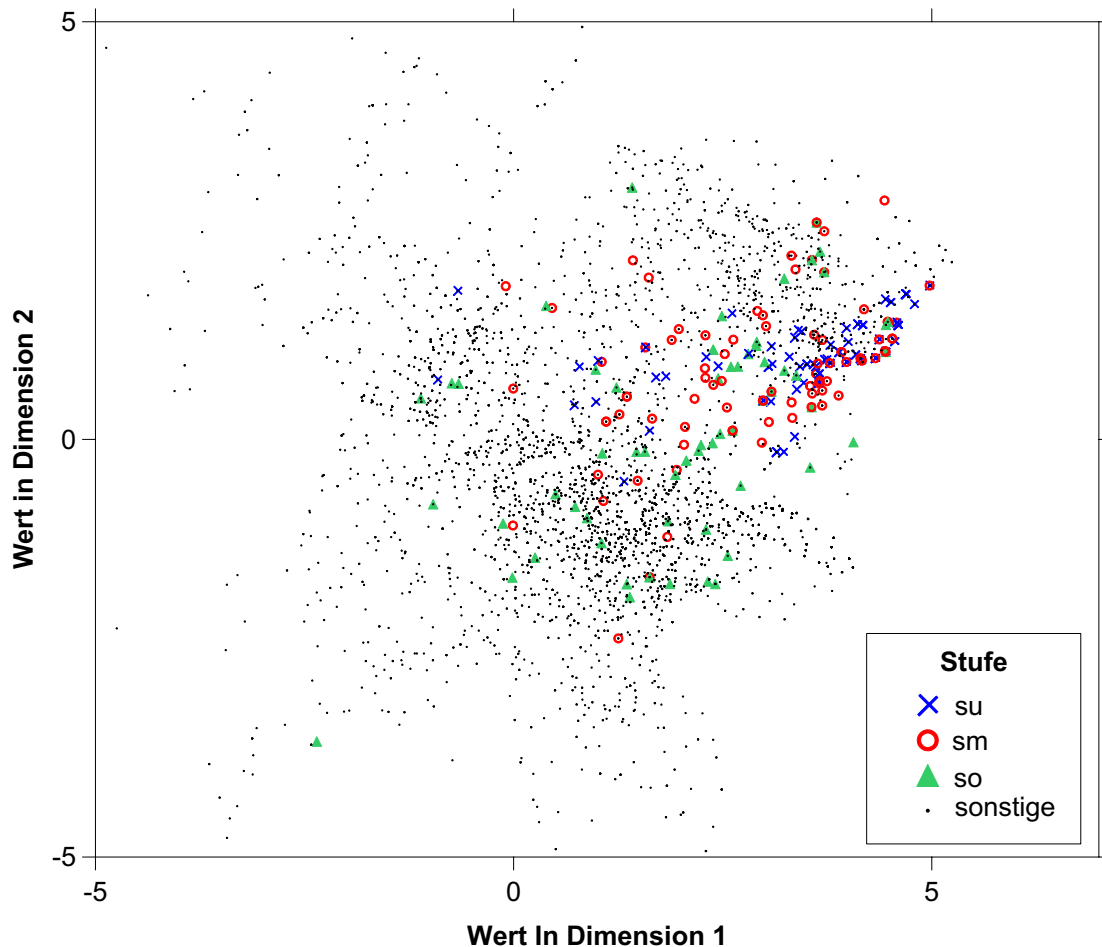


Abb. 5-10: Lage der Probenahmepunkte des Unteren (su), Mittleren (sm) und Oberen (so) Buntsandsteins in der Selbstorganisierenden Karte

(Einheit 3.12). Die Ähnlichkeit zwischen den Wässern des vollständig überdeckten Malms und der tiefen Molasse kann auch darauf zurückgeführt werden, dass ersterer überwiegend aus der überlagernden Molasse gespeist wird (ANDRES & FRISCH 1981, LEMCKE & TUNN 1956). Andererseits sind die Wässer beider Einheiten im Vergleich zum unbedeckten bis teilbedeckten Malm und zur seichten Molasse v.a. durch stärker reduzierte Bedingungen gekennzeichnet (vgl. Abb. 5-12).

Eine weitere Frage betrifft die Homogenität des Probenkollektivs im Buntsandstein. KUNKEL et al. (2002) untersuchten Grundwässer ausgewählter hydrostratigraphischer Einheiten ganz Deutschlands. Sie fanden signifikante Unterschiede zwischen dem Oberen Buntsandstein einerseits, und dem Unteren und Mittleren Buntsandsteins andererseits. Dies könnte auf die v.a. im norddeutschen Raum ausgeprägten litho-faziellen Unterschiede zurückzuführen sein, die im bayerischen Raum aber weniger deutlich vorhanden sind. In der Selbstorganisierenden Karte werden die Probenahmepunkte des Oberen Buntsandsteins tatsächlich größtenteils im Bereich des Unteren und Mittleren Buntsandsteins angeordnet. Einige Probenahmepunkte heben sich allerdings deutlich davon ab und werden den stärker karbonatischen Wässern zugeordnet (Abb. 5-10). Hierbei handelt es sich fast ausnahmslos um Probenahmestellen aus dem Spessart, die in

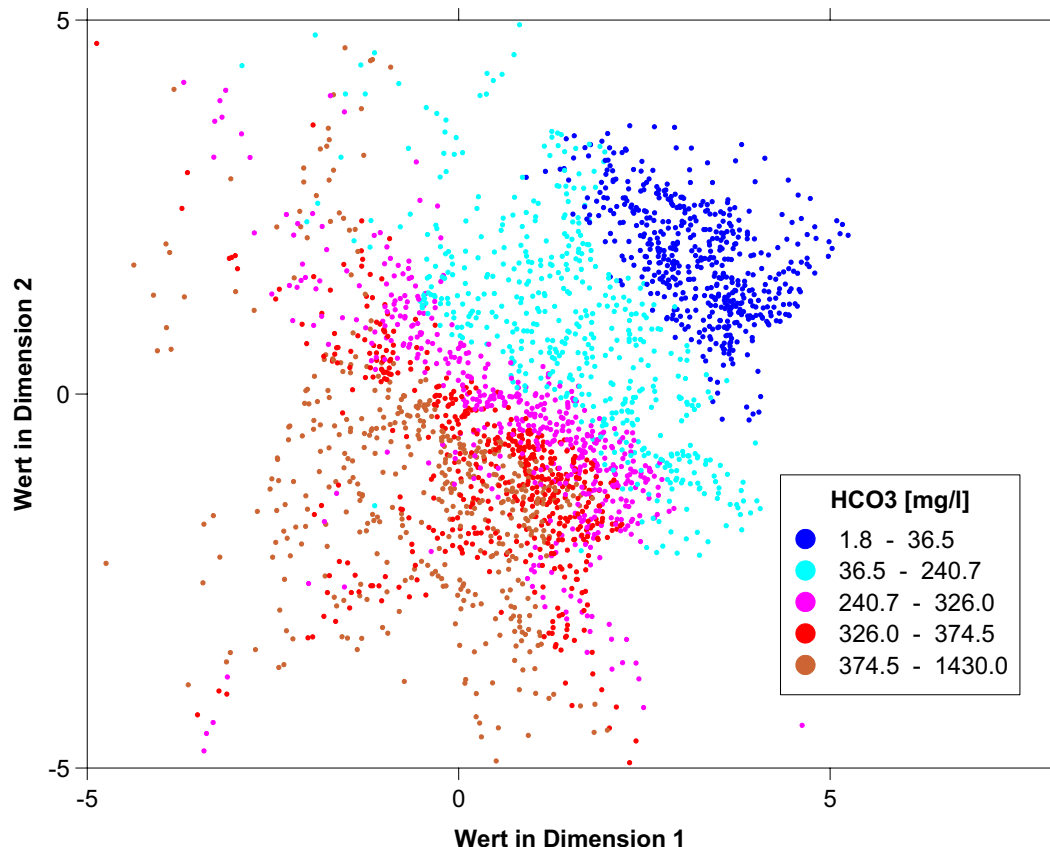


Abb. 5-11: Darstellung der HCO_3^- -Gehalte in der Selbstorganisierenden Karte

unmittelbarer Nähe zum nach Südosten hin angrenzenden Muschelkalk angesiedelt sind. Es ist demnach nicht auszuschließen, dass es sich hierbei de facto um Mischwässer handelt. Insofern lassen sich die Beobachtungen von KUNKEL et al. (2002) für den bayerischen Raum nicht eindeutig bestätigen.

Die Ergebnisse der Selbstorganisierenden Karte lassen sich mit denen der Hauptkomponentenanalyse vergleichen, wenn die Werte für einzelne Parameter in den Symbolen kodiert werden. Für die Abbildungen wurden der Übersichtlichkeit halber die Perzentile in 20%-Stufen gewählt. Die Abb. 5-11 und 5-12 zeigen, dass die Ordnung der Probenahmepunkte in der Selbstorganisierenden Karte im Wesentlichen nach dem HCO_3^- - und dem O_2 -Gehalt erfolgt. Diese Parameter bestimmen aufgrund ihrer Korrelationen mit anderen Parametern auch die erste und dritte Hauptkomponente (Abb. 5-5). Daraus lässt sich die Empfehlung ableiten, die Grundwässer primär anhand dieser beiden Parameter zu klassifizieren. Während der HCO_3^- -Gehalt als Leitparameter in der Hydrogeologie weit verbreitet ist (FURTAK & LANGGUTH 1967, DAVIS & DE WIEST 1967), spielte der O_2 -Gehalt bisher für die Klassifizierung der Grundwässer nur eine untergeordnete Rolle.

Die von der Selbstorganisierenden Karte vorgenommene Strukturierung der Daten ist insofern einer Hauptkomponentenanalyse vergleichbar, als die großräumige Struktur von den Parametern bestimmt wird, die mit vielen anderen Parametern eng korreliert sind. Anders als bei der Hauptkomponentenanalyse werden aber auch stark nicht-lineare Zusammenhänge berücksich-

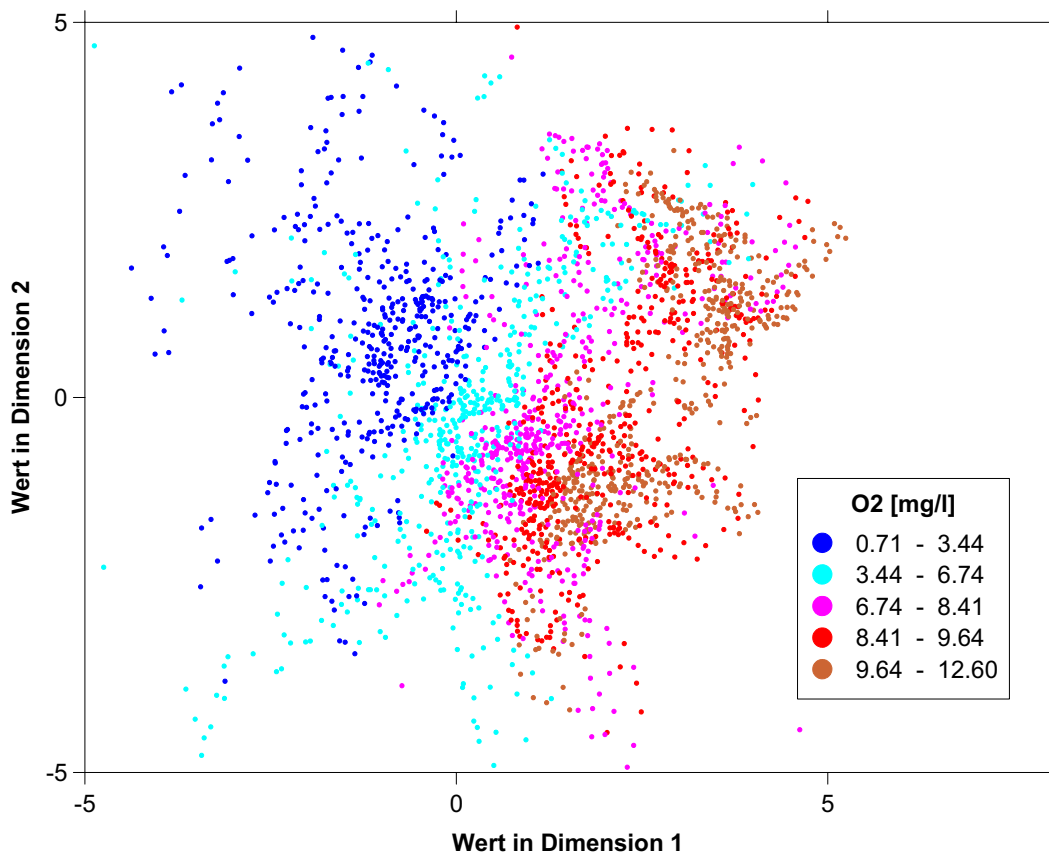


Abb. 5-12: Darstellung der O₂-Gehalte in der Selbstorganisierenden Karte

tigt. Außerdem werden von der Selbstorganisierenden Karte nicht nur globale, d.h. für den gesamten Datensatz geltende Zusammenhänge berücksichtigt, sondern auch lokale, d.h. auf eine Teilmenge des Datensatzes beschränkte (KOHONEN 2001). Je kleinräumiger die Muster für einzelne Parameter sind, desto untergeordneter die Rolle, die dieser Parameter für die Strukturierung des gesamten Datensatzes spielt. Der Vergleich der Abb. 5-13 mit den Abb. 5-11 und 5-12 verdeutlicht dies. Zwar sind die NO₃-Gehalte in sauerstoffarmen Wässern generell sehr niedrig, weisen aber in sauerstoffgesättigten Wässern eine große Spannweite auf. So treten im Bereich der karbonatischen, sauerstoffgesättigten Wässer (unterer rechter Bereich der Abb. 5-13) generell hohe NO₃-Gehalte auf, im Bereich der kristallinen Gesteinseinheiten (oberer rechter Bereich der Abbildung; vgl. Abb. 5-8) hingegen trotz Sauerstoffsättigung überwiegend niedrige bis sehr niedrige NO₃-Gehalte. Die sehr niedrigen NO₃-Gehalte der in der äußersten linken unteren Ecke der Abb. 5-12 angeordneten Probenahmestellen aus der salinaren Fazies des Mittleren Keupers sind dagegen vermutlich eher auf Reduktion im Grundwasserleiter und weniger auf niedrige Stickstoffeinträge zurückzuführen.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Sowohl für die Hauptkomponentenanalyse als auch für die Selbstorganisierende Karte erwiesen sich HCO₃ und O₂ als Leitparameter. Es wird deshalb empfohlen, den Sauerstoffgehalt stärker als bisher zur Klassifizierung der Grundwässer zu berücksichtigen. Die Bedeutung dieses Para-

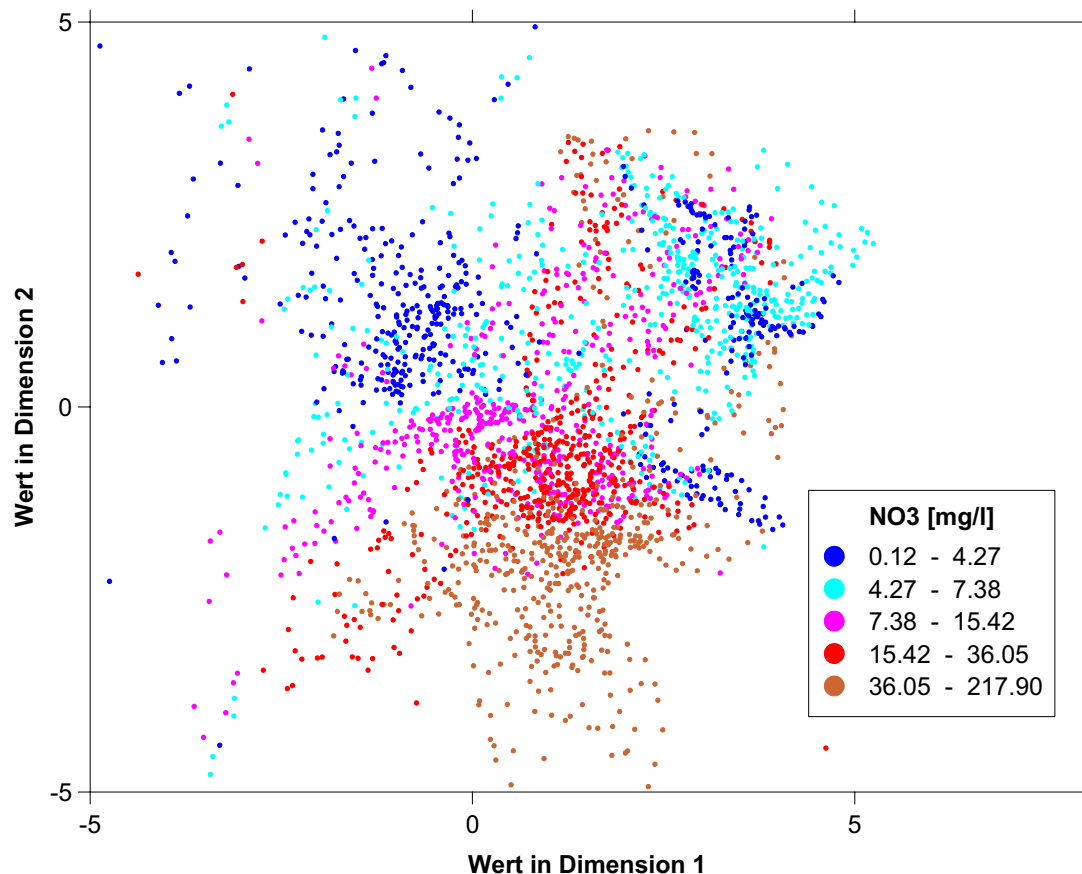


Abb. 5-13: Darstellung der NO_3^- -Gehalte in der Selbstorganisierenden Karte

meters spielt nicht nur für die Stickstoff-Umsetzungen, sondern auch für die Mobilität zahlreicher Spurenstoffe, sowie für den Abbau organischer Schadstoffe eine entscheidende Rolle.

Die aufgrund stratigrafisch-lithologischer Kriterien vorgenommene Klassifizierung der Grundwasserleiter Bayerns erwies sich hinsichtlich der Beschaffenheitsdaten als sinnvoll. Mit den hier verwendeten Verfahren der überwachten Klassifizierung (Diskriminanzanalyse, Lernende Vektorquantisierung) ließen sich die Probenahmepunkte zu 50% bzw. 56% der jeweiligen hydrogeologischen Einheit korrekt zuordnen. Anhand der Analyse der Fehlklassifikationen ließen sich einander sehr ähnliche Einheiten identifizieren. Dieses Ergebnis wird auch von der Selbstorganisierenden Karte bestätigt.

Die Wertebereiche vieler Einheiten überlappen sich weitgehend. Dennoch unterscheiden sich fast alle Einheiten bezüglich der Lage ihrer Probenahmepunkte in der Selbstorganisierenden Karte und somit anhand der Verteilungen ihrer Beschaffenheitsdaten signifikant voneinander. Somit ist es sinnvoll, Verteilungen für die Werte der einzelnen Parameter nach Einheiten getrennt anzugeben. Lediglich zwischen den Einheiten 7.2 (Helvetikum) und 7.3 (Flysch), 3.5 (Muschelkalk, salinare Fazies) und 3.7 (Mittlerer Keuper, salinare Fazies), sowie 3.10 (Lias) und vier weiteren Einheiten ließen sich keine signifikanten Unterschiede nachweisen.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

In dem vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen in Auftrag gegebenen und geförderten Projekt „Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns“ wurden grundwasserleiterspezifische Hintergrundwerte der Grundwasserbeschaffenheit erarbeitet und in Tabellen und Grafiken dargestellt. Die Messwerte der untersuchten Parameter stammen aus der Labordatenbank des BayGLA und umfassen die Daten der Hydrogeologischen Landesaufnahme und weiterer Untersuchungen und Projekte (z.B. Wasserwirtschaftliche Rahmenplanung). Im nun abgeschlossenen Vorhaben wurden in ausgesuchten Gebieten mit geringer Probindichte nochmals über 600 Grundwasserproben entnommen. Damit standen für die Untersuchung Werte von über 5.700 Probenahmepunkten mit mehr als 3.000 Vollanalysen inklusive Spurenstoffanalytik zur Verfügung, die eine detaillierte statistische Untersuchung erlaubten.

Die folgenden wesentlichen Erkenntnisse wurden in dem Projekt gewonnen:

- Für die bedeutenderen Grundwasserleiter Bayerns konnten nach hydrogeologischen Einheiten geordnet die charakteristischen Werteverteilungen der untersuchten Beschaffenheitsparameter ermittelt werden. Dies ermöglicht in Zukunft eine bessere Einordnung gemessener Parameter von Einzelproben im regionalen Kontext.
- Eine detailliertere Klassifizierung der Grundwässer konnte bei Betrachtung des Gesamtdatensatzes einschließlich der Spurenelementverteilungen vorgenommen werden. Von den hierfür eingesetzten multivariaten statistischen Methoden (Hauptkomponentenanalyse, Clusteranalyse, Diskriminanzanalyse, Korrespondenzanalyse, Lernende Vektorquantisierung, Selbstorganisierende Karten) erwiesen sich insbesondere die bisher wenig in der Hydrogeochemie eingesetzten Selbstorganisierenden Karten als ein sehr effizientes Verfahren zur Visualisierung der Charakteristik großer hydrogeochemischer Datensätze. Außerdem konnten damit bei angrenzenden Grundwasserleitern durch hydraulische Zusammenhänge verursachte Bereiche gegenseitiger Beeinflussung ermittelt werden.
- Bei Inhaltsstoffen kommen Überschreitungen von Grenzwerten der TrinkWV bzw. der BBodSchV in der Regel nur auf einzelne Grundwasserleiter beschränkt vor, die für die jeweiligen Problemstoffe benannt werden. Dies ermöglicht eine gezieltere Steuerung von Messprogrammen für aufwändig zu messende Elemente. Hinsichtlich der Grenzwerte der TrinkWV treten häufigere geogene Überschreitungen bei Arsen, Quecksilber, Selen, Nickel, Aluminium, sehr häufig jedoch wegen der leichten Abtrennbarkeit unproblematisch bei Eisen und Mangan auf. Überschreitungen der Grenzwerte für Natrium, Sulfat und Chlorid sind erwartungsgemäß bei Wässern aus salinarer Fazies häufig, jedoch kommen geogene Grenzwertüberschreitungen auch öfter bei Süßwässern vor. Problematische Elemente hinsichtlich geogener Überschreitungen der im Vergleich zur TrinkWV meist großzügiger angesetzten Prüfwerte der BBodSchV sind Arsen und Quecksilber. Bei Antimon, Blei, Cadmium, Cobalt, Kupfer, Nickel und Zink kommen geogene Überschreitungen der Prüfwerte der BBodSchV nur vereinzelt vor.

- Die in der hydrogeologischen Kartierung vorzunehmende hydrogeochemische Klassifizierung der Grundwasserleiter wurde präzisiert. Erste Ergebnisse sind bereits in die Hydrogeologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland (HÜK 200) (z.B. DÖRHÖFER et al. 2001, BÜTTNER et al. 2003) eingeflossen.

Vergleichbare Untersuchungen der geogenen Beschaffenheit des Grundwassers wurden in der Regel mit deutlich kleineren Datensätzen vorgenommen. So unterscheidet HÖLTING (1991) auf der Basis von insgesamt nur 51 Wasseranalysen acht Gruppen von Grundwasserleitern jeweils ähnlicher petrografischer Beschaffenheit der Gesteine: 1. Kristallin mit Quarzit, 2. Vulkanite, 3. Sandsteine, Konglomerate, 4. Grauwacken, Ton- und Kieseliefer, 5. Ton-/Schluffstein (außer Mergel), 6. Karbonatgesteine, 7. Sand, Kies und Mergel des Tertiärs und Pleistozäns sowie 8. Salzwasser beeinflusstes Grundwasser. SCHLEYER & KERNDORFF (1992) übernehmen im Wesentlichen diese Einteilung für ihre statistische Auswertung anhand von insgesamt 186 Standorten, bzw. fassen noch stärker nach Lockersedimenten, Kalk/Dolomit, Buntsandstein und sonstigem Festgestein zusammen. Ihre Untersuchung beinhaltet im Bereich der anorganischen Inhaltsstoffe über die Hauptelemente hinaus eine Reihe von Spurenstoffen.

Die mit dem vorliegenden sehr umfangreichen Datensatz gewonnenen Ergebnisse bestätigen hinsichtlich der Verteilung der Hauptelemente im Wesentlichen die von anderen Autoren angegebenen Bandbreiten. Die hier vorgenommene Untersuchung zeigt jedoch, dass bei einer Betrachtung nach einzelnen Grundwasserleitern getrennt geringere Bandbreiten der Parameter angetroffen werden, als bei einer Zusammenfassung mehrerer hydraulisch voneinander getrennter, aber lithologisch vergleichbarer hydrogeologischer Einheiten. Insofern besteht bei einer zu starken Zusammenfassung verschiedener Einheiten die Gefahr, dass Unterschiede im Chemismus einzelner Grundwasserleiter verwischt werden.

So werden die Wässer der Alpen von SCHLEYER & KERNDORFF (1992) in einer Gruppe zusammengefasst, während mit dem hier untersuchten Datensatz deutliche Unterschiede der Grundwässer aus Kalk- und Dolomitgesteinen sowie salinaren Gesteinseinheiten (vorwiegend sulfatische Raibler Schichten) ermittelt werden konnten. Lediglich die Wässer aus Flysch und Helvetikum waren nicht signifikant unterscheidbar. Ein weiteres Beispiel sind die Wässer aus dem Kristallin, die in der Regel ohne weitere Differenzierung betrachtet werden. Hier zeigten die Grundwässer aus sauren bis intermediären Kristallingesteinen eine andere Charakteristik als die Wässer aus basischen bis ultrabasischen Gesteinen. Bei den Sandsteinen ergeben sich je nach petrografischer Zusammensetzung der Gesteine deutlich abweichende Eigenschaften der Wässer. Gesteine mit karbonatischen Anteilen (z.B. Dogger-Eisensandstein) sind hier von Sandsteinen mit vorwiegend silikatischem Mineralgehalt (z.B. Buntsandstein) zu unterscheiden.

Eine stärkere Differenzierung der betrachteten hydrogeologischen Einheiten erbrachte insbesondere für die Verteilung der Spurenstoffgehalte trennschärfere Resultate. Hier lässt sich mit dem vorliegenden umfangreichen Datensatz eine für die meisten Spurenstoffe unterschiedliche geogene Verteilung in einzelnen Grundwasserleitern nachweisen. Diese wird je nach Stoffverhalten der betrachteten Elemente und petrografischer Zusammensetzung der Grundwasserleiter auf unterschiedliche Mechanismen zurückzuführen sein, die letztlich noch nicht durchgehend geklärt sind.

Ein Vergleich mit gemessenen Spurenelementgehalten der Gesteine (LINHARDT 2000, LINHARDT & ZARBOK 2002) zeigt, dass erhöhte Spurenelementgehalte der Wässer häufig mit erhöhten Konzentrationen dieser Elemente in den jeweiligen Grundwasserleitern übereinstimmen. So sind z.B. deutlich über dem weltweiten Durchschnitt liegende Spurenelementgehalte von Arsen, Cadmium, Cäsium, Rubidium, Zinn und Thallium in den Gesteinen des Malms in der Region Ingolstadt mit überdurchschnittlichen Gehalten dieser Elemente in den Wässern des Malms gekoppelt. In den Sanden der Vorlandmolasse korrelieren erhöhte Werte der Gesteine an Arsen und Uran mit über dem Durchschnitt liegenden Werten dieser Elemente im Grundwasser.

Ausblick

Der vorliegende Fachbericht gibt eine Übersicht der hydrogeochemischen Beschaffenheit der Grundwässer Bayerns. Die Ergebnisse zeigen für die meisten untersuchten Parameter charakteristische Verteilungen der Werte in den betrachteten hydrogeologischen Einheiten. Bei den bedeutenderen Grundwasserleitern stand ein ausreichendes Probenkollektiv zur Verfügung, um statistisch hinreichend abgesicherte Aussagen vorzunehmen. Lediglich bei einigen lokal begrenzten Grundwasserleitern ist die vorliegende Probenzahl zum Teil noch zu gering, um die Daten als repräsentativ zu bezeichnen. Dennoch wurden die Werte im Sinne einer möglichst vollständigen Gesamtauswertung des vorhandenen Datensatzes in die Betrachtung mit aufgenommen. Bei einigen Grundwasserleitern mit größeren Spannweiten der Werte zeichnet sich ab, dass eine Differenzierung in Untereinheiten sinnvoll sein könnte (z.B. Keuper). Andererseits bietet sich eine Kombination der hier vorgestellten Klassifizierung mit geostatistischen Methoden an. Untersuchungen dazu sind aber noch in Arbeit. Um hier zu weitergehenden Aussagen zu kommen und eine statistische Sicherheit über alle Grundwasserleiter zu erhalten, ist eine weitergehende Beprobung mit einer Verdichtung des Probennetzes erforderlich.

Eine höhere Probendichte wird darüber hinaus eine Untersuchung der regionalen Konzentrationsverteilungen der Parameter in der Fläche ermöglichen, die insbesondere für Problemstoffe (z.B. Arsen) von Nutzen wäre. Eine weitere Verdichtung der Probenzahl wird im Zuge der laufenden Hydrogeologischen Landesaufnahme im Detailmaßstab 1 : 50.000 vorgenommen. Mit diesem Datensatz können großmaßstäbig weitere Erkenntnisse z.B. zu hydraulischen Zusammenhängen verschiedener Grundwasserleiter gewonnen werden, wie sie in der hier vorgenommenen überblicksmäßigen Darstellung von ganz Bayern für großräumige Zusammenhänge erhalten wurden.

Das untersuchte Datenkollektiv stellt darüber hinaus die Fachdaten für weitergehende Untersuchungen hinsichtlich der Klassifizierung, der Genese und hydraulischer Zusammenhänge der Grundwässer sowie für viele weitere Fragestellungen. Etliche Punkte, auch zur Herkunft bestimmter Spurenelementverteilungen in einigen Grundwasserleitern, sind derzeit noch ungeklärt und bedürfen insbesondere im Bezug auf Problemstoffe der weiteren Klärung. Für die Untersuchung solcher Fragen bildet der hier vorliegende und systematisch weiter auszubauende Datensatz eine hervorragende Grundlage.

7 Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des F&E-Vorhabens „Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns“, das von April 2001 bis März 2003 am BayGLA im Auftrag und mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen durchgeführt wurde. Das Projekt baute auf den Ergebnissen der in den Jahren 1987/88 und 1989/90 am BayGLA gelaufenen F&E-Vorhaben „Spurenelemente im Grundwasser“ (DAFFNER et al. 1988, HABEREDER et al. 1990) auf.

Maßgeblich am Aufbau der Wasseranalytik und insbesondere der Spurenstoffanalytik am BayGLA beteiligt waren Prof. Dr. H. Ruppert, Hr. F. Daffner, Dr. E. Linhardt und Hr. R. Dittrich.

Ein großer Teil der verwendeten Daten wurde im Rahmen der Erstellung der Hydrogeologischen Beiträge in den Erläuterungen zu den Geologischen Karten von Bayern 1 : 25.000 erhoben; Autoren zahlreicher Beiträge sind Dr. R. Apel, Dr. G. Büttner, Dr. H. Frank und Dr. J.-P. Wrobel.

Die Arbeiten erfolgten in Abstimmung mit dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft und mit Unterstützung durch die Bayerische Wasserwirtschaftsverwaltung sowie zahlreiche Betreiber öffentlicher und privater Grundwassergewinnungsanlagen.

Bei der im Projektrahmen vorgenommenen umfangreichen Grundwasserprobenahme haben sich außer den Autoren die folgenden Mitarbeiter des Referats Hydrogeologie am BayGLA beteiligt: Dr. B. Asböck, Dr. G. Büttner, Dr. G. Diepolder, Hr. S. Sieblitz, Dr. T. Spörlein und Hr. S. Wamsler. Ihnen und allen anderen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des BayGLA, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, sei an dieser Stelle herzlichst für Ihren engagierten Einsatz gedankt.

Für die Durchsicht des Manuskripts und wertvolle Anregungen danken wir Dr. G. Büttner, Dr. G. Diepolder, Dr. T. Fritzer, Dr. B. Schilling und Dr. J.-P. Wrobel vom BayGLA, Dr. J. Bittersohl und Dr. P. Konarske vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft sowie Dr. T. Rude vom Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Ludwig-Maximilians-Universität München.

8 Literatur

- ANDRES, G. & FRISCH, H. (1981): Hydrogeologie und Hydraulik im Malmkarst des Molassebeckens und der angrenzenden Fränkischen-Schwäbischen Alb. – Schriftenr. Bayer. L.-Amt Wasserwirtsch., **15**: 108—117, München.
- ANDRES, G. (1983): Untersuchungen zum Grundwasserhaushalt des jungtertiären Tiefenwassers mittels Grundwasseraltersbestimmung. – In: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1983): Wasserwirtschaft in Bayern - aus dem Arbeitsbereich des Bayerischen Landesamts für Wasserwirtschaft. – Informationsberichte, **2/83**: 45-57, München.
- APEL, R., BÜTTNER, G., DOBNER, A. & FRANK, H. (1993): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Main - Hydrogeologie. – 138 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & WEIBER, R. (2003): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. – 10. Aufl.: 819 S., Berlin-Heidelberg (Springer).
- BAYER, M. & HENKEN-MELLIES, W.-U. (1998): Untersuchung arsenführender Sedimente in der Oberen Süßwassermolasse Bayerns.- In: KLEEGERGER, U., FRISCH, W. & HEINRICHS, G. [Hrsg.]: Arsen im Grund- und Trinkwasser Bayerns. – GeoCongress, **4**: 43 - 66, Köln (Sven von Loga).
- BBodSchV (1999): Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung) in der Fassung der Bekanntmachung vom 12.07.1999, Bundesgesetzblatt I: S. 1554.
- BROWN, C. (1998): Applied multivariate statistics in geohydrology and related sciences. – 248 S., Berlin-Heidelberg (Springer).
- BÜTTNER, G., DIEPOLDER, G., DOBNER, A., FRITZER, T., PUKOWIETZ, C., SETTLES, E., SPÖRLEIN, T. & WAGNER, B. (2002): Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 10 Ingolstadt – Erläuterungen zur Hydrogeologischen Karte 1 : 100 000. – 127 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- BÜTTNER, G., PAMER, R. & WAGNER, B. (2003): Hydrogeologische Raumgliederung von Bayern. – GLA Fachberichte, **20**: 85 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- CARLÉ, W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa. Geologie, Chemismus, Genese. – Bücher der Zeitschrift Naturwissenschaftliche Rundschau: 642 S., 15 Karten, Stuttgart (Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH).
- DAFFNER, F., JONECK, M., RUPPERT, H. & WROBEL, J.-P. (1988): Bericht zum Sonderuntersuchungsprogramm „Spurenelemente im Grundwasser“ im Rahmen der Wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung Main. – Unveröff. Abschlussbericht, 101 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- DAVIS, S.N. & DE WIEST, R.J.M. (1967): Hydrogeology. – 2. Aufl.: 463 S., New York - London – Sydney (Wiley).

- DIN (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.) (1994): DIN 32645: Chemische Analytik; Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze; Ermittlung unter Wiederholbedingungen; Begriffe, Verfahren, Auswertung. – Beuth Verlag, Berlin.
- DÖRHÖFER, G., HANNAPPEL, S. & VOIGT, H.-J. (2001): Die hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland (HÜK 200). – Z. angew. Geol., **47**: 153-159, Hannover.
- DURFOR, CH.N. & BECKER, E. (1964): Public water supplies of the 100 largest cities in the United States, 1962. – US Geol. Surv. Water Supply Pap., **1812**: 263 S., Washington D.C.
- EU-WASSERRAHMENRICHTLINIE (2000): Richtlinie 2000 / 60 / EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23.10.2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens im Bereich der Wasserpoltik (Wasserrahmenrichtlinie).
- FURTA, H. & LANGGUTH, H.R. (1967): Zur hydrogeochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. – Mem. IAH-Kongress, 1965, **7**: 89-96, Hannover.
- GERB, L. (1958): Grundwassertypen. – Vom Wasser, **25**: 16-48, München.
- GRISCHEK, T., EULENSTEIN, F., FEGER, K.H., FIRCH, M., HAUPT, A., HERLITZIUS, J., KIEKBUSCH, J. KNÖLLER, K., MEISSNER, R., NESTLER, W., NUBER, T., OLEJNIK, J., RICHTER, G., RÖDELSPERGER, M., SCHÄFER, W., SCHMALZ, V., SEEGER, J., STRAUCH, G., STURM, S., TRETTIN, R., WERNER, A., WICHMANN, K., WILLMS, M. & WORCH, E. (2003): Sulfat im Grundwasser. Wasserversorgung und Sulfatbelastung des Grundwassers unter land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen. – Abschlussbericht, BMBF-Verbundvorhaben Nr. 02WT9920: 370 S., Dresden.
- HABEREDER, C., DAFFNER, F. & WROBEL, J.-P. (1990): Bericht zum Sonderuntersuchungsprogramm „Spurenelemente im Grundwasser“ (Wasserwirtschaftliche Rahmenplanung Main). – Unveröff. Abschlussbericht, 71 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- HEINRICHS, G. (1996): Geogene Arsenkonzentrationen in Keupergrundwässern Frankens/Bayern. – Hydrogeologie und Umwelt, **12**: 193 S., Würzburg.
- HEINRICHS, G. & BAUER, W. (1999): Wasserchemische Sonderentwicklungen in den Keupergrundwässern Mittelfrankens. – Geol. Bl. NO-Bayern, **49**(1-2): 57-70, Erlangen.
- HEM, J.D. (1985): Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. – US Geol. Surv. Water Supply Pap., **2254**, 3. Aufl.: 263 S., Washington D.C.
- HÖLTING, B. (1991): Geogene Grundwasserbeschaffenheiten und ihre regionale Verbreitung in der Bundesrepublik Deutschland. – In: ROSENKRANZ, D., EINSELE, G. HARREß, H.-M. (ed.): Bodenschutz - Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Erich Schmidt Verlag, 6. Lfg. **I/91** (1300): 36 S, Berlin (Erich Schmidt).
- HÖLTING, B. (1995): Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. – 5. Aufl.: 441 S., Stuttgart (Enke).

- HÖTZL, H. & WITTHÜSER, K. (1999): Methoden für die Beschreibung der Grundwasserbeschaffenheit. – DVWK-Schriften **125**: 113 S., Bonn (Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH).
- KLAAS, P. (2003): Multivariate statistische Auswertung und Modellierung chemischer Parameter des bayerischen Grundwassermessnetzes. – Diplomarbeit Univ. Bayreuth: 100 S.
- KOHONEN, T. (2001): Self-Organizing Maps. – Springer Series in Information Sciences, 3. Aufl., Vol. **30**: 501 S., Berlin.
- KONARSKE, P., HABERGER, I., MANGELSDORF, J. & SCHRETZENMAYR, G. (1998): Grundwasser in Bayern - Wasserbeschaffenheit 1993/97. – Bayer. L.-Amt Wasserwirtsch., Informationsberichte, **1/98**: 127 S., München.
- KUNKEL, R., HANNAPPEL, S., VOIGT, H.-J. & WENDLAND, F. (2002): Die natürliche Grundwasserbeschaffenheit ausgewählter hydrostratigrafischer Einheiten in Deutschland. – Endbericht eines F&E-Vorhabens im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser und Boden“ der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (unveröff.), 93 S., Forschungszentrum Jülich, Hydor Consult Berlin, Brandenburgisch-Technische Universität Cottbus.
- LEMCKE, K. & TUNN, W. (1956): Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarteten Malmunterlage. – Bull. Ver. Schweizer. Petrol.-Geol. u. Ing., **23/64**: 35-56, Basel.
- LINHARDT, E. (2000): Gehalte umweltrelevanter Spurenelemente in Gesteinen der Region 10 (Ingolstadt). – Geol. Bav., **105**: 413-430, München.
- LINHARDT, E. & ZARBOK, P. (2002): Geogene Grundgehalte der Gesteine Bayerns (Geochemischer Atlas) - Verteilung und Konzentration der Haupt-, Neben- und Spurenelemente in den Gesteinen Bayerns. – Unveröff. Abschlussbericht: 166 S., Marktredwitz (Außenstelle Bayer. Geol. L.-Amt).
- MATTHESS, G. (1994): Die Beschaffenheit des Grundwassers. – Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. **2**, 3. Aufl.: 499 S., Berlin - Stuttgart (Bornträger).
- MERKEL, B. & SPERLING, B. (1996): Hydrogeochemische Stoffsysteme Teil 1. – DVWK-Schriften **110**: 288 S., Bonn (Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH).
- MERKEL, B. & SPERLING, B. (1998): Hydrogeochemische Stoffsysteme Teil 2. – DVWK-Schriften **117**: 378 S., Bonn (Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH).
- MEYER, R.K.F. & MIELKE, H. (1993): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt 6639 Wackersdorf. – 194 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- MÖLLER, P., STÖBER, I. & DULSKI, P. (1997): Seltenerdelement-, Yttrium-Gehalte und Bleiisotope in Thermal- und Mineralwässern des Schwarzwaldes. – Grundwasser **3**(2): 118-132 (Springer).

- SAGER, H., PREUHSLER, T., SCHRETZENMAYR, G., BITTERSÖHL, J., VON BOHLEN, W., KÖLLING, C., KREBS, M., MORITZ, K. & MÜLLER, F.-X. (1997): Grundwasserversauerung in Bayern. – Bayer. L.-Amt Wasserwirtsch., Informationsberichte, **1/97**: 184 S., München.
- SAMMON, J.W. (1969): A nonlinear mapping for data structure analysis. – IEE Transactions on Computers C-**18/5**: 401-409, Los Alamitos.
- SCHLEYER, R. & KERNDORFF, H. (1992): Die Grundwasserqualität westdeutscher Trinkwasserressourcen. – 249 S., Weinheim, New York, Basel, Cambridge (VCH).
- SCHÖNWIESE, C.D. (2000): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. – 3. Aufl: 298 S., Berlin (Gebrüder Bornträger).
- SUTTNER, TH., AUSSENDORF, M. & MARTIN, W. (1998): Hintergrundwerte anorganischer Problemstoffe in Böden Bayerns. – GLA Fachberichte, **16**: 70 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- TRINKWV (2001): Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 28.05.2001, Bundesgesetzblatt I, **24**: 959-980.
- UDLUFT, P. (1979): Das Grundwasser Frankens und angrenzender Gebiete. – Steir. Beitr. Hydrogeologie, **31**: 5-128, Graz.
- UDLUFT, P. & GATTENLÖHNER, H. (1999): Geogene und anthropogene Stoffkonzentrationen in Wässern der Germanischen Trias Unterfrankens. – Hallesches Jahrb. Geowiss., **B21**: 79-106, Halle (Saale).
- WIKLANDER, L. (1970): The content of mercury in Swedish ground and river water. – Geoderma, **3**: 75-79, Amsterdam.
- WROBEL, J.-P. (1983): Grundwasser in Moränengebieten des bayerischen Alpenvorlandes. – Geol. Jb., **C33**: 95-106, Hannover.
- WROBEL, J.-P., FRITZER, T., MIKULLA, C., SCHULDES, D. & SUCKOW, A. (2002): Forschungsbohrung Altdorf bei Landshut/Niederbayern - Erkundung einer geothermischen Anomalie im Bereich des Landshut-Neuöttinger Hochs. – Grundwasser, **7**(1): 25-40 (Springer).
- ZELL, A. (1994): Simulation Neuronaler Netze. – 624 S., Bonn (Addison-Wesley).

Hinweis auf die Hydrogeologie-Seite im Internet-Auftritt des Bayerischen Geologischen Landesamts:

<http://www.geologie.bayern.de/hydrogeologie>: Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns

9 Anhang

Anhang 1: Statistische Maßzahlen

Die folgenden Tabellen geben die statistischen Maßzahlen der Grundwasseranalysen, geordnet nach den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten (s. Tab. 3-1 und 3-2) wieder. Bei geringen Probenzahlen werden die Werte zum Teil nicht angegeben. Die jeweiligen Nachweis- und Bestimmungsgrenzen (NG bzw. BG) der Parameter sind in Kap. 2.2 aufgelistet.

Anhang 1-1: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Paläozoikum ohne Perm

1.1 Paläozoikum ohne Perm													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	91	0	94	0	6,4	7,1	7,7	8,3	9,5	11,5	18,4	8,9
pH-Wert (Gelände)		101	0	104	0	4,00	4,80	5,70	6,66	7,30	7,54	8,20	6,40
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	101	0	104	0	1,1	6,8	8,8	13,4	19,6	31,0	64,6	17,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	91	0	94	0	1,80	4,60	7,65	9,50	10,90	11,90	12,80	8,93
O ₂ -Sättigung	[%]	41	0	41	0	7,6	22,3	57,0	79,0	87,6	94,9	104,0	69,4
CO ₂ frei	[mg/l]	90	0	93	0	0,9	2,6	6,2	11,4	19,4	39,4	121,4	17,4
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	42	17	42	16	<NG	<NG	<NG	<NG	0,60	0,66	0,71	<BG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	101	0	104	0	0,80	1,70	2,25	5,00	10,60	29,88	122,40	12,33
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	42	41	42	41	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,38	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	101	8	104	10	<NG	<NG	2,40	5,80	12,29	22,70	35,45	8,45
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	101	101	104	104	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	101	0	104	0	3,29	9,00	15,72	23,50	31,39	43,00	126,46	26,76
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	52	52	52	52	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	100	0	103	0	<BG	4,0	12,1	23,2	75,3	140,4	227,0	50,6
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	91	0	94	0	0,530	2,170	3,269	4,520	7,204	14,20	49,22	7,561
K ⁺ Kalium	[mg/l]	91	0	94	0	<BG	0,300	0,500	0,691	0,965	1,770	14,63	0,999
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	101	100	104	103	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	101	0	104	0	0,980	4,170	6,100	11,46	23,17	54,45	103,4	20,19
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	101	0	104	0	0,380	2,100	3,600	5,200	7,100	9,800	19,14	5,652
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	101	31	104	33	<NG	<NG	<NG	0,0410	0,1600	0,4650	9,110	0,3668
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	101	61	104	62	<NG	<NG	<NG	<NG	0,01311	0,1722	3,894	0,1237
Si Silicium	[mg/l]	101	0	104	0	1,12	2,10	2,99	3,79	4,74	5,83	11,35	4,04
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	42	7	42	7	<NG	<NG	<NG	<NG	1,44	2,81	17,50	1,62
Gesamtmineralisation	[mg/l]	84	0	87	0	43,72	55,24	75,44	108,2	181,3	310,0	603,1	151,2
Gesamthärte	[° dH]	101	0	104	0	0,303	1,22	1,76	2,80	5,09	9,20	17,1	4,12
Karbonathärte	[° dH]	100	0	103	0	<BG	0,18	0,56	1,07	3,46	6,44	10,42	2,32
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		86	0	88	0	-7,24	-5,39	-4,35	-3,12	-1,38	-0,90	-0,28	-3,08
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	90	0	93	0	<BG	0,06	0,14	0,26	0,44	0,90	2,76	0,39
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	98	0	100	0	<BG	0,100	0,220	0,390	1,265	2,322	3,720	0,846
Ag Silber	[µg/l]	13	11	13	11	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,049	<BG
Al Aluminium	[µg/l]	42	9	42	9	<NG	<NG	<BG	3,341	25,86	516,5	1,690	150,9
As Arsen	[µg/l]	42	10	42	10	<NG	<NG	0,185	0,390	0,863	2,812	7,463	0,860
Au Gold	[µg/l]	13	2	13	2	<NG	<NG	<BG	0,032	0,048	0,063	0,075	0,032
B Bor	[µg/l]	42	7	42	7	<NG	<NG	2,288	3,730	4,540	8,749	52,20	6,459
Ba Barium	[µg/l]	42	1	42	1	<NG	5,34	11,1	31,4	58,7	131	784	61,2
Be Beryllium	[µg/l]	42	28	42	28	<NG	<NG	<NG	<NG	0,104	0,399	1,250	0,117
Bi Wismut	[µg/l]	42	11	42	11	<NG	<NG	<NG	0,010	0,020	0,070	0,480	0,034
Cd Cadmium	[µg/l]	42	16	42	16	<NG	<NG	<NG	0,015	0,145	0,597	6,760	0,343
Ce Cer	[µg/l]	13	1	13	1	<NG	0,007	0,007	0,012	0,018	0,046	0,166	0,027
Co Cobalt	[µg/l]	42	15	42	15	<NG	<NG	<NG	0,038	0,690	3,650	18,17	1,302
Cr Chrom	[µg/l]	42	19	42	19	<NG	<NG	<NG	<BG	0,213	0,403	1,032	<BG
Cs Cäsium	[µg/l]	42	10	42	10	<NG	<NG	0,0020	0,0200	0,1950	0,5150	2,894	0,2319
Cu Kupfer	[µg/l]	42	4	42	4	<NG	0,061	0,233	0,449	0,985	1,844	214,9	6,236
Hg Quecksilber	[µg/l]	42	32	42	32	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,327	2,160	0,139
La Lanthan	[µg/l]	42	11	42	11	<NG	<NG	0,0010	0,0140	0,1452	0,6790	7,750	0,3966
Li Lithium	[µg/l]	42	0	42	0	0,400	0,833	1,095	1,775	2,342	7,075	33,52	3,821
Mo Molybdän	[µg/l]	42	16	42	16	<NG	<NG	<NG	0,130	0,282	0,731	8,030	0,452
Ni Nickel	[µg/l]	42	10	42	10	<NG	<NG	0,230	0,795	4,515	8,505	87,50	4,944
Pb Blei	[µg/l]	42	17	42	17	<NG	<NG	<NG	0,037	0,175	0,590	2,280	0,195
Rb Rubidium	[µg/l]	42	0	42	0	0,128	0,222	0,330	0,555	1,485	4,378	7,910	1,449
Sb Antimon	[µg/l]	42	5	42	5	<NG	<NG	0,015	0,060	0,107	0,186	11,11	0,395
Se Selen	[µg/l]	42	32	42	32	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,737	15,66	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	42	27	42	27	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,108	0,400	0,032
Sr Strontium	[µg/l]	42	0	42	0	6,61	17,0	25,9	49,2	99,0	119	609	83,8
Th Thorium	[µg/l]	42	14	42	14	<NG	<NG	<NG	0,060	0,185	0,393	1,930	0,164
Ti Titan	[µg/l]	42	0	42	0	0,255	0,759	1,582	3,410	4,662	5,517	10,62	3,366
Tl Thallium	[µg/l]	42	32	42	32	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,096	0,350	0,030
U Uran	[µg/l]	42	10	42	10	<NG	<NG	0,0058	0,0600	0,1443	0,3372	13,07	0,7829
V Vanadium	[µg/l]	42	23	42	23	<NG	<NG	<NG	<NG	0,335	0,553	0,728	0,163
Y Yttrium	[µg/l]	42	4	42	4	<NG	0,0104	0,0300	0,0800	0,3850	1,643	29,30	1,318
Zn Zink	[µg/l]	42	0	42	0	0,803	1,697	3,333	6,211	9,780	30,48	507,2	32,00

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-2: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus den Marmoren und Kalksilikatfelsen des Kristallinen Grundgebirges

1.2 Marmore und Kalksilikatfelse des Kristallinen Grundgebirges													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	8	0	8	0	7,7	---	---	10,1	---	---	12,1	10,3
pH-Wert (Gelände)		8	0	8	0	6,80	---	---	7,45	---	---	7,70	7,33
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	8	0	8	0	7,3	---	---	41,3	---	---	62,6	37,3
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	8	0	8	0	1,60	---	---	6,10	---	---	11,00	6,26
O ₂ -Sättigung	[%]	8	0	8	0	12,2	---	---	59,6	---	---	100,0	56,8
CO ₂ frei	[mg/l]	8	0	8	0	5,3	---	---	12,8	---	---	15,8	11,4
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	8	2	8	2	<NG	---	---	<NG	---	---	0,62	<BG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	8	0	8	0	1,55	---	---	3,90	---	---	25,08	7,80
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	8	8	8	8	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	8	1	8	1	<NG	---	---	2,86	---	---	35,39	7,37
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	8	7	8	7	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	8	0	8	0	<NG	---	---	15,13	---	---	83,26	23,06
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	8	8	8	8	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	8	0	8	0	33,5	---	---	247,5	---	---	285,7	194,5
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	8	0	8	0	2,181	---	---	4,779	---	---	13,32	5,460
K ⁺ Kalium	[mg/l]	8	0	8	0	0,585	---	---	0,979	---	---	2,362	1,268
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	8	8	8	8	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	8	0	8	0	10,37	---	---	55,54	---	---	92,98	53,28
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	8	0	8	0	0,995	---	---	16,91	---	---	22,97	12,48
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	8	3	8	3	<NG	---	---	0,0180	---	---	0,6913	0,1083
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	8	1	8	1	<NG	---	---	0,00690	---	---	0,2030	0,05245
Si Silicium	[mg/l]	8	0	8	0	5,90	---	---	13,64	---	---	17,80	12,76
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	7	3	7	3	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	8	0	8	0	61,67	---	---	364,6	---	---	501,7	318,5
Gesamthärte	[° dH]	8	0	8	0	1,68	---	---	11,8	---	---	16,7	10,3
Karbonathärte	[° dH]	8	0	8	0	1,54	---	---	11,36	---	---	13,12	8,93
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		8	0	8	0	-2,82	---	---	-0,54	---	---	-0,09	-0,96
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	8	0	8	0	0,12	---	---	0,29	---	---	0,36	0,26
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	8	0	8	0	0,549	---	---	4,056	---	---	4,683	3,187
Ag Silber	[µg/l]	6	6	6	6	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG	<NG
Al Aluminium	[µg/l]	8	3	8	3	<NG	---	---	<BG	---	---	2,243	<BG
As Arsen	[µg/l]	8	0	8	0	0,309	---	---	1,313	---	---	3,950	1,514
Au Gold	[µg/l]	6	2	6	2	<NG	---	---	<BG	---	---	0,181	0,051
B Bor	[µg/l]	8	1	8	1	<NG	---	---	6,364	---	---	45,45	15,01
Ba Barium	[µg/l]	8	0	8	0	4,40	---	---	14,9	---	---	85,3	23,5
Be Beryllium	[µg/l]	8	3	8	3	<NG	---	---	<BG	---	---	0,150	0,054
Bi Wismut	[µg/l]	8	4	8	4	<NG	---	---	<BG	---	---	0,036	0,012
Cd Cadmium	[µg/l]	8	2	8	2	<NG	---	---	<BG	---	---	0,112	0,018
Ce Cer	[µg/l]	6	0	6	0	<BG	---	---	0,006	---	---	0,256	0,047
Co Cobalt	[µg/l]	8	1	8	1	<NG	---	---	0,042	---	---	1,230	0,185
Cr Chrom	[µg/l]	8	0	8	0	<BG	---	---	1,520	---	---	3,193	1,528
Cs Cäsium	[µg/l]	8	0	8	0	0,0010	---	---	0,1877	---	---	0,6400	0,2289
Cu Kupfer	[µg/l]	8	1	8	1	<NG	---	---	0,175	---	---	1,860	0,462
Hg Quecksilber	[µg/l]	8	2	8	2	<NG	---	---	0,040	---	---	0,540	0,103
La Lanthan	[µg/l]	8	2	8	2	<NG	---	---	0,0106	---	---	0,1630	0,0282
Li Lithium	[µg/l]	8	0	8	0	0,251	---	---	5,233	---	---	26,69	7,147
Mo Molybdän	[µg/l]	8	2	8	2	<NG	---	---	0,213	---	---	0,850	0,272
Ni Nickel	[µg/l]	8	2	8	2	<NG	---	---	0,487	---	---	1,269	0,543
Pb Blei	[µg/l]	8	2	8	2	<NG	---	---	0,037	---	---	0,090	0,039
Rb Rubidium	[µg/l]	8	0	8	0	0,474	---	---	2,405	---	---	6,324	2,399
Sb Antimon	[µg/l]	8	1	8	1	<NG	---	---	0,059	---	---	0,170	0,071
Se Selen	[µg/l]	8	6	8	6	<NG	---	---	<NG	---	---	1,897	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	8	3	8	3	<NG	---	---	0,040	---	---	0,134	0,058
Sr Strontium	[µg/l]	8	0	8	0	24,5	---	---	118	---	---	317	144
Th Thorium	[µg/l]	8	1	8	1	<NG	---	---	0,032	---	---	0,280	0,065
Ti Titan	[µg/l]	8	0	8	0	<BG	---	---	2,234	---	---	17,49	5,152
Tl Thallium	[µg/l]	8	1	8	1	<NG	---	---	0,004	---	---	0,270	0,052
U Uran	[µg/l]	8	0	8	0	0,0140	---	---	0,3322	---	---	2,100	0,6817
V Vanadium	[µg/l]	8	0	8	0	0,080	---	---	0,772	---	---	3,060	0,913
Y Yttrium	[µg/l]	8	2	8	2	<NG	---	---	0,0378	---	---	0,1347	0,0414
Zn Zink	[µg/l]	8	0	8	0	1,673	---	---	4,126	---	---	16,61	7,091

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-3: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus den sauren bis intermediären Silikatgesteinen des Kristallinen Grundgebirges

1.3 Saure bis intermediäre Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	734	0	739	0	0,7	5,9	6,7	7,9	9,0	10,2	35,2	8,0
pH-Wert (Gelände)		706	0	711	0	2,72	5,10	5,55	5,86	6,18	6,50	8,80	5,83
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	734	0	740	0	1,1	2,4	3,9	6,9	14,5	27,4	656,0	15,8
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	712	0	716	0	<BG	6,30	7,50	9,14	10,20	10,90	14,00	8,69
O ₂ -Sättigung	[%]	667	0	670	0	<BG	53,7	64,3	79,3	91,4	97,5	130,0	76,2
CO ₂ frei	[mg/l]	729	0	732	0	<BG	8,8	13,2	19,4	29,0	44,9	1.628,0	33,2
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	508	412	511	413	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	7,30	<BG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	733	1	737	1	<NG	0,81	1,25	2,32	8,80	24,55	575,20	10,25
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	504	466	506	467	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	7,23	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	732	38	736	40	<NG	<NG	2,39	5,00	11,56	30,86	121,18	11,61
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	721	696	724	699	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,60	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	732	80	735	80	<NG	<NG	<NG	5,38	11,85	27,37	907,60	13,71
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	638	601	641	603	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,13	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	728	0	732	0	<BG	3,5	6,1	11,0	22,0	44,0	1.678,0	32,6
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	733	0	737	0	0,200	0,666	1,354	3,150	6,410	10,18	978,0	8,872
K ⁺ Kalium	[mg/l]	733	7	737	7	<NG	0,485	0,730	1,152	1,840	3,216	80,00	2,029
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	722	718	726	721	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	2,40	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	733	10	737	10	<NG	1,278	2,159	4,300	10,93	23,94	241,9	10,04
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	733	0	737	0	<BG	0,556	0,900	1,667	4,040	7,974	70,85	3,550
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	725	348	729	349	<NG	<NG	<NG	<BG	0,0400	0,1600	25,00	0,1809
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	727	279	730	281	<NG	<NG	<NG	<BG	0,00560	0,06549	7,243	0,04520
Si Silicium	[mg/l]	729	2	732	2	<NG	2,79	3,74	5,84	8,82	11,78	53,61	6,83
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	499	253	500	253	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,41	5,89	<BG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	597	0	602	0	11,54	21,26	32,96	55,97	113,4	199,1	3,932	111,3
Gesamthärte	[° dH]	733	0	737	0	0,054	0,324	0,514	0,998	2,48	5,29	46,8	2,22
Karbonathärte	[° dH]	728	0	732	0	<BG	0,16	0,28	0,50	1,01	2,02	77,03	1,50
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		679	0	682	0	-9,44	-5,93	-5,25	-4,52	-3,82	-2,87	0,07	-4,50
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	729	0	732	0	<BG	0,20	0,30	0,44	0,66	1,02	37,00	0,75
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	721	0	725	0	<BG	0,060	0,100	0,184	0,360	0,725	27,500	0,539
Ag Silber	[µg/l]	369	209	369	209	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,043	0,675	0,016
Al Aluminium	[µg/l]	491	137	493	139	<NG	<NG	<NG	2,809	15,14	66,92	54,311	237,8
As Arsen	[µg/l]	488	67	489	67	<NG	<NG	<BG	0,194	0,817	1,636	37,20	0,862
Au Gold	[µg/l]	287	138	287	138	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,063	0,178	<BG
B Bor	[µg/l]	468	175	469	175	<NG	<NG	<NG	1,651	3,583	6,088	489,7	6,243
Ba Barium	[µg/l]	491	3	493	4	<NG	1,72	3,59	9,70	23,2	56,6	372	24,3
Be Beryllium	[µg/l]	486	140	487	141	<NG	<NG	<NG	<BG	0,095	0,535	31,93	0,424
Bi Wismut	[µg/l]	459	249	460	250	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,012	0,670	0,009
Cd Cadmium	[µg/l]	488	85	489	86	<NG	<NG	<BG	0,024	0,065	0,189	58,01	0,257
Ce Cer	[µg/l]	287	11	287	11	<NG	<BG	<BG	0,018	0,058	0,170	29,83	0,260
Co Cobalt	[µg/l]	490	60	492	62	<NG	<NG	0,009	0,022	0,074	0,450	99,22	0,582
Cr Chrom	[µg/l]	488	180	489	180	<NG	<NG	<NG	<BG	0,383	0,658	35,89	0,517
Cs Cäsium	[µg/l]	486	56	487	57	<NG	<NG	0,0010	0,0075	0,0475	0,2101	54,87	0,3796
Cu Kupfer	[µg/l]	486	26	487	26	<NG	0,087	0,214	0,501	1,013	2,371	607,2	3,843
Hg Quecksilber	[µg/l]	488	210	489	211	<NG	<NG	<NG	<BG	0,062	0,317	2,650	0,105
La Lanthan	[µg/l]	486	16	487	17	<NG	0,0040	0,0090	0,0246	0,0815	0,2242	13,64	0,2303
Li Lithium	[µg/l]	491	11	493	11	<NG	0,214	0,575	1,666	3,593	7,676	4,061	19,68
Mo Molybdän	[µg/l]	486	293	487	293	<NG	<NG	<NG	<BG	0,524	3,070	0,135	
Ni Nickel	[µg/l]	489	100	491	101	<NG	<NG	<BG	0,411	1,502	4,475	416,2	2,401
Pb Blei	[µg/l]	487	182	488	183	<NG	<NG	<NG	0,031	0,115	0,255	55,98	0,314
Rb Rubidium	[µg/l]	486	3	487	3	<NG	0,120	0,298	0,806	1,886	3,971	408,8	3,608
Sb Antimon	[µg/l]	486	132	487	133	<NG	<NG	<NG	<BG	0,018	0,093	0,863	0,038
Se Selen	[µg/l]	488	426	489	427	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	5,490	<NG
Sn Zinn	[µg/l]	486	271	487	272	<NG	<NG	<NG	<NG	0,035	0,075	1,420	<BG
Sr Strontium	[µg/l]	492	0	495	0	3,00	11,9	19,3	33,5	77,3	148	2,062	71,1
Th Thorium	[µg/l]	486	275	487	276	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,050	1,633	0,028
Ti Titan	[µg/l]	486	51	487	51	<NG	<NG	<BG	0,739	1,711	4,453	73,40	2,057
Tl Thallium	[µg/l]	485	277	486	278	<NG	<NG	<NG	<NG	0,006	0,030	0,600	0,016
U Uran	[µg/l]	486	18	487	19	<NG	0,0023	0,0060	0,0181	0,0776	0,4150	7,764	0,2085
V Vanadium	[µg/l]	486	109	487	109	<NG	<NG	<BG	0,143	0,419	0,985	7,807	0,371
Y Yttrium	[µg/l]	486	35	487	35	<NG	0,0090	0,0259	0,0735	0,2188	0,7143	44,31	0,7018
Zn Zink	[µg/l]	493	6	495	6	<NG	0,848	1,633	3,950	8,725	23,51	19,162	77,75

<NG = kleiner Nachweisgrenze
<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-4: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus den basischen bis ultra-basischen Silikatgesteinen des Kristallinen Grundgebirges

1.4 Basische bis ultrabasische Silikatgesteine des Kristallinen Grundgebirges													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	57	0	58	0	6,1	7,4	8,1	8,9	9,4	10,2	13,6	8,9
pH-Wert (Gelände)		60	0	61	0	5,32	5,85	6,22	6,72	7,10	7,52	8,15	6,69
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	60	0	61	0	2,0	5,8	10,5	21,5	27,4	32,6	68,3	21,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	56	0	57	0	0,31	3,55	4,65	7,60	9,58	10,92	12,10	7,21
O ₂ -Sättigung	[%]	56	0	57	0	3,0	29,6	44,3	69,5	89,6	97,8	105,8	64,9
CO ₂ frei	[mg/l]	57	0	58	0	<BG	3,5	5,3	10,6	21,1	32,9	331,8	20,1
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	57	36	58	36	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,47	0,69	<BG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	60	0	61	0	0,87	2,21	3,76	12,54	20,37	31,94	131,08	16,38
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	57	52	58	53	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	60	3	61	3	<NG	2,86	5,20	13,26	30,13	40,29	57,99	18,20
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	60	60	61	61	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	60	0	61	0	5,69	7,40	19,13	27,36	32,33	42,64	80,49	27,74
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	60	57	61	58	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	60	0	61	0	1,2	7,2	22,4	46,7	82,3	102,5	329,5	58,6
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	57	0	58	0	1,367	2,784	4,866	6,788	9,020	10,60	34,08	7,278
K ⁺ Kalium	[mg/l]	57	9	58	9	<NG	<NG	0,289	0,850	1,281	1,645	3,461	0,889
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	60	60	61	61	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	60	0	61	0	4,031	6,506	11,71	24,62	32,20	40,30	129,8	25,69
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	60	0	61	0	1,280	1,722	4,172	7,492	10,60	14,48	18,80	7,759
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	60	42	61	43	<NG	<NG	<NG	<NG	0,0115	0,0420	1,830	0,0625
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	60	24	61	25	<NG	<NG	<NG	<BG	0,00565	0,03425	0,4582	0,01986
Si Silicium	[mg/l]	60	0	61	0	3,99	4,65	5,23	8,55	10,52	13,79	24,29	8,78
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	57	20	58	20	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,59	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	56	0	57	0	31,65	54,87	91,20	181,7	221,7	244,1	545,6	174,6
Gesamthärte	[° dH]	60	0	61	0	0,899	1,35	2,58	5,37	7,12	7,91	20,2	5,38
Karbonathärte	[° dH]	60	0	61	0	0,06	0,33	1,03	2,14	3,78	4,70	15,13	2,69
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		57	0	58	0	-5,39	-4,38	-3,32	-2,62	-1,69	-0,99	-0,19	-2,64
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	57	0	58	0	<BG	0,08	0,12	0,24	0,48	0,75	7,54	0,46
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	60	0	61	0	<BG	0,118	0,367	0,765	1,349	1,680	5,400	0,960
Ag Silber	[µg/l]	42	32	42	32	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,036	0,073	<BG
Al Aluminium	[µg/l]	57	37	58	38	<NG	<NG	<NG	<NG	2,496	12,00	235,9	8,673
As Arsen	[µg/l]	57	20	58	20	<NG	<NG	<NG	0,185	1,330	2,880	10,68	1,082
Au Gold	[µg/l]	32	15	32	15	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	<BG	0,108	<BG
B Bor	[µg/l]	47	27	48	27	<NG	<NG	<NG	<NG	2,805	4,126	19,57	1,860
Ba Barium	[µg/l]	57	2	58	2	<NG	<BG	1,92	8,02	18,3	75,4	108	22,1
Be Beryllium	[µg/l]	57	39	58	40	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	3,577	28,51	1,440
Bi Wismut	[µg/l]	57	18	58	19	<NG	<NG	<NG	<BG	0,011	0,042	0,640	0,031
Cd Cadmium	[µg/l]	57	20	58	21	<NG	<NG	<NG	0,010	0,043	0,144	0,357	0,042
Ce Cer	[µg/l]	32	0	32	0	<BG	<BG	0,008	0,010	0,047	0,143	0,240	0,043
Co Cobalt	[µg/l]	57	16	58	17	<NG	<NG	<NG	0,022	0,052	0,199	3,871	0,137
Cr Chrom	[µg/l]	57	10	58	11	<NG	<NG	<BG	0,368	0,653	0,932	1,340	0,418
Cs Cäsium	[µg/l]	57	6	58	7	<NG	<BG	0,0020	0,0067	0,0570	0,3488	1,442	0,1118
Cu Kupfer	[µg/l]	57	0	58	0	0,099	0,211	0,419	0,858	2,415	5,621	37,13	2,789
Hg Quecksilber	[µg/l]	57	42	58	43	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,162	1,610	0,063
La Lanthan	[µg/l]	57	10	58	11	<NG	<NG	0,0062	0,0233	0,0440	0,1208	0,2300	0,0390
Li Lithium	[µg/l]	57	4	58	4	<NG	0,060	0,106	1,720	3,850	6,120	8,730	2,515
Mo Molybdän	[µg/l]	57	29	58	29	<NG	<NG	<NG	<NG	0,480	0,888	12,06	0,563
Ni Nickel	[µg/l]	57	25	58	26	<NG	<NG	<NG	0,187	0,843	2,091	9,962	0,807
Pb Blei	[µg/l]	57	22	58	23	<NG	<NG	<NG	0,025	0,146	0,322	1,592	0,126
Rb Rubidium	[µg/l]	57	0	58	0	0,070	0,102	0,149	0,292	0,852	1,953	5,743	0,758
Sb Antimon	[µg/l]	57	14	58	15	<NG	<NG	<BG	0,016	0,050	0,202	2,094	0,114
Se Selen	[µg/l]	57	39	58	40	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	2,957	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	57	26	58	27	<NG	<NG	<NG	<BG	0,037	0,061	0,255	<BG
Sr Strontium	[µg/l]	57	0	58	0	15,4	31,0	41,6	87,5	137	227	475	113
Th Thorium	[µg/l]	57	32	58	32	<NG	<NG	<NG	<NG	0,070	0,234	2,450	0,112
Ti Titan	[µg/l]	57	0	58	0	<BG	0,233	0,817	1,661	5,332	10,73	51,80	4,579
Tl Thallium	[µg/l]	57	44	58	45	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,040	0,640	0,026
U Uran	[µg/l]	57	4	58	4	<NG	<BG	0,0030	0,0490	0,2100	0,5600	2,019	0,2238
V Vanadium	[µg/l]	57	4	58	4	<NG	<BG	0,127	0,570	1,340	2,125	3,624	0,870
Y Yttrium	[µg/l]	57	10	58	11	<NG	<NG	0,0180	0,0540	0,1300	0,1646	1,027	0,0922
Zn Zink	[µg/l]	57	0	58	0	0,281	1,660	2,743	6,270	10,90	22,67	223,9	16,97

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-5: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus den Tertiären Vulkaniten

2 Tertiäre Vulkanite												
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	5	0	5	0	6,0	---	---	8,0	---	---	9,9 7,8
pH-Wert (Gelände)		5	0	5	0	6,85	---	---	7,00	---	---	7,37 7,08
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	5	0	5	0	9,1	---	---	27,5	---	---	33,2 24,7
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	5	0	5	0	6,80	---	---	9,10	---	---	10,40 8,94
O ₂ -Sättigung	[%]	5	0	5	0	62,0	---	---	74,9	---	---	90,0 76,1
CO ₂ frei	[mg/l]	5	0	5	0	0,9	---	---	21,1	---	---	30,8 15,8
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	5	2	5	2	<NG	---	---	<NG	---	---	0,33 <BG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	5	0	5	0	2,45	---	---	4,09	---	---	4,45 3,61
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	5	5	5	5	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG <NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	5,65	---	---	12,80 5,91
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	5	5	5	5	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG <NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	5	0	5	0	10,87	---	---	44,83	---	---	63,39 40,90
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	5	4	5	4	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG <NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	5	0	5	0	19,5	---	---	97,7	---	---	119,8 85,7
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	5	0	5	0	2,030	---	---	5,321	---	---	8,140 5,514
K ⁺ Kalium	[mg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	1,268	---	---	1,854 1,117
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	5	4	5	4	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG <NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	5	0	5	0	6,412	---	---	27,66	---	---	30,17 22,55
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	5	0	5	0	3,403	---	---	13,46	---	---	18,93 12,57
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	<BG	---	---	0,2259 0,0725
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	<BG	---	---	0,01900 0,00430
Si Silicium	[mg/l]	5	0	5	0	2,09	---	---	19,69	---	---	19,84 14,37
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	3	0	3	0	<NG	---	---	---	---	---	2,38 1,69
Gesamtmineralisation	[mg/l]	5	0	5	0	101,6	---	---	221,2	---	---	263,2 192,8
Gesamthärte	[° dH]	5	0	5	0	1,68	---	---	6,97	---	---	8,30 6,05
Karbonathärte	[° dH]	5	0	5	0	0,90	---	---	4,48	---	---	5,50 3,93
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		5	0	5	0	-2,91	---	---	-1,68	---	---	-1,65 -1,96
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	5	0	5	0	<BG	---	---	0,48	---	---	0,70 0,36
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	5	0	5	0	0,320	---	---	1,601	---	---	1,963 1,404
Ag Silber	[µg/l]	4	4	4	4	<NG	---	---	---	---	---	<NG <NG
Al Aluminium	[µg/l]	5	0	5	0	<BG	---	---	1,020	---	---	8,077 2,829
As Arsen	[µg/l]	5	0	5	0	0,107	---	---	0,146	---	---	0,690 0,294
Au Gold	[µg/l]	4	3	4	3	<NG	---	---	<BG	---	---	<BG <BG
B Bor	[µg/l]	5	2	5	2	<NG	---	---	2,868	---	---	6,150 2,879
Ba Barium	[µg/l]	5	0	5	0	3,00	---	---	8,10	---	---	115 29,5
Be Beryllium	[µg/l]	5	2	5	2	<NG	---	---	<BG	---	---	0,063 <BG
Bi Wismut	[µg/l]	5	4	5	4	<NG	---	---	<NG	---	---	<BG <NG
Cd Cadmium	[µg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	<BG	---	---	0,091 0,023
Ce Cer	[µg/l]	4	2	4	2	<NG	---	---	---	---	---	0,037 0,018
Co Cobalt	[µg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	0,025	---	---	0,070 0,029
Cr Chrom	[µg/l]	5	0	5	0	0,203	---	---	0,588	---	---	2,515 1,231
Cs Cäsium	[µg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	0,0044	---	---	0,0364 0,0132
Cu Kupfer	[µg/l]	5	0	5	0	0,064	---	---	0,560	---	---	1,825 0,680
Hg Quecksilber	[µg/l]	5	2	5	2	<NG	---	---	0,030	---	---	0,053 <BG
La Lanthan	[µg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	0,0072	---	---	0,0464 0,0157
Li Lithium	[µg/l]	5	0	5	0	0,261	---	---	0,510	---	---	1,886 0,779
Mo Molybdän	[µg/l]	5	0	5	0	0,091	---	---	0,108	---	---	1,444 0,386
Ni Nickel	[µg/l]	5	0	5	0	0,430	---	---	0,946	---	---	3,510 1,526
Pb Blei	[µg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	<BG	---	---	0,600 0,195
Rb Rubidium	[µg/l]	5	0	5	0	0,651	---	---	2,603	---	---	4,529 2,370
Sb Antimon	[µg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	0,015	---	---	0,534 0,122
Se Selen	[µg/l]	5	5	5	5	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG <NG
Sn Zinn	[µg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	<BG	---	---	0,126 0,042
Sr Strontium	[µg/l]	5	0	5	0	78,6	---	---	211	---	---	240 183
Th Thorium	[µg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	0,011	---	---	0,043 0,014
Ti Titan	[µg/l]	5	0	5	0	0,579	---	---	3,616	---	---	6,204 3,996
Tl Thallium	[µg/l]	5	1	5	1	<NG	---	---	<BG	---	---	0,305 0,062
U Uran	[µg/l]	5	0	5	0	0,0120	---	---	0,0510	---	---	0,3919 0,1077
V Vanadium	[µg/l]	5	0	5	0	0,650	---	---	1,264	---	---	3,200 1,561
Y Yttrium	[µg/l]	5	0	5	0	0,0090	---	---	0,0307	---	---	0,1142 0,0436
Zn Zink	[µg/l]	5	0	5	0	1,931	---	---	4,339	---	---	88,77 20,80

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-6: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Perm ohne „Zechstein in salinarer Fazies“

3.1 Perm ohne „Zechstein in salinarer Fazies“													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	29	0	29	0	7,5	8,3	8,9	9,5	10,3	10,9	13,3	9,7
pH-Wert (Gelände)		29	0	29	0	5,20	6,25	6,60	7,16	7,60	7,69	7,80	7,06
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	29	0	29	0	3,5	8,2	20,4	26,8	39,3	46,1	69,1	29,5
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	28	0	28	0	1,84	3,10	5,20	6,85	8,43	10,50	11,90	6,86
O ₂ -Sättigung	[%]	19	0	19	0	2,5	18,8	39,5	58,9	76,0	94,0	99,4	56,3
CO ₂ frei	[mg/l]	29	0	29	0	1,8	4,2	5,3	9,7	15,8	32,6	37,0	12,7
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	14	9	14	9	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,42	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	27	0	27	0	4,30	4,83	6,42	10,39	18,60	31,04	48,74	14,76
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	14	14	14	14	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	27	0	27	0	3,64	7,44	9,50	12,50	26,35	44,74	57,75	19,90
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	27	27	27	27	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	27	0	27	0	7,57	11,54	18,45	20,80	27,16	41,69	179,00	28,23
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	17	15	17	15	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	27	0	27	0	4,2	39,8	94,3	152,5	194,9	226,0	307,5	145,6
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	27	0	27	0	1,800	3,311	4,040	8,200	10,92	13,28	24,46	8,403
K ⁺ Kalium	[mg/l]	27	0	27	0	0,580	1,428	1,675	2,000	2,836	7,620	23,10	3,710
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	27	27	27	27	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	29	0	29	0	5,270	21,04	34,24	42,13	51,57	91,72	103,0	46,67
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	27	0	27	0	3,070	5,980	7,300	12,30	17,39	22,75	31,71	12,96
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	27	11	27	11	<NG	<NG	<NG	0,0400	0,1050	0,2075	0,2865	0,0691
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	29	20	29	20	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,02230	0,3101	0,01646
Si Silicium	[mg/l]	27	0	27	0	3,36	3,87	4,42	5,70	7,11	9,05	9,47	6,00
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	14	0	14	0	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	2,02	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	27	0	27	0	56,63	168,4	246,7	268,6	329,5	419,5	543,5	283,0
Gesamthärte	[° dH]	27	0	27	0	1,44	5,07	7,39	8,57	10,6	13,9	17,6	9,02
Karbonathärte	[° dH]	27	0	27	0	0,19	1,83	4,33	7,00	8,95	10,38	14,12	6,69
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		27	0	27	0	-5,60	-2,78	-2,18	-1,13	-0,61	-0,56	-0,30	-1,50
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	29	0	29	0	<BG	0,10	0,12	0,22	0,36	0,74	0,84	0,29
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	27	0	27	0	0,069	0,652	1,545	2,499	3,195	3,704	5,040	2,387
Ag Silber	[µg/l]	13	9	13	9	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,017	0,025	<BG
Al Aluminium	[µg/l]	16	12	16	12	<NG	<NG	<NG	<NG	1,666	24,17	65,71	7,536
As Arsen	[µg/l]	16	0	16	0	0,910	1,069	1,798	4,231	7,586	13,80	23,18	6,349
Au Gold	[µg/l]	13	4	13	4	<NG	<NG	<NG	<BG	0,075	0,110	0,114	0,044
B Bor	[µg/l]	16	4	16	4	<NG	<NG	2,460	10,59	54,57	158,1	371,7	54,32
Ba Barium	[µg/l]	16	0	16	0	2,98	65,8	101	256	521	622	799	312
Be Beryllium	[µg/l]	16	8	16	8	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,181	0,400	0,060
Bi Wismut	[µg/l]	16	5	16	5	<NG	<NG	<NG	<BG	0,009	0,016	0,240	0,020
Cd Cadmium	[µg/l]	16	6	16	6	<NG	<NG	<NG	0,009	0,030	0,059	0,355	0,037
Ce Cer	[µg/l]	13	0	13	0	0,022	0,027	0,035	0,049	0,135	0,199	0,230	0,084
Co Cobalt	[µg/l]	16	3	16	3	<NG	<NG	0,015	0,029	0,109	0,168	0,281	0,066
Cr Chrom	[µg/l]	16	1	16	1	<NG	<BG	<BG	0,278	0,373	0,408	0,548	0,274
Cs Cäsium	[µg/l]	16	1	16	1	<NG	0,0450	0,1225	0,2990	0,6760	2,641	10,32	1,215
Cu Kupfer	[µg/l]	16	0	16	0	0,200	0,273	0,556	1,196	2,515	9,168	26,33	3,683
Hg Quecksilber	[µg/l]	16	11	16	11	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,034	0,440	0,033
La Lanthan	[µg/l]	16	0	16	0	0,0110	0,0150	0,0188	0,0390	0,0908	0,1240	0,1600	0,0588
Li Lithium	[µg/l]	16	0	16	0	0,720	2,161	4,447	19,70	34,94	212,0	704,6	82,95
Mo Molybdän	[µg/l]	16	7	16	7	<NG	<NG	<NG	0,111	0,697	2,839	8,989	1,091
Ni Nickel	[µg/l]	16	5	16	5	<NG	<NG	<NG	0,479	1,407	2,678	5,969	1,115
Pb Blei	[µg/l]	16	3	16	3	<NG	<NG	0,031	0,048	0,087	0,250	2,730	0,236
Rb Rubidium	[µg/l]	16	0	16	0	0,690	1,823	2,731	3,722	4,905	23,85	66,24	9,694
Sb Antimon	[µg/l]	16	11	16	11	<NG	<NG	<NG	<NG	0,211	0,952	2,059	0,287
Se Selen	[µg/l]	16	1	16	1	<NG	<BG	<BG	<BG	2,296	7,229	15,44	2,729
Sn Zinn	[µg/l]	16	6	16	6	<NG	<NG	<NG	<BG	0,058	0,138	0,748	0,081
Sr Strontium	[µg/l]	16	0	16	0	25,5	31,2	68,5	122	313	1,599	2,960	491
Th Thorium	[µg/l]	15	1	15	1	<NG	<BG	0,014	0,038	0,113	0,168	0,179	0,067
Ti Titan	[µg/l]	16	0	16	0	0,271	0,344	0,475	0,754	2,075	3,575	3,780	1,403
Tl Thallium	[µg/l]	16	6	16	6	<NG	<NG	<NG	0,005	0,072	0,200	0,601	0,074
U Uran	[µg/l]	16	1	16	1	<NG	0,1850	0,7190	1,586	4,705	5,778	15,15	3,050
V Vanadium	[µg/l]	16	2	16	2	<NG	0,038	0,260	0,870	1,700	7,865	14,52	2,496
Y Yttrium	[µg/l]	16	0	16	0	0,0200	0,0360	0,0480	0,0575	0,0685	0,1000	0,1400	0,0632
Zn Zink	[µg/l]	16	0	16	0	1,890	2,416	3,993	5,797	11,21	69,25	135,0	21,84

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-7: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Zechstein in salinarer Fazies

3.2 Zechstein in salinarer Fazies													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	11	0	11	0	12,0	12,2	12,9	13,5	15,4	16,0	18,3	14,1
pH-Wert (Gelände)		11	0	11	0	5,70	5,70	5,85	5,90	6,20	6,70	7,10	6,10
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	11	0	11	0	429,8	556,0	747,5	1.310,0	2.178,0	3.100,0	4.000,0	1.629,3
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	5	0	5	0	1,00	---	---	2,80	---	---	7,10	3,16
O ₂ -Sättigung	[%]	2	0	2	0	20,6	---	---	---	---	---	27,4	24,0
CO ₂ frei	[mg/l]	2	0	2	0	616,0	---	---	---	---	---	641,6	628,8
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	8	2	8	2	<NG	---	---	2,42	---	---	6,20	2,48
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	11	0	11	0	541,10	855,00	1.560,00	4.286,60	7.559,00	14.870,00	23.795,00	6.407,39
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	8	0	8	0	0,90	---	---	8,15	---	---	37,90	13,96
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	11	7	11	7	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	2,40	28,20	2,94
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	8	8	8	8	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	11	0	11	0	517,30	631,80	941,25	1.353,00	2.356,50	3.231,00	4.790,50	1.838,87
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	8	8	8	8	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	11	0	11	0	878,7	1.043,0	1.343,5	1.584,0	1.894,0	2.011,0	2.097,0	1.560,8
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	11	0	11	0	600,0	998,2	1.275	2.710	5.095	8.750	14.700	4.201
K ⁺ Kalium	[mg/l]	11	0	11	0	39,80	41,00	51,90	65,00	103,5	217,9	496,0	118,3
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	8	1	8	1	<NG	---	---	2,07	---	---	5,49	2,33
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	11	0	11	0	135,1	153,1	463,3	541,5	1.023	1.635	1.671	741,5
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	11	0	11	0	54,94	70,30	195,9	228,5	379,3	438,5	440,0	257,4
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	8	0	8	0	0,1800	---	---	16,17	---	---	28,00	14,72
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	8	0	8	0	0,2305	---	---	1,296	---	---	3,159	1,674
Si Silicium	[mg/l]	8	0	8	0	2,21	---	---	2,50	---	---	6,17	3,52
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	8	0	8	0	1,73	---	---	3,03	---	---	3,80	2,92
Gesamtmineralisation	[mg/l]	11	0	11	0	3.957	4.541	5.826	10.309	19.095	30.169	46.514	15.156
Gesamthärte	[° dH]	11	0	11	0	34,0	35,1	114	125	231	320	335	163
Karbonathärte	[° dH]	11	0	11	0	40,34	47,88	61,68	72,72	86,95	92,32	96,27	71,65
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		11	0	11	0	-1,04	-0,72	-0,47	0,06	0,19	0,25	0,38	-0,14
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	8	0	8	0	<BG	---	---	<BG	---	---	14,58	3,57
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	11	0	11	0	14,401	17,094	22,018	25,960	31,041	32,958	34,367	25,580
Ag Silber	[µg/l]	1	1	1	1	---	---	---	---	---	---	---	<NG
Al Aluminium	[µg/l]	8	0	8	0	9.520	---	---	27,49	---	---	133,6	44,79
As Arsen	[µg/l]	8	0	8	0	70,92	---	---	810,6	---	---	3.956	1.685
Au Gold	[µg/l]	0	0	0	0	---	---	---	---	---	---	---	---
B Bor	[µg/l]	8	0	8	0	394,9	---	---	1.078	---	---	2.720	1.155
Ba Barium	[µg/l]	8	0	8	0	22,9	---	---	37,6	---	---	150	67,3
Be Beryllium	[µg/l]	8	0	8	0	0,456	---	---	3,348	---	---	5,885	2,951
Bi Wismut	[µg/l]	8	0	8	0	0,151	---	---	0,736	---	---	10,62	2,883
Cd Cadmium	[µg/l]	8	0	8	0	0,327	---	---	0,958	---	---	14,69	3,943
Ce Cer	[µg/l]	0	0	0	0	---	---	---	---	---	---	---	---
Co Cobalt	[µg/l]	7	6	7	6	<NG	---	---	<NG	---	---	5,550	0,793
Cr Chrom	[µg/l]	8	0	8	0	3.440	---	---	6.210	---	---	8.290	6.015
Cs Cäsium	[µg/l]	8	0	8	0	2.007	---	---	5.103	---	---	316,8	44,28
Cu Kupfer	[µg/l]	8	0	8	0	13,32	---	---	60,26	---	---	1.400	225,9
Hg Quecksilber	[µg/l]	8	0	8	0	3,169	---	---	14,75	---	---	241,1	64,97
La Lanthan	[µg/l]	8	0	8	0	0,0860	---	---	0,3055	---	---	4,625	1,560
Li Lithium	[µg/l]	8	0	8	0	13,04	---	---	5,069	---	---	21.300	7.887
Mo Molybdän	[µg/l]	8	0	8	0	0,765	---	---	2,292	---	---	15,63	4,703
Ni Nickel	[µg/l]	7	6	7	6	<NG	---	---	<NG	---	---	13,21	1,887
Pb Blei	[µg/l]	8	0	8	0	0,416	---	---	1,156	---	---	41,00	9,441
Rb Rubidium	[µg/l]	8	0	8	0	99,39	---	---	490,0	---	---	4.928	949,6
Sb Antimon	[µg/l]	8	0	8	0	0,417	---	---	1,558	---	---	18,39	5,766
Se Selen	[µg/l]	8	0	8	0	6,040	---	---	26,92	---	---	246,5	75,32
Sn Zinn	[µg/l]	8	0	8	0	0,339	---	---	1,447	---	---	9,274	2,998
Sr Strontium	[µg/l]	8	0	8	0	2.149	---	---	6.617	---	---	28.080	12.503
Th Thorium	[µg/l]	8	0	8	0	0,471	---	---	1,382	---	---	19,67	5,396
Ti Titan	[µg/l]	8	0	8	0	14,11	---	---	29,71	---	---	67,85	36,83
Tl Thallium	[µg/l]	8	0	8	0	0,274	---	---	6,146	---	---	223,9	39,00
U Uran	[µg/l]	8	0	8	0	4.800	---	---	49,58	---	---	220,0	63,00
V Vanadium	[µg/l]	8	0	8	0	9,360	---	---	35,67	---	---	88,11	43,22
Y Yttrium	[µg/l]	8	0	8	0	0,5740	---	---	4,878	---	---	14,23	5,806
Zn Zink	[µg/l]	8	0	8	0	109,8	---	---	243,4	---	---	734,0	287,5

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-8: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Buntsandstein

3.3 Buntsandstein													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	316	0	348	0	6,1	7,7	8,0	8,9	10,1	11,0	50,8	9,4
pH-Wert (Gelände)		338	0	373	0	4,20	5,20	5,65	6,40	7,00	7,34	8,14	6,32
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	333	0	370	0	0,9	5,4	8,8	15,9	38,4	66,0	12.861,2	67,2
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	299	0	322	0	<BG	6,00	8,30	9,90	11,00	11,60	14,00	9,31
O ₂ -Sättigung	[%]	153	0	159	0	3,4	36,6	66,0	81,6	98,2	106,6	122,9	78,2
CO ₂ frei	[mg/l]	277	0	299	0	<BG	6,2	10,6	17,0	29,0	42,1	69,5	21,2
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	155	112	161	117	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,85	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	336	2	372	2	<NG	3,80	4,89	8,03	18,42	32,05	644,80	17,67
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	149	142	154	145	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,61	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	338	7	377	13	<NG	1,87	3,06	6,10	17,44	33,48	114,10	13,15
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	310	303	335	327	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,00	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	337	1	374	1	<NG	7,65	13,00	21,00	34,56	55,74	600,90	36,44
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	184	176	200	191	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	3,00	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	332	0	351	0	1,2	5,1	9,6	37,5	151,6	293,0	555,3	95,6
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	313	0	337	0	0,499	2,100	2,700	3,800	6,881	13,34	515,0	9,011
K ⁺ Kalium	[mg/l]	313	1	337	1	<NG	1,402	1,800	2,400	3,600	5,286	30,00	3,135
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	316	315	343	342	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,82	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	328	0	353	0	2,397	4,714	7,000	15,55	49,69	96,97	234,7	35,21
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	328	0	353	0	1,000	1,947	3,140	5,850	13,14	21,47	75,90	9,821
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	330	116	355	127	<NG	<NG	<NG	0,0200	0,0526	0,1373	7,490	0,0854
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	325	164	349	176	<NG	<NG	<NG	<NG	0,01000	0,06000	2,130	0,03142
Si Silicium	[mg/l]	305	0	327	0	1,82	2,34	2,85	3,93	5,14	6,05	48,93	4,40
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	162	30	169	30	<NG	<NG	<NG	<NG	2,88	5,24	121,90	3,13
Gesamtmineralisation	[mg/l]	317	0	342	0	28,670	45,59	63,89	120,9	317,7	557,7	2.085	220,9
Gesamthärte	[° dH]	335	0	361	0	0,584	1,17	1,74	3,60	10,8	20,0	44,3	7,36
Karbonathärte	[° dH]	332	0	351	0	0,06	0,24	0,44	1,72	6,96	13,45	25,49	4,39
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		304	0	319	0	-6,57	-5,54	-4,68	-3,21	-1,43	-0,53	0,15	-3,10
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	278	0	300	0	<BG	0,14	0,24	0,40	0,66	0,94	1,60	0,48
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	332	0	351	0	<BG	0,084	0,157	0,615	2,485	4,802	9,101	1,567
Ag Silber	[µg/l]	35	25	38	26	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,017	0,909	0,032
Al Aluminium	[µg/l]	162	44	168	46	<NG	<NG	<NG	8,580	33,16	130,4	1.446	53,23
As Arsen	[µg/l]	167	18	174	20	<NG	<NG	0,652	1,300	3,275	6,004	836,9	7,839
Au Gold	[µg/l]	34	14	37	15	<NG	<NG	<NG	<BG	0,058	0,113	0,564	0,050
B Bor	[µg/l]	162	25	168	27	<NG	<NG	3,622	7,175	15,49	34,12	908,8	24,85
Ba Barium	[µg/l]	162	0	168	0	6,90	27,5	54,3	91,2	156	300	670	128
Be Beryllium	[µg/l]	162	76	168	79	<NG	<NG	<NG	<BG	0,377	1,255	3,440	0,342
Bi Wismut	[µg/l]	162	110	168	114	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,110	0,830	0,031
Cd Cadmium	[µg/l]	167	108	174	114	<NG	<NG	<NG	<NG	0,100	0,442	2,400	0,121
Ce Cer	[µg/l]	34	2	37	2	<NG	<BG	0,011	0,023	0,085	0,159	1,785	0,101
Co Cobalt	[µg/l]	162	40	168	43	<NG	<NG	<BG	0,080	0,340	1,297	6,530	0,443
Cr Chrom	[µg/l]	167	37	174	39	<NG	<NG	<BG	0,410	0,735	1,000	5,040	0,519
Cs Cäsium	[µg/l]	162	29	168	30	<NG	<NG	0,0100	0,0400	0,1650	0,4386	365,7	2,496
Cu Kupfer	[µg/l]	162	6	169	7	<NG	0,200	0,362	1,011	2,795	6,220	135,0	4,367
Hg Quecksilber	[µg/l]	167	114	174	118	<NG	<NG	<NG	<NG	0,155	0,720	5,220	0,251
La Lanthan	[µg/l]	162	12	168	13	<NG	0,0050	0,0103	0,0470	0,1152	0,2770	3,966	0,1673
Li Lithium	[µg/l]	162	0	168	0	0,340	0,970	1,978	4,810	12,03	26,88	4,010	42,72
Mo Molybdän	[µg/l]	162	95	168	97	<NG	<NG	<NG	<NG	0,167	0,536	6,610	0,236
Ni Nickel	[µg/l]	162	25	169	29	<NG	<NG	0,477	2,149	4,015	8,352	61,00	3,425
Pb Blei	[µg/l]	167	86	174	88	<NG	<NG	<NG	<NG	0,215	0,588	33,47	0,547
Rb Rubidium	[µg/l]	162	0	168	0	0,160	1,023	1,473	2,985	6,318	13,05	3,566	27,42
Sb Antimon	[µg/l]	162	116	168	119	<NG	<NG	<NG	<NG	0,038	0,110	1,530	0,050
Se Selen	[µg/l]	167	105	173	108	<NG	<NG	<NG	<NG	3,620	6,424	31,06	2,678
Sn Zinn	[µg/l]	162	118	168	123	<NG	<NG	<NG	<NG	0,032	0,619	4,520	0,172
Sr Strontium	[µg/l]	162	0	168	0	4,50	23,2	33,8	54,8	127	420	15.810	243
Th Thorium	[µg/l]	147	70	151	73	<NG	<NG	<NG	0,015	0,097	0,496	2,630	0,143
Ti Titan	[µg/l]	161	18	167	18	<NG	<NG	0,759	3,800	6,420	10,34	53,50	5,541
Tl Thallium	[µg/l]	162	113	168	116	<NG	<NG	<NG	<NG	0,078	0,182	96,33	0,652
U Uran	[µg/l]	162	51	168	53	<NG	<NG	<NG	0,1800	0,9890	3,651	58,27	1,395
V Vanadium	[µg/l]	162	20	168	22	<NG	<NG	0,236	0,490	0,841	1,347	72,25	1,126
Y Yttrium	[µg/l]	162	16	168	17	<NG	0,0022	0,0305	0,1075	0,2582	0,6380	3,750	0,2892
Zn Zink	[µg/l]	166	4	172	4	<NG	3,070	5,287	9,907	25,41	47,99	850,7	28,07

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-9: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Muschelkalk in karbonatisch-klastischer Fazies

3.4 Muschelkalk in karbonatisch-klastischer Fazies													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	166	0	185	0	5,5	8,8	9,4	10,1	10,8	11,5	14,8	10,1
pH-Wert (Gelände)		170	0	190	0	6,70	7,00	7,10	7,30	7,40	7,59	8,20	7,30
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	166	0	185	0	37,0	59,2	68,1	79,4	92,0	103,3	126,5	80,6
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	138	0	143	0	0,20	2,73	4,14	7,15	9,20	10,23	12,90	6,70
O ₂ -Sättigung	[%]	82	0	85	0	18,9	26,7	42,4	62,0	78,3	86,0	106,8	60,0
CO ₂ frei	[mg/l]	127	0	131	0	8,8	15,8	20,2	29,9	39,6	54,9	71,3	32,1
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	72	38	76	41	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,50	2,13	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	169	0	182	0	1,70	12,00	18,75	35,50	56,18	80,95	118,60	40,56
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	65	63	66	64	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	173	1	192	1	<NG	4,18	10,22	24,90	48,80	70,98	152,40	33,05
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	138	137	143	142	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,40	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	173	0	190	0	19,62	35,71	46,50	66,77	95,50	128,32	330,92	76,50
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	111	108	114	111	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	9,60	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	162	0	167	0	252,6	323,2	354,1	395,0	431,7	469,8	650,4	397,7
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	157	0	162	0	0,900	3,400	4,800	7,880	13,81	20,86	70,60	10,83
K ⁺ Kalium	[mg/l]	159	1	164	1	<NG	1,100	1,485	2,390	3,743	6,012	16,00	3,011
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	130	126	135	131	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	162	0	167	0	54,30	96,63	108,7	121,9	132,3	147,9	195,6	122,1
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	162	0	167	0	3,400	19,48	27,75	37,08	49,88	58,39	90,00	38,91
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	152	38	157	41	<NG	<NG	<BG	0,0350	0,1000	0,1690	1,088	0,0879
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	124	71	127	73	<NG	<NG	<NG	<NG	0,01000	0,02000	1,395	0,02618
Si Silicium	[mg/l]	144	0	149	1	<BG	2,91	3,48	4,45	5,61	7,49	41,40	5,37
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	65	5	66	5	<NG	<NG	<NG	<NG	2,02	2,38	4,10	1,41
Gesamtmineralisation	[mg/l]	162	0	171	0	448,0	590,2	653,7	720,9	799,8	899,9	1.109	728,2
Gesamthärte	[° dH]	171	0	179	0	16,1	20,7	23,0	25,8	28,5	31,1	37,9	25,9
Karbonathärte	[° dH]	162	0	167	0	11,60	14,84	16,25	18,14	19,82	21,57	29,86	18,26
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		155	0	160	0	-0,70	-0,52	-0,39	-0,28	-0,09	0,04	0,61	-0,23
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	127	0	131	0	0,20	0,36	0,47	0,70	0,90	1,25	1,62	0,73
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	162	0	167	0	4,140	5,297	5,803	6,474	7,075	7,699	10,659	6,517
Ag Silber	[µg/l]	8	0	8	0	<BG	---	---	0,123	---	---	0,392	0,186
Al Aluminium	[µg/l]	64	40	65	41	<NG	<NG	<NG	1,490	7,286	55,75	2,587	
As Arsen	[µg/l]	71	11	75	14	<NG	<NG	0,846	1,180	2,365	3,885	30,15	3,097
Au Gold	[µg/l]	1	1	1	1	---	---	---	---	---	---	---	<NG
B Bor	[µg/l]	47	0	48	0	8,500	12,59	22,42	44,70	97,03	187,9	336,0	76,45
Ba Barium	[µg/l]	64	0	65	0	5,97	38,6	58,4	76,4	142	212	345	106
Be Beryllium	[µg/l]	64	55	65	56	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,170	<NG
Bi Wismut	[µg/l]	64	39	65	40	<NG	<NG	<NG	<NG	0,370	0,813	2,060	0,222
Cd Cadmium	[µg/l]	71	45	75	49	<NG	<NG	<NG	<NG	0,045	0,083	0,260	0,030
Ce Cer	[µg/l]	1	0	1	0	---	---	---	---	---	---	---	0,021
Co Cobalt	[µg/l]	64	2	65	2	<NG	0,035	0,056	0,112	1,520	1,810	2,050	0,680
Cr Chrom	[µg/l]	69	8	73	9	<NG	<NG	0,250	0,470	2,470	5,102	10,02	1,639
Cs Cäsium	[µg/l]	64	2	65	2	<NG	0,0038	0,0063	0,0135	0,0280	0,0849	0,1300	0,0264
Cu Kupfer	[µg/l]	64	0	65	0	0,100	0,488	0,680	1,143	2,120	3,848	307,5	6,483
Hg Quecksilber	[µg/l]	54	46	58	50	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,097	1,430	0,064
La Lanthan	[µg/l]	64	27	65	27	<NG	<NG	<NG	0,0062	0,0233	0,0949	0,3300	0,0299
Li Lithium	[µg/l]	64	0	65	0	1,460	5,415	7,467	14,18	25,89	44,93	105,0	20,04
Mo Molybdän	[µg/l]	64	5	65	6	<NG	0,146	0,240	0,370	0,685	1,388	2,030	0,563
Ni Nickel	[µg/l]	64	7	66	8	<NG	<NG	0,245	1,745	3,513	9,014	42,72	4,123
Pb Blei	[µg/l]	71	15	75	16	<NG	<NG	<BG	0,140	0,516	1,065	9,200	0,490
Rb Rubidium	[µg/l]	64	0	65	0	0,369	0,665	0,869	1,670	2,625	3,625	5,840	1,917
Sb Antimon	[µg/l]	64	21	65	22	<NG	<NG	<NG	0,044	0,081	0,276	1,124	0,092
Se Selen	[µg/l]	71	36	74	39	<NG	<NG	<NG	<NG	3,815	7,620	11,15	2,337
Sr Strontium	[µg/l]	64	53	65	53	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,161	0,460	0,034
Th Thorium	[µg/l]	64	42	65	43	<NG	<NG	<NG	<NG	0,013	0,057	0,380	0,020
Ti Titan	[µg/l]	64	2	65	2	<NG	0,703	0,928	2,926	7,682	21,03	234,4	11,81
Tl Thallium	[µg/l]	64	30	65	31	<NG	<NG	<NG	0,008	0,108	0,274	0,624	0,090
U Uran	[µg/l]	64	0	65	0	0,1700	0,5930	0,7048	0,9993	1,592	1,957	3,907	1,186
V Vanadium	[µg/l]	64	0	65	0	0,135	0,241	0,412	0,576	0,883	1,604	5,760	0,869
Y Yttrium	[µg/l]	64	23	65	23	<NG	<NG	<NG	0,0140	0,0307	0,0600	0,1420	0,0230
Zn Zink	[µg/l]	70	0	73	0	1,740	5,334	8,603	18,54	35,01	106,2	2,352	79,49

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-10: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Mittleren Muschelkalk in salinarer Fazies

3.5 Mittlerer Muschelkalk in salinarer Fazies													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	82	0	84	0	8,8	10,2	11,1	11,9	12,6	13,7	20,9	12,0
pH-Wert (Gelände)		81	0	84	0	6,65	6,80	7,00	7,10	7,20	7,30	8,30	7,19
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	80	0	83	0	71,0	100,3	105,2	117,0	161,5	234,3	1.430,0	185,6
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	74	0	75	0	<BG	1,30	1,95	3,15	5,05	6,68	12,00	3,76
O ₂ -Sättigung	[%]	44	0	45	0	8,2	12,3	23,5	32,7	49,8	61,2	110,0	38,0
CO ₂ frei	[mg/l]	61	0	62	0	14,1	24,6	29,0	40,5	51,9	69,5	221,8	48,8
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	36	14	36	14	<NG	<NG	<NG	<NG	0,35	0,59	3,15	0,35
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	82	0	85	0	4,95	11,98	19,80	38,58	61,76	205,34	3.461,60	160,41
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	35	31	35	31	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	9,70	0,58
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	83	9	86	10	<NG	<NG	5,00	13,80	37,35	50,82	144,10	22,45
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	74	72	75	73	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,00	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	83	0	86	0	23,70	208,20	264,35	336,30	757,15	1.388,36	3.270,22	601,12
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	55	55	56	56	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	81	0	84	0	297,1	331,9	344,7	373,3	400,9	456,4	2.074,6	411,9
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	80	0	83	0	1,980	5,390	9,935	16,35	23,51	109,6	2.510	138,5
K ⁺ Kalium	[mg/l]	80	0	83	0	0,230	2,100	2,388	3,200	4,537	7,919	260,2	8,416
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	64	58	66	59	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	24,08	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	81	0	84	0	16,80	148,6	170,1	196,4	341,5	573,9	756,7	272,0
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	81	0	84	0	2,500	34,40	40,84	49,50	55,90	72,00	231,4	54,76
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	76	18	78	18	<NG	<NG	0,0120	0,0600	0,1673	1,045	25,60	0,8133
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	62	36	64	37	<NG	<NG	<NG	<NG	0,00337	0,05000	0,1500	0,01195
Si Silicium	[mg/l]	59	0	61	0	1,12	1,71	3,34	4,49	6,20	7,76	10,98	4,84
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	36	4	36	4	<NG	<NG	<NG	<NG	2,13	2,71	39,60	2,34
Gesamtmineralisation	[mg/l]	80	0	84	0	545,0	880,1	965,3	1.095	1.633	2.802	10.623	1.685
Gesamthärte	[° dH]	83	0	86	0	4,65	31,9	34,2	38,2	58,0	95,8	159	50,2
Karbonathärte	[° dH]	81	0	84	0	13,64	15,24	15,82	17,14	18,40	20,95	95,24	18,91
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		80	0	82	0	-0,46	-0,33	-0,26	-0,14	0,05	0,14	5,78	-0,03
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	61	0	62	0	0,32	0,56	0,66	0,90	1,30	1,64	5,04	1,12
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	81	0	84	0	4,869	5,440	5,649	6,118	6,570	7,480	34,000	6,751
Ag Silber	[µg/l]	16	1	16	1	<NG	0,193	0,365	0,426	0,512	0,597	3,089	0,562
Al Aluminium	[µg/l]	35	16	35	16	<NG	<NG	<NG	<BG	2,578	4,976	47,08	2,819
As Arsen	[µg/l]	36	1	36	1	<NG	0,677	0,943	1,387	6,045	58,65	186,2	18,65
Au Gold	[µg/l]	2	1	2	1	<NG	---	---	---	---	---	1,238	0,619
B Bor	[µg/l]	34	0	34	0	40,60	54,58	78,96	93,54	183,6	322,6	2.838	351,0
Ba Barium	[µg/l]	35	0	35	0	4,48	16,3	24,0	34,5	39,9	81,7	114	38,2
Be Beryllium	[µg/l]	35	19	35	19	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,156	1,010	0,064
Bi Wismut	[µg/l]	35	26	35	26	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,058	0,500	0,034
Cd Cadmium	[µg/l]	36	13	36	13	<NG	<NG	<NG	0,014	0,043	0,088	1,246	0,077
Ce Cer	[µg/l]	2	0	2	0	0,007	---	---	---	---	---	0,170	0,088
Co Cobalt	[µg/l]	35	5	35	5	<NG	<NG	0,038	0,112	1,770	2,018	5,700	0,931
Cr Chrom	[µg/l]	36	1	36	1	<NG	<BG	0,645	2,713	4,399	8,980	13,79	3,682
Cs Cäsium	[µg/l]	35	0	35	0	0,0028	0,0064	0,0105	0,0151	0,0269	0,3340	7,527	0,3272
Cu Kupfer	[µg/l]	35	0	35	0	0,160	0,517	0,920	1,462	2,446	18,37	54,13	6,089
Hg Quecksilber	[µg/l]	35	23	35	23	<NG	<NG	<NG	<NG	0,127	0,779	12,37	0,842
La Lanthan	[µg/l]	35	5	35	5	<NG	<NG	0,0049	0,0098	0,0250	0,1324	4,679	0,1889
Li Lithium	[µg/l]	35	0	35	0	11,31	17,73	20,38	22,58	48,45	415,1	1.363	160,5
Mo Molybdän	[µg/l]	35	0	35	0	0,300	0,574	0,874	1,098	1,350	2,250	8,106	1,410
Ni Nickel	[µg/l]	35	5	35	5	<NG	<NG	1,771	2,460	5,895	30,01	118,6	11,90
Pb Blei	[µg/l]	36	7	36	7	<NG	<NG	<BG	0,104	0,351	0,800	12,53	0,581
Rb Rubidium	[µg/l]	35	0	35	0	0,974	1,387	1,603	1,910	3,706	21,24	520,0	21,45
Sb Antimon	[µg/l]	35	10	35	10	<NG	<NG	<NG	0,034	0,127	0,347	11,98	0,449
Se Selen	[µg/l]	36	10	36	10	<NG	<NG	<NG	1,625	6,820	14,75	30,30	4,913
Sn Zinn	[µg/l]	35	16	35	16	<NG	<NG	<NG	<BG	0,186	0,732	25,25	0,885
Sr Strontium	[µg/l]	36	0	36	0	361	1.059	1.476	1.894	2.478	6.717	10.850	2.837
Th Thorium	[µg/l]	34	18	34	18	<NG	<NG	<NG	<NG	0,054	0,099	4,500	0,181
Ti Titan	[µg/l]	35	0	35	0	0,830	1,801	2,253	7,257	43,44	557,0	1.736	157,5
Tl Thallium	[µg/l]	35	4	35	4	<NG	<BG	0,013	0,030	0,114	0,211	0,500	0,085
U Uran	[µg/l]	35	0	35	0	0,0419	0,7984	1,056	1,232	1,479	2,069	5,090	1,416
V Vanadium	[µg/l]	35	3	35	3	<NG	0,196	0,429	0,630	1,455	18,86	86,35	6,393
Y Yttrium	[µg/l]	35	5	35	5	<NG	<NG	0,0200	0,0239	0,0750	0,2060	0,4500	0,0721
Zn Zink	[µg/l]	36	0	36	0	8,450	18,41	23,37	36,52	57,79	133,1	386,4	62,69

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-11: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Unteren Keuper

3.6 Unterer Keuper													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	195	0	198	0	6,4	8,7	9,3	9,7	10,5	11,5	15,0	9,9
pH-Wert (Gelände)		194	0	197	0	4,50	7,00	7,15	7,30	7,40	7,51	8,12	7,27
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	195	0	198	0	8,4	64,9	77,7	89,5	98,9	113,8	297,8	89,6
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	145	0	147	0	0,20	3,22	5,36	7,70	9,30	10,14	13,00	7,26
O ₂ -Sättigung	[%]	72	0	72	0	1,7	38,4	52,3	68,1	81,3	89,4	123,8	65,0
CO ₂ frei	[mg/l]	107	0	109	0	4,4	17,8	26,7	36,1	41,4	49,5	81,8	35,3
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	58	19	59	19	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,37	0,96	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	194	0	196	0	2,07	27,42	49,54	69,57	92,07	108,99	209,08	71,39
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	57	57	57	57	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	195	4	198	6	<NG	7,93	28,00	46,00	68,84	89,59	164,09	49,99
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	144	144	146	146	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	195	0	197	0	11,00	28,21	38,94	51,40	78,00	103,38	1.055,00	75,48
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	134	124	134	124	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	193	0	195	0	10,2	330,1	358,8	388,1	432,0	499,8	589,4	390,6
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	194	0	196	0	1,390	5,942	7,200	8,900	11,62	18,97	34,00	10,55
K ⁺ Kalium	[mg/l]	194	0	196	0	0,300	0,800	1,324	2,000	3,375	6,222	55,00	3,344
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	145	137	145	137	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,00	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	193	0	195	0	5,410	86,98	107,8	126,0	139,5	152,8	456,9	125,5
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	193	0	195	0	3,240	32,09	39,30	46,90	56,00	68,46	110,6	48,47
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	185	50	187	50	<NG	<NG	<NG	0,0500	0,1200	0,2812	4,700	0,1591
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	152	89	152	89	<NG	<NG	<NG	<NG	0,01375	0,05000	1,400	0,02475
Si Silicium	[mg/l]	144	0	146	0	<BG	2,86	4,01	5,40	7,38	9,24	13,41	5,71
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	55	5	55	5	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,81	2,88	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	193	0	195	0	57,72	642,2	713,2	781,5	851,3	948,7	2.080	780,3
Gesamthärte	[° dH]	194	0	197	0	1,50	22,5	26,1	28,6	31,5	35,0	82,9	28,7
Karbonathärte	[° dH]	193	0	195	0	0,47	15,15	16,47	17,82	19,83	22,94	27,06	17,93
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		192	0	194	0	-5,90	-0,54	-0,38	-0,23	-0,12	0,06	0,68	-0,30
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	107	0	109	0	0,10	0,41	0,61	0,80	0,95	1,14	8,20	0,87
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	193	0	195	0	0,167	5,410	5,880	6,361	7,080	8,191	9,660	6,401
Ag Silber	[µg/l]	33	0	33	0	0,054	0,081	0,105	0,112	0,127	0,140	0,204	0,115
Al Aluminium	[µg/l]	55	41	55	41	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	5,492	110,0	4,198
As Arsen	[µg/l]	56	3	57	4	<NG	0,652	0,825	1,011	1,765	2,580	152,0	4,030
Au Gold	[µg/l]	0	0	0	0	---	---	---	---	---	---	---	---
B Bor	[µg/l]	41	0	41	0	3,930	13,07	17,98	24,71	42,50	141,4	430,4	58,71
Ba Barium	[µg/l]	55	0	55	0	<BG	59,7	140	404	604	725	893	384
Be Beryllium	[µg/l]	55	29	55	29	<NG	<NG	<NG	<NG	0,051	0,063	0,830	<BG
Bi Wismut	[µg/l]	54	35	54	35	<NG	<NG	<NG	<NG	0,015	0,836	1,940	0,203
Cd Cadmium	[µg/l]	56	32	57	33	<NG	<NG	<NG	<NG	0,017	0,044	0,090	0,013
Ce Cer	[µg/l]	0	0	0	0	---	---	---	---	---	---	---	---
Co Cobalt	[µg/l]	55	2	55	2	<NG	0,029	0,044	0,052	0,094	0,391	1,980	0,235
Cr Chrom	[µg/l]	56	2	57	2	<NG	0,265	0,375	2,453	3,605	4,208	5,585	2,167
Cs Cäsium	[µg/l]	55	1	55	1	<NG	0,0020	0,0031	0,0054	0,0082	0,0318	0,4000	0,0164
Cu Kupfer	[µg/l]	55	1	55	1	<NG	0,215	0,259	0,580	1,005	1,411	2,640	0,683
Hg Quecksilber	[µg/l]	43	23	44	24	<NG	<NG	<NG	<NG	0,056	0,188	1,916	0,094
La Lanthan	[µg/l]	55	16	55	16	<NG	<NG	<NG	0,0113	0,0175	0,0318	0,0841	0,0146
Li Lithium	[µg/l]	55	0	55	0	1,580	5,838	7,421	12,29	17,26	26,72	88,88	17,15
Mo Molybdän	[µg/l]	55	0	55	0	0,070	0,119	0,145	0,210	0,304	0,561	0,761	0,263
Ni Nickel	[µg/l]	56	3	56	3	<NG	0,175	0,743	1,074	1,485	2,095	5,840	1,284
Pb Blei	[µg/l]	55	24	56	25	<NG	<NG	<NG	<BG	0,120	0,214	3,230	0,132
Rb Rubidium	[µg/l]	55	0	55	0	0,085	0,396	0,557	0,928	1,336	3,018	5,510	1,316
Sb Antimon	[µg/l]	54	4	54	4	<NG	0,013	0,019	0,030	0,057	0,093	0,403	0,049
Se Selen	[µg/l]	55	19	55	19	<NG	<NG	<NG	<BG	1,597	2,708	7,080	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	55	38	55	38	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,241	0,610	0,053
Sr Strontium	[µg/l]	55	0	55	0	19,9	206	241	372	424	586	4.340	424
Th Thorium	[µg/l]	54	35	54	35	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,022	0,075	<BG
Ti Titan	[µg/l]	55	0	55	0	0,330	0,790	1,328	1,757	2,503	9,594	437,1	10,71
Tl Thallium	[µg/l]	54	21	54	21	<NG	<NG	<NG	0,004	0,072	0,151	0,390	0,048
U Uran	[µg/l]	54	0	54	0	0,0500	0,8870	1,259	1,549	1,863	2,147	3,683	1,533
V Vanadium	[µg/l]	55	0	55	0	0,076	0,243	0,418	0,758	0,925	1,170	1,983	0,737
Y Yttrium	[µg/l]	55	5	55	5	<NG	0,0099	0,0137	0,0212	0,0309	0,0487	0,1135	0,0261
Zn Zink	[µg/l]	56	0	56	0	1,320	2,498	3,135	4,874	12,04	20,47	176,8	13,97

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-12: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Mittleren Keuper in salinarer Fazies

3.7 Mittlerer Keuper in salinarer Fazies													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	57	0	58	0	8,3	9,4	9,8	10,5	11,4	12,4	15,6	10,8
pH-Wert (Gelände)		65	0	66	0	6,60	6,90	7,00	7,20	7,35	7,49	8,53	7,19
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	64	0	66	0	21,4	90,7	103,0	143,5	228,1	312,1	593,0	171,9
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	43	0	44	0	1,00	1,62	2,55	4,50	6,85	8,02	9,90	4,68
O ₂ -Sättigung	[%]	28	0	28	0	10,1	14,0	22,7	40,3	62,2	75,8	87,5	42,9
CO ₂ frei	[mg/l]	49	0	50	0	3,5	17,6	25,1	33,0	44,9	67,0	107,1	37,7
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	27	12	27	12	<NG	<NG	<NG	<NG	0,56	0,85	4,25	0,43
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	70	0	73	0	3,60	9,35	16,63	24,33	42,75	79,85	741,40	62,35
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	27	15	27	15	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,71	6,49	0,53
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	70	16	73	18	<NG	<NG	<NG	7,10	22,90	34,32	66,20	13,67
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	63	62	65	64	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	70	1	73	1	<NG	139,40	199,93	444,13	902,04	1.393,39	1.935,40	604,69
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	51	50	52	51	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	67	0	70	0	99,4	256,7	339,6	389,3	446,6	516,0	685,4	388,3
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	65	0	67	0	1,600	3,000	5,068	9,390	26,50	51,18	976,0	41,91
K ⁺ Kalium	[mg/l]	66	0	68	0	2,200	3,280	3,665	6,000	14,68	42,50	126,5	16,20
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	64	59	66	61	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	2,01	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	67	0	70	0	59,30	107,8	134,4	208,4	310,2	526,6	639,0	254,1
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	67	0	70	0	30,30	40,67	52,65	65,00	74,93	89,58	164,8	65,44
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	62	16	64	16	<NG	<NG	<BG	0,0395	0,1525	0,6750	1,420	0,1739
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	57	30	59	31	<NG	<NG	<NG	<NG	0,02000	0,06110	0,2600	0,02170
Si Silicium	[mg/l]	58	0	60	0	1,26	2,09	2,70	4,05	4,98	6,43	8,02	4,06
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	27	2	27	2	<NG	<NG	<NG	<NG	1,43	1,94	2,97	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	64	0	67	0	442,9	772,4	883,8	1.184	1.832	2.540	4.508	1.443
Gesamthärte	[° dH]	68	0	71	0	16,4	27,6	32,2	42,1	62,9	97,0	111	50,3
Karbonathärte	[° dH]	67	0	70	0	4,56	11,79	15,59	17,87	20,50	23,69	31,46	17,83
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		55	0	56	0	-0,65	-0,56	-0,34	-0,17	-0,06	0,16	0,31	-0,18
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	49	0	50	0	0,08	0,40	0,60	0,75	1,02	1,52	2,43	0,86
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	67	0	70	0	1,629	4,208	5,566	6,380	7,320	8,456	11,233	6,364
Ag Silber	[µg/l]	11	8	11	8	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,015	<NG
Al Aluminium	[µg/l]	27	7	27	7	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	16,94	28,10	3,672
As Arsen	[µg/l]	27	2	27	2	<NG	0,391	0,863	1,770	2,425	5,252	9,670	2,339
Au Gold	[µg/l]	11	5	11	5	<NG	<NG	<NG	<BG	0,032	0,061	0,115	<BG
B Bor	[µg/l]	27	0	27	0	65,16	78,11	114,5	158,6	318,3	567,9	1485	279,9
Ba Barium	[µg/l]	27	0	27	0	6,70	11,5	13,7	29,1	39,4	58,4	129	33,1
Be Beryllium	[µg/l]	27	26	27	26	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,081	<NG
Bi Wismut	[µg/l]	27	15	27	15	<NG	<NG	<NG	<NG	0,013	0,026	0,150	0,012
Cd Cadmium	[µg/l]	28	8	28	8	<NG	<NG	<NG	0,048	0,087	0,133	0,200	0,059
Ce Cer	[µg/l]	11	0	11	0	<BG	<BG	0,007	0,008	0,009	0,012	0,020	0,009
Co Cobalt	[µg/l]	27	2	27	2	<NG	0,054	0,111	1,060	1,695	1,826	2,360	0,930
Cr Chrom	[µg/l]	29	3	29	3	<NG	<BG	0,211	0,790	2,000	2,660	6,000	1,273
Cs Cäsium	[µg/l]	27	1	27	1	<NG	0,0096	0,0130	0,0200	0,0540	0,1106	0,3470	0,0481
Cu Kupfer	[µg/l]	29	1	29	1	<NG	0,450	1,000	2,060	2,803	5,678	9,966	2,575
Hg Quecksilber	[µg/l]	27	21	27	21	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,407	1,370	0,134
La Lanthan	[µg/l]	27	10	27	10	<NG	<NG	<NG	0,0060	0,0100	0,0164	0,0180	0,0067
Li Lithium	[µg/l]	27	0	27	0	22,20	33,22	42,08	66,47	99,29	221,8	1.913	150,7
Mo Molybdän	[µg/l]	27	6	27	6	<NG	<NG	0,263	0,920	1,880	2,618	4,555	1,176
Ni Nickel	[µg/l]	28	8	28	8	<NG	<NG	<NG	1,930	2,487	4,326	6,499	1,922
Pb Blei	[µg/l]	29	11	29	11	<NG	<NG	<NG	0,106	0,214	0,294	1,000	0,145
Rb Rubidium	[µg/l]	27	0	27	0	1,240	1,284	1,570	1,990	4,078	10,49	12,39	3,784
Sb Antimon	[µg/l]	27	0	27	0	0,012	0,019	0,032	0,060	0,127	0,301	0,830	0,133
Se Selen	[µg/l]	27	14	27	14	<NG	<NG	<NG	<NG	2,332	9,596	19,67	2,860
Sn Zinn	[µg/l]	27	16	27	16	<NG	<NG	<NG	<NG	0,062	0,099	0,132	0,033
Sr Strontium	[µg/l]	27	0	27	0	548	1.207	2.589	3.438	5.082	7.022	11.400	4.019
Th Thorium	[µg/l]	27	12	27	12	<NG	<NG	<NG	0,014	0,054	0,124	0,220	0,041
Ti Titan	[µg/l]	27	0	27	0	3,395	4,282	6,503	12,05	25,22	37,18	82,83	18,77
Tl Thallium	[µg/l]	27	12	27	12	<NG	<NG	<NG	0,059	0,113	0,286	0,370	0,087
U Uran	[µg/l]	27	0	27	0	0,2190	0,4156	0,7470	3,046	6,334	8,969	16,73	4,151
V Vanadium	[µg/l]	27	1	27	1	<NG	0,145	0,410	1,000	1,776	2,677	3,630	1,214
Y Yttrium	[µg/l]	27	5	27	5	<NG	<NG	0,0380	0,0560	0,1030	0,1316	0,1860	0,0668
Zn Zink	[µg/l]	29	2	29	2	<NG	10,26	12,34	35,44	85,15	159,2	179,8	54,96

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-13: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Mittleren und Oberen Keuper in klastischer Fazies

3.8 Mittlerer und Oberer Keuper in klastischer Fazies													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	482	0	511	0	6,0	8,4	9,2	10,2	11,5	13,1	19,2	10,5
pH-Wert (Gelände)		506	0	536	0	4,80	6,60	7,04	7,30	7,50	7,69	9,20	7,20
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	540	0	571	0	7,0	21,9	36,0	53,4	64,2	75,0	125,0	51,2
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	461	0	488	0	<BG	1,30	2,70	5,50	7,90	9,20	12,00	5,34
O ₂ -Sättigung	[%]	351	0	370	0	<BG	11,7	25,6	51,0	70,2	82,3	103,0	48,3
CO ₂ frei	[mg/l]	488	0	513	0	<BG	7,0	11,4	18,5	30,0	39,6	210,0	21,6
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	204	91	206	91	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,63	3,09	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	546	8	576	8	<NG	2,10	5,26	13,78	25,61	38,96	179,00	18,85
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	196	180	198	181	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,40	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	546	86	577	98	<NG	<NG	1,55	9,72	27,00	47,00	127,41	17,98
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	541	527	569	554	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,90	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	541	5	572	5	<NG	6,60	16,71	31,06	46,02	70,00	255,90	36,19
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	486	470	511	494	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	508	0	538	0	7,3	78,8	183,1	276,7	343,0	394,4	570,5	259,7
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	489	0	519	0	0,500	1,198	2,000	4,100	7,740	18,02	169,2	9,651
K ⁺ Kalium	[mg/l]	490	0	520	0	0,454	1,209	2,000	4,165	6,647	9,155	70,00	5,572
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	544	523	574	551	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,70	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	543	0	574	0	1,080	20,34	39,21	64,00	78,98	91,11	184,0	60,66
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	543	0	574	0	0,580	6,120	10,61	22,40	38,83	46,98	70,50	25,26
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	506	96	532	101	<NG	<NG	<NG	0,0400	0,1100	0,4150	17,10	0,2470
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	542	310	572	326	<NG	<NG	<NG	<NG	0,03000	0,1498	2,840	0,05579
Si Silicium	[mg/l]	488	0	516	0	<BG	2,33	3,26	4,19	5,29	6,31	15,86	4,37
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	201	27	203	27	<NG	<NG	<NG	<NG	1,91	2,49	7,30	1,39
Gesamtmineralisation	[mg/l]	484	0	515	0	58,76	167,5	316,3	475,8	582,5	651,7	929,7	445,9
Gesamthärte	[° dH]	547	0	578	0	0,285	4,45	8,45	15,1	19,9	22,7	35,8	14,3
Karbonathärte	[° dH]	508	0	538	0	0,34	3,62	8,41	12,70	15,75	18,11	26,19	11,92
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		456	0	484	0	-5,50	-2,33	-1,07	-0,58	-0,40	-0,25	0,30	-0,95
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	488	0	513	0	<BG	0,16	0,26	0,42	0,70	0,90	9,32	0,53
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	508	0	538	0	0,120	1,291	3,002	4,535	5,622	6,464	9,350	4,256
Ag Silber	[µg/l]	79	60	79	60	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,047	<NG
Al Aluminium	[µg/l]	197	112	200	114	<NG	<NG	<NG	<NG	1,431	12,91	189,0	4,190
As Arsen	[µg/l]	204	25	206	27	<NG	<NG	0,527	1,736	5,000	16,67	73,56	5,819
Au Gold	[µg/l]	77	26	77	26	<NG	<NG	<NG	<BG	0,043	0,085	0,154	0,031
B Bor	[µg/l]	196	12	198	12	<NG	3,909	13,08	29,96	72,98	149,3	610,2	61,88
Ba Barium	[µg/l]	197	2	200	2	<NG	39,4	69,9	148	328	555	2,665	238
Be Beryllium	[µg/l]	196	158	198	159	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,092	2,060	<BG
Bi Wismut	[µg/l]	195	111	197	111	<NG	<NG	<NG	<NG	0,008	0,025	0,750	0,020
Cd Cadmium	[µg/l]	197	112	199	112	<NG	<NG	<NG	<NG	0,016	0,074	563,5	2,885
Ce Cer	[µg/l]	77	6	77	6	<NG	<BG	0,006	0,010	0,023	0,092	0,451	0,031
Co Cobalt	[µg/l]	197	37	200	39	<NG	<NG	0,027	0,073	0,555	1,790	8,811	0,511
Cr Chrom	[µg/l]	197	17	199	19	<NG	<BG	0,346	0,730	1,406	1,938	6,488	0,938
Cs Cäsium	[µg/l]	196	3	198	3	<NG	0,0060	0,0120	0,0375	0,6640	2,983	47,64	1,814
Cu Kupfer	[µg/l]	196	8	198	8	<NG	0,370	0,660	1,573	2,320	3,970	122,8	2,611
Hg Quecksilber	[µg/l]	197	133	199	134	<NG	<NG	<NG	<NG	0,032	0,350	2,750	0,110
La Lanthan	[µg/l]	196	73	198	73	<NG	<NG	<NG	0,0070	0,0180	0,0400	0,3600	0,0171
Li Lithium	[µg/l]	197	1	200	2	<NG	5,322	12,01	30,10	69,37	128,4	267,5	50,66
Mo Molybdän	[µg/l]	196	63	198	65	<NG	<NG	<NG	0,170	0,450	1,020	6,530	0,421
Ni Nickel	[µg/l]	196	94	199	97	<NG	<NG	<NG	0,289	1,962	3,145	35,09	1,498
Pb Blei	[µg/l]	195	61	197	63	<NG	<NG	<NG	0,095	0,193	0,460	6,950	0,286
Rb Rubidium	[µg/l]	196	0	198	0	0,318	0,641	1,017	2,041	12,04	26,44	140,4	10,64
Sb Antimon	[µg/l]	195	71	197	73	<NG	<NG	<NG	0,018	0,067	0,129	1,160	0,057
Se Selen	[µg/l]	196	127	198	128	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	2,995	11,09	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	195	131	197	131	<NG	<NG	<NG	<NG	0,045	0,108	1,380	0,038
Sr Strontium	[µg/l]	197	0	200	0	18,2	60,9	116	282	522	892	6122	437
Th Thorium	[µg/l]	195	75	197	75	<NG	<NG	<NG	0,011	0,054	0,128	1,620	0,064
Ti Titan	[µg/l]	196	2	198	2	<NG	0,615	1,195	3,080	5,359	7,523	42,29	3,916
Tl Thallium	[µg/l]	195	110	197	110	<NG	<NG	<NG	<NG	0,087	0,288	2,220	0,092
U Uran	[µg/l]	195	2	197	2	<NG	0,1460	0,5510	1,681	3,920	8,990	37,37	3,393
V Vanadium	[µg/l]	196	14	198	16	<NG	0,085	0,359	0,861	2,952	4,150	6,091	1,680
Y Yttrium	[µg/l]	195	91	197	91	<NG	<NG	<NG	0,0130	0,0425	0,0992	0,8600	0,0381
Zn Zink	[µg/l]	198	0	201	0	0,630	2,722	5,525	8,589	16,43	29,41	197,2	14,98

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-14: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus der Trias der Bodenwöhrer Bucht

3.9 Trias der Bodenwöhrer Bucht													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	11	0	14	0	7,9	8,5	8,9	9,3	10,2	11,2	13,5	9,8
pH-Wert (Gelände)		11	0	14	0	5,50	5,59	5,95	6,58	6,75	7,00	7,18	6,40
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	11	0	14	0	5,1	5,5	7,4	18,5	33,0	37,5	37,8	20,7
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	11	0	14	0	0,12	1,00	1,25	3,11	5,04	6,80	7,10	3,44
O ₂ -Sättigung	[%]	9	0	11	0	1,1	---	---	42,9	---	---	65,4	36,0
CO ₂ frei	[mg/l]	11	0	14	0	11,0	23,8	25,8	31,7	34,3	42,2	44,9	30,7
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	11	7	13	8	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,38	1,09	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	11	0	14	0	1,14	1,34	1,94	2,64	4,67	6,27	8,86	3,49
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	11	11	14	14	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	11	3	14	3	<NG	<NG	<NG	<NG	5,19	6,00	8,45	2,67
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	9	9	10	10	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	11	0	14	0	<NG	3,66	5,72	7,72	41,57	68,50	70,85	24,50
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	11	9	14	10	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,60	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	11	0	14	0	12,2	16,1	23,8	92,1	115,3	164,7	200,1	85,4
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	11	0	14	0	1,140	1,180	1,578	1,950	2,891	3,520	3,592	2,217
K ⁺ Kalium	[mg/l]	11	0	14	0	1,530	3,110	3,911	4,230	5,250	6,070	10,84	4,815
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	8	8	10	10	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	11	0	14	0	4,800	5,030	7,395	27,52	46,31	52,70	63,83	29,77
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	11	0	14	0	0,530	0,870	1,502	2,510	6,852	8,460	9,500	4,036
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	9	0	11	0	<BG	---	---	0,0291	---	---	3,940	0,8634
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	8	0	9	0	<BG	---	---	0,09504	---	---	0,4154	0,1409
Si Silicium	[mg/l]	11	0	14	0	4,22	5,49	6,00	7,15	7,73	8,84	11,96	7,21
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	11	9	14	10	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	11	0	14	0	39,97	46,39	59,76	150,5	256,1	267,6	313,4	165,4
Gesamthärte	[° dH]	11	0	14	0	0,825	0,871	1,38	4,40	8,28	9,55	10,3	5,09
Karbonathärte	[° dH]	11	0	14	0	0,56	0,74	1,09	4,23	5,29	7,56	9,19	3,92
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		11	0	14	0	-4,86	-4,39	-4,06	-2,14	-1,65	-1,51	-0,87	-2,67
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	11	0	14	0	0,25	0,54	0,58	0,72	0,78	0,96	1,02	0,70
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	11	0	14	0	0,200	0,264	0,390	1,510	1,890	2,700	3,280	1,399
Ag Silber	[µg/l]	5	5	5	5	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG	<NG
Al Aluminium	[µg/l]	7	2	8	3	<NG	---	---	<BG	---	---	51,12	13,38
As Arsen	[µg/l]	7	2	8	3	<NG	---	---	0,234	---	---	1,190	0,409
Au Gold	[µg/l]	5	4	5	4	<NG	---	---	<NG	---	---	0,126	<BG
B Bor	[µg/l]	7	0	8	0	4,256	---	---	14,22	---	---	22,58	13,16
Ba Barium	[µg/l]	7	0	8	0	23,9	---	---	169	---	---	256	147
Be Beryllium	[µg/l]	7	1	8	2	<NG	---	---	<BG	---	---	0,580	0,145
Bi Wismut	[µg/l]	7	5	8	6	<NG	---	---	<NG	---	---	0,015	<BG
Cd Cadmium	[µg/l]	7	0	8	0	0,024	---	---	0,211	---	---	3,269	1,175
Ce Cer	[µg/l]	5	0	5	0	0,009	---	---	0,048	---	---	0,314	0,115
Co Cobalt	[µg/l]	7	0	8	1	0,009	---	---	0,056	---	---	1,067	0,318
Cr Chrom	[µg/l]	7	3	8	4	<NG	---	---	<BG	---	---	0,245	<BG
Cs Cäsium	[µg/l]	7	0	8	0	0,1460	---	---	0,3300	---	---	2,108	0,5488
Cu Kupfer	[µg/l]	7	0	8	0	0,293	---	---	1,178	---	---	10,34	2,479
Hg Quecksilber	[µg/l]	7	3	8	4	<NG	---	---	0,032	---	---	0,339	0,084
La Lanthan	[µg/l]	7	0	8	0	0,0060	---	---	0,0100	---	---	0,1200	0,0399
Li Lithium	[µg/l]	7	0	8	0	7,813	---	---	26,06	---	---	62,10	30,47
Mo Molybdän	[µg/l]	7	5	8	6	<NG	---	---	<NG	---	---	<BG	<NG
Ni Nickel	[µg/l]	7	1	8	1	<NG	---	---	0,481	---	---	3,392	0,969
Pb Blei	[µg/l]	7	1	8	1	<NG	---	---	0,088	---	---	0,585	0,212
Rb Rubidium	[µg/l]	7	0	8	0	6,184	---	---	8,693	---	---	30,08	11,56
Sb Antimon	[µg/l]	7	4	8	5	<NG	---	---	<NG	---	---	0,008	<BG
Se Selen	[µg/l]	7	5	8	6	<NG	---	---	<NG	---	---	<BG	<NG
Sn Zinn	[µg/l]	7	0	8	0	0,031	---	---	0,046	---	---	0,137	0,067
Sr Strontium	[µg/l]	7	0	8	0	39,5	---	---	87,3	---	---	250	118
Th Thorium	[µg/l]	7	1	8	1	<NG	---	---	<BG	---	---	0,043	0,013
Ti Titan	[µg/l]	7	0	8	0	0,254	---	---	0,624	---	---	1,357	0,751
Tl Thallium	[µg/l]	7	0	8	0	0,008	---	---	0,025	---	---	0,341	0,109
U Uran	[µg/l]	7	0	8	0	0,0080	---	---	0,5040	---	---	11,68	2,514
V Vanadium	[µg/l]	7	2	8	3	<NG	---	---	0,565	---	---	1,046	0,468
Y Yttrium	[µg/l]	7	0	8	0	0,0190	---	---	0,0410	---	---	0,1680	0,0653
Zn Zink	[µg/l]	7	0	8	0	3,009	---	---	12,53	---	---	72,96	24,40

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-15: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Lias

3.10 Lias													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	30	0	30	0	6,5	7,3	8,1	9,4	10,0	10,7	13,8	9,2
pH-Wert (Gelände)		31	0	31	0	6,50	6,80	7,07	7,20	7,43	7,60	8,10	7,25
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	31	0	31	0	38,6	47,4	55,7	64,3	77,0	95,8	142,3	69,1
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	30	0	30	0	0,50	3,85	5,90	7,45	8,57	10,02	12,00	7,17
O ₂ -Sättigung	[%]	26	0	26	0	5,0	32,3	48,2	64,7	78,4	89,9	102,0	62,4
CO ₂ frei	[mg/l]	30	0	30	0	5,3	14,6	22,0	27,7	36,1	47,1	55,4	29,2
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	3	0	3	0	<NG	---	---	---	---	---	<NG	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	31	0	31	0	1,80	9,00	14,38	23,00	37,60	48,20	67,70	25,79
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	3	2	3	2	<NG	<NG	---	---	---	---	0,29	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	31	3	31	3	<NG	<NG	6,05	28,40	46,35	59,50	107,20	30,33
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	31	31	31	31	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	31	0	31	0	27,60	30,20	40,40	65,90	83,95	168,80	257,00	80,60
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	28	28	28	28	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	31	0	31	0	90,3	164,8	240,4	287,0	347,2	376,0	415,0	281,3
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	31	0	31	0	0,100	0,600	1,600	2,500	6,106	22,50	90,00	9,180
K ⁺ Kalium	[mg/l]	31	0	31	0	0,800	1,400	2,450	5,400	7,900	17,60	33,00	7,501
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	31	30	31	30	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	31	0	31	0	48,40	72,10	93,60	121,4	139,3	148,7	189,2	115,8
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	31	0	31	0	1,300	6,000	8,350	12,90	16,35	23,20	52,90	14,38
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	30	3	30	3	<NG	0,0153	0,0270	0,0550	0,1650	0,4320	1,653	0,1839
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	31	24	31	24	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,06000	0,4000	0,02497
Si Silicium	[mg/l]	31	0	31	0	<BG	2,10	2,33	2,66	3,70	4,71	7,41	3,11
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	3	0	3	0	<NG	---	---	---	---	---	<NG	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	28	0	28	0	296,4	438,5	501,5	559,4	625,2	737,1	901,3	575,5
Gesamthärte	[° dH]	31	0	31	0	10,1	13,1	16,6	19,1	22,3	24,6	34,0	19,5
Karbonathärte	[° dH]	31	0	31	0	4,15	7,57	11,04	13,18	15,94	17,26	19,05	12,91
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		30	0	30	0	-1,88	-1,14	-0,66	-0,40	-0,20	-0,09	0,45	-0,49
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	30	0	30	0	0,12	0,33	0,50	0,63	0,82	1,07	1,26	0,66
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	31	0	31	0	1,480	2,701	3,940	4,704	5,690	6,163	6,801	4,609
Ag Silber	[µg/l]	3	2	3	2	<NG	---	---	---	---	---	<BG	<NG
Al Aluminium	[µg/l]	3	0	3	0	<BG	---	---	---	---	---	1,746	1,073
As Arsen	[µg/l]	3	0	3	0	0,053	---	---	---	---	---	0,414	0,208
Au Gold	[µg/l]	3	1	3	1	<NG	---	---	---	---	---	0,201	0,071
B Bor	[µg/l]	3	0	3	0	15,62	---	---	---	---	---	21,69	18,25
Ba Barium	[µg/l]	3	0	3	0	1,71	---	---	---	---	---	21,4	8,58
Be Beryllium	[µg/l]	3	1	3	1	<NG	---	---	---	---	---	<BG	<BG
Bi Wismut	[µg/l]	3	0	3	0	<BG	---	---	---	---	---	0,015	0,008
Cd Cadmium	[µg/l]	3	0	3	0	<BG	---	---	---	---	---	0,054	0,025
Ce Cer	[µg/l]	3	0	3	0	<BG	---	---	---	---	---	0,021	0,011
Co Cobalt	[µg/l]	3	0	3	0	0,049	---	---	---	---	---	0,133	0,095
Cr Chrom	[µg/l]	3	0	3	0	<BG	---	---	---	---	---	0,439	0,341
Cs Cäsium	[µg/l]	3	0	3	0	0,0050	---	---	---	---	---	0,0890	0,0340
Cu Kupfer	[µg/l]	3	0	3	0	0,713	---	---	---	---	---	1,661	1,223
Hg Quecksilber	[µg/l]	3	2	3	2	<NG	---	---	---	---	---	0,062	<BG
La Lanthan	[µg/l]	3	0	3	0	0,0020	---	---	---	---	---	0,0170	0,0087
Li Lithium	[µg/l]	3	0	3	0	14,19	---	---	---	---	---	22,65	17,45
Mo Molybdän	[µg/l]	3	2	3	2	<NG	---	---	---	---	---	0,168	<BG
Ni Nickel	[µg/l]	3	2	3	2	<NG	---	---	---	---	---	0,802	0,267
Pb Blei	[µg/l]	3	0	3	0	0,043	---	---	---	---	---	0,411	0,206
Rb Rubidium	[µg/l]	3	0	3	0	0,961	---	---	---	---	---	2,460	1,467
Sb Antimon	[µg/l]	3	3	3	3	<NG	---	---	---	---	---	<NG	<NG
Se Selen	[µg/l]	3	0	3	0	<BG	---	---	---	---	---	2,110	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	3	0	3	0	<BG	---	---	---	---	---	0,076	0,046
Sr Strontium	[µg/l]	3	0	3	0	189	---	---	---	---	---	502	322
Th Thorium	[µg/l]	3	0	3	0	0,051	---	---	---	---	---	0,057	0,055
Ti Titan	[µg/l]	3	0	3	0	1,102	---	---	---	---	---	1,428	1,260
Tl Thallium	[µg/l]	3	1	3	1	<NG	---	---	---	---	---	0,012	0,005
U Uran	[µg/l]	3	0	3	0	0,1820	---	---	---	---	---	1,480	0,8613
V Vanadium	[µg/l]	3	0	3	0	0,109	---	---	---	---	---	0,204	0,158
Y Yttrium	[µg/l]	3	0	3	0	0,0060	---	---	---	---	---	0,1210	0,0503
Zn Zink	[µg/l]	3	0	3	0	4,431	---	---	---	---	---	12,85	8,438

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-16: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Dogger

3.11 Dogger													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	248	0	258	0	4,2	7,2	8,0	8,7	9,6	10,6	26,1	8,9
pH-Wert (Gelände)		250	0	260	0	4,10	6,90	7,20	7,40	7,60	7,80	8,30	7,30
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	251	0	261	0	3,3	28,0	36,7	46,0	55,4	62,1	449,0	47,2
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	239	0	247	0	<BG	3,97	7,70	9,10	10,13	10,82	12,20	8,35
O ₂ -Sättigung	[%]	122	0	124	0	1,0	18,5	57,8	74,8	85,8	91,6	101,8	66,6
CO ₂ frei	[mg/l]	241	0	250	0	0,9	7,0	12,3	20,2	27,3	35,2	218,2	21,7
F Fluorid	[mg/l]	36	20	38	20	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	2,02	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	253	0	263	0	0,70	3,02	5,40	10,00	17,79	33,98	104,20	14,52
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	36	34	38	36	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	253	20	263	24	<NG	<NG	4,00	12,40	21,60	38,88	89,80	15,90
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	253	250	263	260	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	252	0	262	0	<NG	13,82	20,75	27,15	34,15	45,96	124,10	29,03
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	156	155	165	164	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	250	0	260	0	3,6	108,0	223,5	279,4	317,5	366,8	838,9	260,6
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	249	0	259	0	0,300	1,000	1,400	2,000	3,300	6,800	346,7	5,415
K ⁺ Kalium	[mg/l]	249	1	259	1	<NG	0,400	0,700	1,400	2,800	5,471	24,00	2,580
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	253	250	263	260	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	2,00	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	252	0	262	0	1,200	42,36	76,10	93,70	106,5	123,2	165,3	88,52
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	252	0	262	0	0,480	2,753	4,800	7,200	12,88	22,53	39,60	10,05
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	252	28	262	32	<NG	<NG	0,0200	0,0400	0,1000	0,4078	11,51	0,2574
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	252	192	262	196	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,02000	0,7500	0,01596
Si Silicium	[mg/l]	249	1	259	1	<NG	1,86	2,06	2,48	3,55	4,80	14,63	2,97
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	52	15	56	17	<NG	<NG	<NG	<NG	1,67	2,25	2,65	<BG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	243	0	251	0	20,30	249,3	386,3	442,4	518,0	557,4	1.345	431,8
Gesamthärte	[° dH]	253	0	263	0	0,278	8,12	13,3	15,4	17,9	19,4	24,3	14,7
Karbonathärte	[° dH]	250	0	260	0	0,17	4,96	10,26	12,83	14,58	16,84	38,51	11,96
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		247	0	257	0	-6,81	-1,34	-0,68	-0,39	-0,16	0,03	0,58	-0,66
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	241	0	250	0	<BG	0,16	0,28	0,46	0,62	0,80	4,96	0,49
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	250	0	260	0	0,059	1,770	3,662	4,579	5,204	6,012	13,749	4,270
Ag Silber	[µg/l]	32	28	32	28	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,021	<NG
Al Aluminium	[µg/l]	73	23	77	26	<NG	<NG	<NG	1,350	7,760	53,08	734,3	25,16
As Arsen	[µg/l]	73	30	77	34	<NG	<NG	<NG	0,150	0,748	2,046	14,30	0,924
Au Gold	[µg/l]	32	11	32	11	<NG	<NG	<NG	<BG	0,032	0,071	0,147	<BG
B Bor	[µg/l]	73	12	77	13	<NG	<NG	2,920	9,410	14,37	22,31	905,6	29,16
Ba Barium	[µg/l]	73	2	77	2	<NG	1,32	3,89	8,20	20,8	44,9	187	18,4
Be Beryllium	[µg/l]	73	45	77	49	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,156	0,725	<BG
Bi Wismut	[µg/l]	73	37	77	40	<NG	<NG	<NG	<NG	0,012	0,128	0,250	0,030
Cd Cadmium	[µg/l]	73	47	77	50	<NG	<NG	<NG	<NG	0,010	0,043	0,460	0,028
Ce Cer	[µg/l]	32	3	32	3	<NG	<BG	<BG	0,010	0,022	0,037	3,035	0,121
Co Cobalt	[µg/l]	73	17	77	17	<NG	<NG	0,022	0,085	1,360	2,086	11,28	0,858
Cr Chrom	[µg/l]	73	11	77	13	<NG	<NG	<BG	0,380	1,290	4,542	9,975	1,246
Cs Cäsium	[µg/l]	73	31	77	32	<NG	<NG	<NG	0,0119	0,0900	0,1908	7,066	0,1625
Cu Kupfer	[µg/l]	73	16	77	17	<NG	<NG	0,178	0,548	1,040	2,784	41,46	1,545
Hg Quecksilber	[µg/l]	72	53	76	57	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,032	0,418	<BG
La Lanthan	[µg/l]	73	33	77	35	<NG	<NG	<NG	0,0030	0,0090	0,0441	0,8200	0,0452
Li Lithium	[µg/l]	73	0	77	0	0,530	2,002	3,700	6,840	12,85	19,45	699,6	22,12
Mo Molybdän	[µg/l]	73	46	77	48	<NG	<NG	<NG	<NG	0,120	0,213	4,138	0,122
Ni Nickel	[µg/l]	73	44	77	47	<NG	<NG	<NG	<NG	0,978	3,279	30,78	1,714
Pb Blei	[µg/l]	73	32	77	36	<NG	<NG	<NG	0,036	0,130	0,268	3,120	0,143
Rb Rubidium	[µg/l]	73	3	77	3	<NG	0,362	0,560	1,509	2,876	5,620	33,97	2,721
Sb Antimon	[µg/l]	73	57	77	60	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,025	0,150	0,008
Se Selen	[µg/l]	73	56	77	59	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	8,170	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	73	47	77	50	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,056	8,000	0,348
Sr Strontium	[µg/l]	73	0	77	0	1,45	32,7	63,1	82,3	115	177	617	120
Th Thorium	[µg/l]	73	45	77	49	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,037	0,180	0,013
Ti Titan	[µg/l]	56	2	58	2	<NG	0,284	0,465	0,823	6,015	8,650	12,52	2,898
Tl Thallium	[µg/l]	73	40	77	42	<NG	<NG	<NG	<NG	0,016	0,069	0,245	0,021
U Uran	[µg/l]	73	20	77	20	<NG	<NG	<NG	0,1690	0,4120	0,5520	0,8650	0,2171
V Vanadium	[µg/l]	73	6	77	8	<NG	<BG	0,115	0,337	0,800	0,868	1,797	0,438
Y Yttrium	[µg/l]	73	17	77	19	<NG	<NG	0,0080	0,0300	0,0700	0,2080	3,382	0,1768
Zn Zink	[µg/l]	73	6	77	7	<NG	1,408	2,580	4,886	13,31	28,75	1.143	29,63

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-17: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem unbedeckten bis teilbedeckten Malm

3.12 Unbedeckter bis teilbedeckter Malm													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	654	0	1097	0	1,8	8,2	8,6	9,2	10,0	10,7	14,8	9,3
pH-Wert (Gelände)		655	0	1087	0	6,47	7,14	7,25	7,35	7,50	7,70	8,18	7,39
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	658	0	1102	0	25,5	40,0	49,4	56,7	63,8	70,1	644,0	59,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	641	0	1021	0	0,50	5,40	7,70	9,00	10,00	10,80	15,00	8,55
O ₂ -Sättigung	[%]	336	0	598	0	3,5	36,1	58,0	74,7	84,9	92,6	135,0	69,0
CO ₂ frei	[mg/l]	643	0	1077	0	<BG	8,8	13,6	19,4	26,4	32,6	145,2	20,7
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	228	145	520	337	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,65	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	657	0	1100	0	1,00	6,82	10,30	16,06	22,85	32,64	231,80	18,57
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	228	220	520	490	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,41	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	657	11	1101	14	<NG	8,80	13,50	21,92	31,60	46,93	78,57	24,34
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	656	637	1097	1066	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	26,00	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	657	2	1100	2	<NG	12,34	16,33	21,65	27,90	34,04	82,30	23,11
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	499	481	906	846	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	4,78	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	657	0	1101	0	131,5	276,2	304,0	329,5	353,8	371,1	478,6	326,7
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	657	0	1102	0	0,300	1,400	2,200	3,400	5,300	8,600	73,20	4,460
K ⁺ Kalium	[mg/l]	657	3	1101	4	<NG	0,420	0,643	1,000	1,726	3,436	17,50	1,628
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	656	654	1101	1095	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	9,00	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	657	0	1101	0	45,00	66,28	75,35	88,50	109,0	127,4	151,5	93,10
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	657	0	1102	0	0,400	3,800	13,30	25,50	31,90	36,10	46,69	22,65
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	654	116	1098	359	<NG	<NG	<BG	0,0300	0,0550	0,1300	13,10	0,0838
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	655	488	1100	825	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,00401	0,4800	0,00382
Si Silicium	[mg/l]	656	0	1095	2	<BG	1,87	2,10	2,43	3,43	4,11	5,84	2,76
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	238	39	522	111	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	3,00	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	653	0	1098	0	322,6	429,8	472,1	519,9	564,4	597,2	826,5	517,8
Gesamthärte	[° dH]	657	0	1102	0	11,3	15,3	16,8	18,3	19,8	21,0	27,6	18,2
Karbonathärte	[° dH]	657	0	1101	0	6,04	12,68	13,96	15,13	16,24	17,04	21,97	15,00
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		650	0	1079	0	-1,25	-0,57	-0,49	-0,38	-0,26	-0,04	0,57	-0,35
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	643	0	1077	0	<BG	0,20	0,31	0,44	0,60	0,74	3,30	0,47
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	657	0	1101	0	2,155	4,526	4,982	5,400	5,798	6,082	7,844	5,353
Ag Silber	[µg/l]	213	146	501	388	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,023	0,359	<BG
Al Aluminium	[µg/l]	267	44	560	192	<NG	<NG	<BG	1,092	5,777	28,84	57,60	7,831
As Arsen	[µg/l]	266	4	557	8	<NG	0,191	0,259	0,377	0,727	2,235	6,100	0,790
Au Gold	[µg/l]	208	37	485	179	<NG	<NG	<BG	<BG	0,037	0,066	0,213	0,030
B Bor	[µg/l]	266	32	557	152	<NG	<NG	2,797	6,119	11,03	16,56	102,2	8,484
Ba Barium	[µg/l]	271	3	567	3	<NG	10,3	13,4	17,3	23,7	32,4	198	22,6
Be Beryllium	[µg/l]	261	219	545	473	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,903	<BG
Bi Wismut	[µg/l]	266	134	557	300	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,016	0,260	0,010
Cd Cadmium	[µg/l]	266	55	557	78	<NG	<NG	<BG	0,011	0,019	0,040	1,160	0,028
Ce Cer	[µg/l]	213	20	497	76	<NG	<BG	<BG	<BG	0,010	0,014	0,126	0,008
Co Cobalt	[µg/l]	267	27	560	36	<NG	<BG	0,035	0,055	0,079	1,884	9,610	0,589
Cr Chrom	[µg/l]	266	31	557	152	<NG	<NG	<BG	0,286	0,570	5,146	18,06	1,751
Cs Cäsium	[µg/l]	250	11	541	14	<NG	0,0061	0,0101	0,0295	0,1266	0,4314	8,555	0,1974
Cu Kupfer	[µg/l]	266	5	557	42	<NG	0,285	0,451	0,748	1,289	2,371	13,23	1,123
Hg Quecksilber	[µg/l]	266	92	557	265	<NG	<NG	<NG	<BG	0,043	0,070	3,480	0,127
La Lanthan	[µg/l]	266	43	557	46	<NG	<NG	0,0040	0,0071	0,0116	0,0180	0,2117	0,0100
Li Lithium	[µg/l]	267	1	560	5	<NG	0,500	0,677	1,155	2,475	4,335	136,6	2,738
Mo Molybdän	[µg/l]	266	76	557	293	<NG	<NG	<NG	<BG	0,169	0,384	8,736	0,213
Ni Nickel	[µg/l]	267	61	560	145	<NG	<NG	0,322	0,842	1,389	2,312	14,36	1,150
Pb Blei	[µg/l]	266	55	557	191	<NG	<NG	<BG	0,051	0,144	0,283	1,570	0,114
Rb Rubidium	[µg/l]	266	3	557	3	<NG	0,493	0,640	0,962	1,458	2,075	48,47	1,500
Sb Antimon	[µg/l]	266	70	557	151	<NG	<NG	<NG	0,018	0,033	0,069	1,049	0,039
Se Selen	[µg/l]	266	103	557	268	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	2,338	20,28	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	266	69	557	213	<NG	<NG	<NG	0,033	0,063	0,126	6,510	0,158
Sr Strontium	[µg/l]	271	0	567	0	1,25	28,3	39,1	63,7	90,8	113	301	70,5
Th Thorium	[µg/l]	266	97	557	261	<NG	<NG	<NG	<BG	0,016	0,064	3,340	0,054
Ti Titan	[µg/l]	246	2	536	6	<NG	0,393	0,583	0,781	1,313	4,735	240,0	2,716
Tl Thallium	[µg/l]	266	79	557	203	<NG	<NG	<NG	0,006	0,017	0,027	0,250	0,014
U Uran	[µg/l]	266	6	557	8	<NG	0,2144	0,2511	0,3135	0,4672	0,9175	4,637	0,4723
V Vanadium	[µg/l]	266	2	557	7	<NG	0,189	0,308	0,641	1,170	1,489	16,05	0,862
Y Yttrium	[µg/l]	266	35	557	37	<NG	<NG	0,0122	0,0256	0,0465	0,0701	0,5930	0,0347
Zn Zink	[µg/l]	267	6	560	20	<NG	2,500	3,449	5,402	9,633	18,76	348,2	12,67

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-18: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem vollständig überdeckten Malm

3.13 Vollständig überdeckter Malm													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	71	0	146	0	6,0	9,9	10,7	13,8	16,7	27,8	64,8	17,6
pH-Wert (Gelände)		70	0	144	0	6,80	7,09	7,15	7,25	7,50	7,70	7,99	7,33
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	72	0	147	0	4,4	18,0	46,6	60,1	71,8	93,3	825,0	78,2
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	66	0	140	0	<BG	0,20	0,47	1,69	3,65	8,10	11,40	2,82
O ₂ -Sättigung	[%]	59	0	123	0	1,0	2,2	4,8	16,0	34,3	76,0	93,4	25,8
CO ₂ frei	[mg/l]	67	0	141	0	<BG	10,6	17,6	22,9	30,3	34,3	120,6	24,7
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	65	24	140	56	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	2,31	9,88	0,81
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	71	0	146	0	0,83	1,30	1,62	5,02	22,44	77,79	568,80	33,30
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	66	53	141	104	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,51	3,33	<BG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	70	48	145	110	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	24,48	41,76	4,86
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	66	63	141	133	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	71	4	146	8	<NG	3,94	9,07	18,61	27,41	41,73	125,91	21,90
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	65	61	140	127	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	71	0	146	0	45,1	289,8	320,9	376,1	408,8	433,4	767,9	376,4
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	71	0	146	0	1,587	2,007	2,466	4,266	9,730	117,1	479,0	43,04
K ⁺ Kalium	[mg/l]	71	0	146	0	0,333	0,873	1,080	1,367	2,474	7,610	26,20	2,985
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	69	63	144	138	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,73	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	71	0	146	0	7,000	35,11	60,57	78,00	87,92	110,8	153,3	75,47
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	71	0	146	0	1,210	6,883	15,20	25,42	32,08	34,48	38,62	23,08
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	70	9	145	18	<NG	<NG	0,0222	0,0891	0,2789	0,6196	3,971	0,3108
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	69	11	144	19	<NG	<NG	<BG	0,01248	0,03120	0,05215	1,490	0,04381
Si Silicium	[mg/l]	69	0	144	0	2,59	3,77	4,33	4,93	5,66	9,90	24,76	6,10
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	61	22	134	62	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	8,64	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	71	0	153	0	118,4	406,5	450,6	546,9	610,5	721,8	1.561	588,3
Gesamthärte	[° dH]	71	0	146	0	1,26	6,68	13,5	17,8	19,8	21,5	29,1	15,9
Karbonathärte	[° dH]	71	0	146	0	2,07	13,31	14,73	17,27	18,77	19,89	35,25	17,28
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		69	0	143	0	-1,97	-0,51	-0,45	-0,36	-0,23	-0,03	0,81	-0,31
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	67	0	141	0	<BG	0,24	0,40	0,52	0,69	0,78	2,74	0,56
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	71	0	146	0	0,740	4,750	5,260	6,164	6,700	7,102	12,585	6,169
Ag Silber	[µg/l]	57	31	132	88	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,048	1,116	0,030
Al Aluminium	[µg/l]	61	17	136	66	<NG	<NG	<NG	1,703	9,587	119,0	277,8	22,34
As Arsen	[µg/l]	60	3	135	5	<NG	<BG	0,075	0,190	0,497	0,980	5,028	0,428
Au Gold	[µg/l]	57	13	130	50	<NG	<NG	<BG	<BG	0,034	0,062	0,343	0,033
B Bor	[µg/l]	60	7	135	15	<NG	<NG	4,732	9,173	15,64	34,47	1,211	67,66
Ba Barium	[µg/l]	63	0	138	0	9,84	18,5	30,8	48,9	82,1	116	593	67,3
Be Beryllium	[µg/l]	60	47	133	108	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,522	<BG
Bi Wismut	[µg/l]	60	13	135	50	<NG	<NG	<BG	<BG	0,009	0,015	0,048	<BG
Cd Cadmium	[µg/l]	60	14	135	48	<NG	<NG	<BG	<BG	0,014	0,033	0,680	0,026
Ce Cer	[µg/l]	57	3	132	18	<NG	<BG	<BG	0,007	0,021	0,040	0,225	0,019
Co Cobalt	[µg/l]	61	6	136	13	<NG	<BG	0,023	0,038	0,072	0,268	3,055	0,140
Cr Chrom	[µg/l]	60	16	135	80	<NG	<NG	<NG	<BG	0,382	1,199	6,192	0,482
Cs Cäsium	[µg/l]	60	0	135	0	0,0030	0,0130	0,2412	0,9643	1,224	1,584	33,03	1,735
Cu Kupfer	[µg/l]	60	1	135	13	<NG	0,277	0,331	0,588	0,989	2,199	6,846	1,038
Hg Quecksilber	[µg/l]	60	21	135	70	<NG	<NG	<NG	<BG	0,037	0,096	0,583	0,043
La Lanthan	[µg/l]	60	0	135	2	0,0011	0,0021	0,0039	0,0070	0,0143	0,0331	0,6370	0,0257
Li Lithium	[µg/l]	61	0	136	0	0,341	3,244	6,916	9,038	14,83	22,47	958,2	32,87
Mo Molybdän	[µg/l]	60	17	135	35	<NG	<NG	<NG	0,204	0,742	1,251	7,821	0,710
Ni Nickel	[µg/l]	61	8	136	35	<NG	<NG	0,307	0,733	1,614	4,037	11,07	1,363
Pb Blei	[µg/l]	60	6	135	33	<NG	<BG	0,050	0,085	0,171	0,274	1,206	0,135
Rb Rubidium	[µg/l]	60	0	135	0	0,293	1,331	1,967	2,993	3,823	4,800	64,34	5,600
Sb Antimon	[µg/l]	60	19	135	53	<NG	<NG	<NG	0,015	0,029	0,051	0,512	0,029
Se Selen	[µg/l]	60	36	135	86	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	1,861	12,59	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	60	13	135	39	<NG	<NG	<BG	0,039	0,106	0,289	1,113	0,109
Sr Strontium	[µg/l]	64	0	139	0	30,0	125	147	186	282	501	861	253
Th Thorium	[µg/l]	60	5	135	41	<NG	<BG	<BG	0,012	0,032	0,059	0,131	0,024
Ti Titan	[µg/l]	60	1	135	5	<NG	0,284	0,599	0,850	1,203	2,587	9,784	1,240
Tl Thallium	[µg/l]	60	32	135	84	<NG	<NG	<NG	<NG	0,004	0,011	0,052	0,004
U Uran	[µg/l]	60	0	135	0	0,0020	0,0129	0,0193	0,0750	0,6142	1,435	2,552	0,4245
V Vanadium	[µg/l]	60	16	135	63	<NG	<NG	<NG	0,044	0,132	0,541	1,654	0,184
Y Yttrium	[µg/l]	60	0	135	0	0,0045	0,0085	0,0117	0,0229	0,0337	0,0794	1,050	0,0471
Zn Zink	[µg/l]	61	0	136	2	1,229	2,503	3,524	4,742	8,910	18,58	2,031	45,73

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-19: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus der Kreide

3.14 Kreide													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	35	0	39	0	6,0	7,9	9,4	10,0	10,6	11,0	12,7	9,8
pH-Wert (Gelände)		35	0	39	0	4,07	5,70	5,83	6,20	6,60	7,29	7,90	6,23
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	35	0	39	0	2,4	9,0	10,7	15,9	25,0	37,3	74,6	20,3
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	35	0	39	0	0,11	0,41	1,30	3,30	8,60	9,90	10,50	4,47
O ₂ -Sättigung	[%]	24	0	24	0	0,7	1,3	4,0	32,7	81,9	87,6	95,2	41,0
CO ₂ frei	[mg/l]	35	0	39	0	6,2	10,4	22,5	38,7	45,3	51,7	72,2	35,1
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	24	12	26	13	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,97	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	35	0	39	0	2,05	2,21	2,99	6,12	18,25	25,83	57,80	11,12
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	25	25	28	28	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	35	10	39	12	<NG	<NG	<NG	3,08	8,00	33,52	184,00	14,56
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	28	27	31	30	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,87	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	35	0	39	0	2,40	4,73	9,55	16,45	23,64	54,15	134,00	23,95
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	29	29	33	33	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	35	0	39	0	<BG	12,4	22,6	43,9	76,9	107,8	181,8	55,5
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	35	0	39	0	1,100	1,594	1,965	2,758	3,574	7,220	24,10	3,913
K ⁺ Kalium	[mg/l]	35	0	39	0	0,300	1,410	1,830	2,537	3,597	6,792	22,40	4,095
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	32	31	36	35	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	35	0	39	0	4,000	6,332	11,91	18,01	26,92	58,41	98,60	25,26
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	35	0	39	0	0,300	1,650	1,900	2,700	5,395	7,360	25,50	4,379
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	32	0	35	0	<BG	0,0400	0,1225	0,5440	2,963	3,472	9,500	1,605
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	34	6	37	7	<NG	<NG	0,01325	0,05770	0,09623	0,1570	0,2300	0,06825
Si Silicium	[mg/l]	35	0	39	0	1,12	2,34	3,78	6,46	6,83	8,13	10,21	5,53
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	26	7	29	8	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,53	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	34	0	38	0	31,27	53,62	77,96	121,6	162,2	285,5	609,7	149,2
Gesamthärte	[° dH]	35	0	39	0	0,628	1,29	2,19	3,52	4,94	9,85	17,7	4,54
Karbonathärte	[° dH]	35	0	39	0	<BG	0,57	1,04	2,01	3,53	4,95	8,35	2,55
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		34	0	38	0	-4,90	-4,48	-3,42	-2,95	-2,31	-1,42	-0,61	-2,92
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	35	0	39	0	0,14	0,24	0,51	0,88	1,03	1,18	1,64	0,80
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	35	0	39	0	<BG	0,204	0,370	0,719	1,260	1,767	2,979	0,910
Ag Silber	[µg/l]	9	8	9	8	<NG	---	---	<NG	---	---	<BG	<NG
Al Aluminium	[µg/l]	19	9	21	11	<NG	<NG	<NG	<NG	11,11	86,64	448,7	45,82
As Arsen	[µg/l]	19	10	21	12	<NG	<NG	<NG	<NG	0,071	0,171	0,324	0,055
Au Gold	[µg/l]	9	3	9	3	<NG	---	---	<BG	---	---	0,052	<BG
B Bor	[µg/l]	19	0	21	0	2,515	3,731	4,386	5,122	7,969	10,02	11,55	6,133
Ba Barium	[µg/l]	19	0	21	0	8,83	34,0	40,9	48,4	68,0	84,0	131	56,1
Be Beryllium	[µg/l]	19	3	21	4	<NG	<NG	<BG	<BG	0,109	0,561	1,324	0,186
Bi Wismut	[µg/l]	19	12	21	12	<NG	<NG	<NG	<NG	0,015	0,015	0,260	0,017
Cd Cadmium	[µg/l]	19	2	21	2	<NG	<BG	<BG	0,025	0,054	0,088	0,261	0,044
Ce Cer	[µg/l]	9	0	9	0	0,021	---	---	0,062	---	---	4,579	0,695
Co Cobalt	[µg/l]	19	1	21	1	<NG	0,158	0,304	0,743	1,811	3,220	7,570	1,461
Cr Chrom	[µg/l]	19	11	21	13	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,197	1,980	<BG
Cs Cäsium	[µg/l]	19	0	21	0	0,0280	0,0828	0,1483	0,2480	0,7370	1,326	1,570	0,4833
Cu Kupfer	[µg/l]	19	0	21	0	0,169	0,271	0,515	0,620	2,098	5,783	16,98	2,562
Hg Quecksilber	[µg/l]	19	12	21	14	<NG	<NG	<NG	<NG	0,055	0,220	0,277	0,052
La Lanthan	[µg/l]	19	1	21	1	<NG	0,0050	0,0095	0,0210	0,0805	0,1508	1,443	0,1213
Li Lithium	[µg/l]	19	0	21	0	1,668	2,152	5,981	13,21	33,88	40,20	62,06	18,66
Mo Molybdän	[µg/l]	19	16	21	18	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	<BG	<NG
Ni Nickel	[µg/l]	19	6	21	8	<NG	<NG	<NG	2,939	5,498	8,916	21,02	4,019
Pb Blei	[µg/l]	19	7	21	8	<NG	<NG	<NG	0,025	0,470	1,080	1,505	0,322
Rb Rubidium	[µg/l]	19	0	21	0	3,840	4,676	5,553	7,064	11,62	19,56	25,20	9,629
Sb Antimon	[µg/l]	19	10	21	10	<NG	<NG	<NG	<BG	0,009	0,015	0,020	<BG
Se Selen	[µg/l]	19	16	21	18	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	2,141	<NG
Sn Zinn	[µg/l]	19	2	21	2	<NG	<BG	<BG	0,041	0,058	0,100	0,352	0,059
Sr Strontium	[µg/l]	19	0	21	0	18,1	27,2	35,3	46,2	70,4	90,7	113	54,7
Th Thorium	[µg/l]	19	8	21	7	<NG	<NG	<NG	<BG	0,017	0,080	0,135	0,022
Ti Titan	[µg/l]	18	0	20	0	0,223	0,379	0,525	0,632	0,788	0,932	0,995	0,644
Tl Thallium	[µg/l]	19	1	21	1	<NG	0,019	0,028	0,094	0,146	0,306	0,441	0,122
U Uran	[µg/l]	19	0	21	0	<BG	0,0038	0,0043	0,0210	0,0645	0,1736	0,2040	0,0522
V Vanadium	[µg/l]	19	13	21	15	<NG	<NG	<NG	<NG	0,038	0,304	0,330	0,057
Y Yttrium	[µg/l]	19	1	21	1	<NG	0,0082	0,0325	0,0860	0,1962	0,6518	2,090	0,2766
Zn Zink	[µg/l]	19	1	21	1	<NG	5,471	9,488	15,63	32,45	65,34	404,8	42,70

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-20: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus den Ries-Trümmermassen

3.15 Ries-Trümmermassen													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	45	0	47	0	7,0	9,0	9,4	10,2	11,0	12,3	15,8	10,4
pH-Wert (Gelände)		45	0	47	0	6,70	7,06	7,15	7,28	7,36	7,55	7,75	7,27
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	45	0	47	0	52,8	57,8	60,9	66,2	70,9	82,5	111,0	68,1
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	42	0	44	0	0,17	4,13	5,80	7,50	8,88	9,57	10,61	7,04
O ₂ -Sättigung	[%]	42	0	44	0	1,7	35,1	53,0	70,3	80,6	88,8	97,3	63,9
CO ₂ frei	[mg/l]	37	0	37	0	22,9	26,4	31,7	37,0	39,6	48,6	66,0	37,6
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	43	33	45	34	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,33	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	45	0	47	0	2,35	5,90	10,44	16,86	22,57	31,13	90,30	19,51
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	43	38	45	40	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,78	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	45	3	47	3	<NG	3,45	14,29	29,50	47,44	69,77	107,00	33,64
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	45	41	47	43	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,33	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	45	0	47	0	5,33	11,18	12,98	18,54	28,27	40,84	84,60	22,87
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	45	39	47	41	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,63	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	45	0	47	0	203,8	308,0	324,7	347,8	379,1	397,0	506,5	351,5
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	45	0	47	0	1,120	1,945	2,384	3,823	5,250	9,371	35,00	5,340
K ⁺ Kalium	[mg/l]	45	1	47	1	<NG	0,581	0,792	1,377	2,312	3,752	29,90	2,662
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	45	45	47	47	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	45	0	47	0	59,13	94,74	105,3	113,2	126,5	142,2	162,3	115,1
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	45	0	47	0	2,113	3,899	7,600	11,95	17,54	33,94	42,59	14,82
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	45	32	47	34	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,0150	0,6012	0,0169
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	45	34	47	36	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,01573	0,2033	0,00799
Si Silicium	[mg/l]	45	0	47	0	2,50	3,04	3,14	3,73	5,58	6,88	14,30	4,53
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	35	5	35	5	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	2,29	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	45	0	47	0	458,1	492,5	512,8	556,8	589,5	671,1	890,0	570,3
Gesamthärte	[° dH]	45	0	47	0	15,0	16,5	17,6	19,1	20,2	24,0	27,5	19,5
Karbonathärte	[° dH]	45	0	47	0	9,36	14,14	14,90	15,97	17,40	18,23	23,25	16,14
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		45	0	47	0	-0,81	-0,50	-0,38	-0,33	-0,24	-0,12	0,37	-0,32
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	37	0	37	0	0,52	0,60	0,72	0,84	0,90	1,10	1,50	0,86
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	45	0	47	0	3,340	5,048	5,321	5,700	6,213	6,507	8,302	5,761
Ag Silber	[µg/l]	35	19	35	19	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,047	<BG
Al Aluminium	[µg/l]	36	7	36	7	<NG	<NG	<BG	<BG	1,353	2,201	7,481	1,099
As Arsen	[µg/l]	35	0	35	0	0,062	0,179	0,229	0,456	0,717	1,273	6,335	0,721
Au Gold	[µg/l]	35	12	35	12	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,056	0,078	<BG
B Bor	[µg/l]	35	2	35	2	<NG	1,640	3,944	10,47	15,12	19,82	28,86	10,09
Ba Barium	[µg/l]	44	0	46	0	6,30	10,6	16,3	44,9	84,7	243	359	75,3
Be Beryllium	[µg/l]	35	30	35	30	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	<NG
Bi Wismut	[µg/l]	35	6	35	6	<NG	<NG	<BG	<BG	0,010	0,014	0,041	<BG
Cd Cadmium	[µg/l]	35	2	35	2	<NG	<BG	<BG	<BG	0,015	0,028	0,092	0,015
Ce Cer	[µg/l]	35	1	35	1	<NG	<BG	<BG	<BG	0,007	0,010	0,028	0,007
Co Cobalt	[µg/l]	36	1	36	1	<NG	0,061	0,073	0,100	0,130	0,153	0,217	0,103
Cr Chrom	[µg/l]	35	0	35	0	<BG	<BG	0,288	0,380	0,507	0,635	0,786	0,400
Cs Cäsium	[µg/l]	35	0	35	0	0,0030	0,0080	0,0200	0,0620	0,2210	0,8712	5,596	0,4295
Cu Kupfer	[µg/l]	35	0	35	0	0,481	0,502	0,584	0,914	1,535	2,273	4,533	1,291
Hg Quecksilber	[µg/l]	35	21	35	21	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,033	0,067	<BG
La Lanthan	[µg/l]	35	0	35	0	0,0010	0,0020	0,0030	0,0040	0,0070	0,0096	0,0190	0,0056
Li Lithium	[µg/l]	36	0	36	0	1,329	2,586	3,485	6,329	15,42	26,28	36,77	10,43
Mo Molybdän	[µg/l]	35	32	35	32	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,654	<BG
Ni Nickel	[µg/l]	36	16	36	16	<NG	<NG	<NG	0,356	1,059	3,345	6,729	0,980
Pb Blei	[µg/l]	35	0	35	0	0,021	0,032	0,047	0,082	0,159	0,695	1,096	0,207
Rb Rubidium	[µg/l]	35	0	35	0	0,456	0,886	1,222	2,526	5,022	8,588	15,00	3,704
Sb Antimon	[µg/l]	35	3	35	3	<NG	<BG	<BG	0,015	0,025	0,049	0,069	0,020
Se Selen	[µg/l]	35	2	35	2	<NG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	4,318	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	35	15	35	15	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,074	0,129	<BG
Sr Strontium	[µg/l]	44	0	46	0	60,0	87,6	95,3	142	229	491	1,360	251
Th Thorium	[µg/l]	35	7	35	7	<NG	<NG	<BG	0,025	0,041	0,059	0,139	0,030
Ti Titan	[µg/l]	35	0	35	0	0,204	0,392	0,453	0,609	0,949	1,275	11,29	1,012
Tl Thallium	[µg/l]	35	7	35	7	<NG	<NG	<BG	0,006	0,015	0,028	0,129	0,014
U Uran	[µg/l]	35	0	35	0	0,0240	0,2642	0,3245	0,6110	1,082	2,977	8,823	1,249
V Vanadium	[µg/l]	35	0	35	0	0,081	0,134	0,229	0,392	0,554	0,862	4,320	0,552
Y Yttrium	[µg/l]	35	0	35	0	0,0030	0,0050	0,0070	0,0160	0,0220	0,0302	0,0430	0,0164
Zn Zink	[µg/l]	36	1	36	1	<NG	1,978	2,512	4,080	8,997	13,08	128,8	9,632

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-21: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Braunkohlentertiär

4 Braunkohlentertiär													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	14	0	14	0	4,2	6,7	8,2	10,1	10,9	11,4	13,2	9,5
pH-Wert (Gelände)		14	0	14	0	5,60	5,73	5,90	6,39	6,80	7,21	7,50	6,45
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	14	0	14	0	15,5	16,9	21,6	28,4	38,0	44,7	46,9	30,1
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	14	0	14	0	0,16	0,40	0,73	3,12	8,40	11,08	16,70	4,82
O ₂ -Sättigung	[%]	12	0	12	0	1,6	3,4	5,3	27,9	49,0	69,0	95,5	32,2
CO ₂ frei	[mg/l]	14	0	14	0	4,4	9,3	22,2	36,1	40,3	52,3	69,5	33,3
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	6	3	6	3	<NG	---	---	<NG	---	---	0,36	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	14	0	14	0	0,75	4,94	13,54	20,99	24,79	35,89	40,25	20,00
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	6	5	6	5	<NG	---	---	<NG	---	---	0,35	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	14	3	14	3	<NG	<NG	1,57	9,60	18,36	28,67	65,30	14,09
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	14	13	14	13	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,00	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	14	0	14	0	<NG	3,38	6,36	41,15	64,07	109,61	199,00	50,92
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	11	10	11	10	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	14	0	14	0	16,5	30,3	40,3	67,2	115,8	180,9	224,8	90,7
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	14	0	14	0	2,100	3,816	3,900	4,757	6,365	11,97	18,55	6,342
K ⁺ Kalium	[mg/l]	14	0	14	0	0,300	0,800	0,971	2,364	10,35	13,48	15,30	5,549
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	14	13	14	13	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	14	0	14	0	13,80	15,14	17,08	41,18	50,00	61,46	67,28	37,94
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	14	0	14	0	2,924	5,885	8,575	9,440	13,70	16,77	29,90	11,36
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	14	1	14	1	<NG	0,0260	0,0680	0,1750	1,704	4,044	14,60	1,877
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	14	5	14	5	<NG	<NG	<NG	0,00667	0,2132	0,3700	0,9600	0,1494
Si Silicium	[mg/l]	14	0	14	0	2,57	3,53	4,34	6,68	9,28	13,97	15,46	7,57
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	6	3	6	3	<NG	---	---	<NG	---	---	<NG	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	14	0	14	0	113,6	124,7	166,1	261,7	296,2	361,7	406,8	246,7
Gesamthärte	[° dH]	14	0	14	0	2,60	3,65	4,34	7,94	10,5	12,7	15,4	7,92
Karbonathärte	[° dH]	14	0	14	0	0,76	1,39	1,85	3,09	5,32	8,31	10,32	4,16
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		14	0	14	0	-3,75	-3,68	-2,88	-2,24	-1,57	-1,23	-0,83	-2,35
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	14	0	14	0	0,10	0,21	0,50	0,82	0,92	1,19	1,58	0,76
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	14	0	14	0	0,270	0,497	0,660	1,102	1,899	2,965	3,685	1,486
Ag Silber	[µg/l]	4	4	4	4	<NG	---	---	---	---	---	<NG	<NG
Al Aluminium	[µg/l]	6	2	6	2	<NG	---	---	25,38	---	---	37,64	19,25
As Arsen	[µg/l]	6	2	6	2	<NG	---	---	0,059	---	---	0,120	0,058
Au Gold	[µg/l]	4	0	4	0	<BG	---	---	---	---	---	<BG	<BG
B Bor	[µg/l]	6	4	6	4	<NG	---	---	<NG	---	---	8,128	2,646
Ba Barium	[µg/l]	6	0	6	0	85,0	---	---	107	---	---	202	120
Be Beryllium	[µg/l]	6	3	6	3	<NG	---	---	<BG	---	---	0,083	<BG
Bi Wismut	[µg/l]	6	1	6	1	<NG	---	---	<BG	---	---	<BG	<BG
Cd Cadmium	[µg/l]	6	2	6	2	<NG	---	---	0,020	---	---	0,175	0,042
Ce Cer	[µg/l]	4	0	4	0	0,012	---	---	---	---	---	0,014	0,013
Co Cobalt	[µg/l]	6	1	6	1	<NG	---	---	0,086	---	---	0,966	0,235
Cr Chrom	[µg/l]	6	3	6	3	<NG	---	---	<BG	---	---	0,302	<BG
Cs Cäsium	[µg/l]	6	0	6	0	0,0010	---	---	0,0115	---	---	0,5760	0,1148
Cu Kupfer	[µg/l]	6	0	6	0	0,198	---	---	0,445	---	---	1,274	0,536
Hg Quecksilber	[µg/l]	6	4	6	4	<NG	---	---	<NG	---	---	0,394	0,089
La Lanthan	[µg/l]	6	0	6	0	0,0050	---	---	0,0080	---	---	0,0400	0,0133
Li Lithium	[µg/l]	6	0	6	0	1,103	---	---	2,929	---	---	17,53	6,106
Mo Molybdän	[µg/l]	6	2	6	2	<NG	---	---	<BG	---	---	0,260	0,067
Ni Nickel	[µg/l]	6	3	6	3	<NG	---	---	0,871	---	---	2,082	0,976
Pb Blei	[µg/l]	6	2	6	2	<NG	---	---	0,052	---	---	2,587	0,462
Rb Rubidium	[µg/l]	6	0	6	0	0,499	---	---	1,540	---	---	11,09	3,567
Sb Antimon	[µg/l]	6	4	6	4	<NG	---	---	<NG	---	---	0,013	<BG
Se Selen	[µg/l]	6	3	6	3	<NG	---	---	<NG	---	---	<BG	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	6	4	6	4	<NG	---	---	<NG	---	---	0,044	<BG
Sr Strontium	[µg/l]	6	0	6	0	85,2	---	---	133	---	---	234	139
Th Thorium	[µg/l]	6	0	6	0	<BG	---	---	0,022	---	---	0,109	0,041
Ti Titan	[µg/l]	6	0	6	0	<BG	---	---	0,316	---	---	1,381	0,596
Tl Thallium	[µg/l]	6	2	6	2	<NG	---	---	0,009	---	---	0,058	0,021
U Uran	[µg/l]	6	0	6	0	0,0040	---	---	0,0595	---	---	0,3420	0,1012
V Vanadium	[µg/l]	6	3	6	3	<NG	---	---	<BG	---	---	0,105	0,037
Y Yttrium	[µg/l]	6	0	6	0	0,0100	---	---	0,0335	---	---	0,1760	0,0642
Zn Zink	[µg/l]	6	0	6	0	0,801	---	---	6,199	---	---	29,80	10,06

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-22: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus den Quartärschottern mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung

5 Quartärschotter mit vorwiegend silikatischer Zusammensetzung													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	102	0	104	0	5,2	8,9	9,5	10,6	11,7	13,0	14,9	10,7
pH-Wert (Gelände)		105	0	107	0	4,70	6,49	7,10	7,23	7,40	7,50	8,10	7,10
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	114	0	116	0	2,0	7,9	21,2	57,3	69,9	91,8	123,0	49,7
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	103	0	105	0	<BG	0,32	2,25	5,47	8,53	10,10	14,20	5,53
O ₂ -Sättigung	[%]	61	0	61	0	1,8	27,7	49,0	67,1	82,4	94,9	131,0	65,0
CO ₂ frei	[mg/l]	98	0	100	0	4,0	10,1	15,2	23,8	37,8	47,3	52,8	26,4
F Fluorid	[mg/l]	45	27	45	27	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,36	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	115	3	117	3	<NG	3,50	14,50	28,34	47,45	61,81	109,90	32,07
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	45	42	45	42	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	115	6	117	6	<NG	<NG	5,00	11,00	32,32	55,19	127,41	21,30
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	110	102	112	104	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,01	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	115	1	117	1	<NG	14,96	32,60	54,00	102,40	151,66	363,00	79,21
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	83	79	85	81	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	106	0	108	0	6,4	80,9	227,8	285,3	335,9	385,3	518,6	268,5
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	103	0	105	0	0,700	3,040	6,150	11,00	19,54	24,88	33,00	13,01
K ⁺ Kalium	[mg/l]	100	0	102	0	0,250	1,188	2,135	3,368	5,425	7,620	46,60	4,737
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	93	80	95	82	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	13,00	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	115	0	117	0	1,376	36,28	63,04	94,00	124,2	138,3	235,7	94,90
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	115	0	117	0	0,450	4,380	10,71	21,30	25,15	33,26	75,54	20,37
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	113	36	115	36	<NG	<NG	<NG	0,0600	0,4500	1,284	7,923	0,4359
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	99	34	101	35	<NG	<NG	<NG	0,02497	0,3300	0,7784	1,813	0,2450
Si Silicium	[mg/l]	101	0	103	0	1,31	2,43	3,26	4,44	5,72	6,71	18,60	4,74
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	37	3	37	3	<NG	<NG	<NG	<NG	1,36	2,60	5,53	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	115	0	118	0	15,63	118,7	357,9	546,5	663,5	786,7	1.246	516,2
Gesamthärte	[° dH]	115	0	117	0	0,302	6,98	12,0	18,5	22,8	27,5	42,4	18,0
Karbonathärte	[° dH]	106	0	108	0	0,29	3,71	10,46	13,10	15,42	17,69	23,81	12,33
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		97	0	99	0	-5,88	-2,61	-0,77	-0,42	-0,27	-0,09	0,51	-0,84
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	98	0	100	0	0,09	0,23	0,35	0,54	0,86	1,07	1,20	0,60
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	106	0	108	0	0,105	1,325	3,733	4,676	5,505	6,315	8,500	4,400
Ag Silber	[µg/l]	30	26	30	26	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,041	<BG
Al Aluminium	[µg/l]	37	6	37	6	<NG	<NG	1,135	19,77	33,15	45,17	52,43	19,18
As Arsen	[µg/l]	37	2	37	2	<NG	0,135	0,270	0,494	0,817	2,632	6,210	0,982
Au Gold	[µg/l]	29	8	29	8	<NG	<NG	<NG	<BG	0,052	0,131	0,227	0,046
B Bor	[µg/l]	37	17	37	17	<NG	<NG	<NG	2,731	16,61	38,37	159,2	15,97
Ba Barium	[µg/l]	45	1	45	1	<NG	30,0	57,7	85,7	124	139	273	92,8
Be Beryllium	[µg/l]	37	28	37	28	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	1,400	0,050
Bi Wismut	[µg/l]	37	16	37	16	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,021	0,038	<BG
Cd Cadmium	[µg/l]	37	22	37	22	<NG	<NG	<NG	<NG	0,013	0,085	0,462	0,034
Ce Cer	[µg/l]	29	2	29	2	<NG	<BG	0,007	0,030	0,045	0,077	0,182	0,040
Co Cobalt	[µg/l]	37	2	37	2	<NG	0,018	0,077	0,121	0,173	0,478	1,880	0,246
Cr Chrom	[µg/l]	37	2	37	2	<NG	<BG	0,336	0,680	1,136	1,845	4,044	0,882
Cs Cäsium	[µg/l]	37	6	37	6	<NG	<NG	0,0030	0,0050	0,0280	0,1192	0,5670	0,0424
Cu Kupfer	[µg/l]	37	0	37	0	0,140	0,489	0,731	1,498	2,448	4,287	35,87	2,713
Hg Quecksilber	[µg/l]	37	22	37	22	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,044	0,245	<BG
La Lanthan	[µg/l]	37	0	37	0	0,0024	0,0050	0,0091	0,0160	0,0330	0,0798	0,3000	0,0355
Li Lithium	[µg/l]	37	0	37	0	0,783	1,890	2,752	4,167	7,574	10,89	29,06	6,060
Mo Molybdän	[µg/l]	37	22	37	22	<NG	<NG	<NG	<NG	0,158	0,920	1,530	0,191
Ni Nickel	[µg/l]	37	5	37	5	<NG	<NG	<BG	0,624	1,680	3,420	5,480	1,119
Pb Blei	[µg/l]	37	8	37	8	<NG	<NG	<BG	0,052	0,099	0,433	0,720	0,123
Rb Rubidium	[µg/l]	37	0	37	0	0,247	0,407	0,607	1,260	2,070	2,644	20,71	1,872
Sb Antimon	[µg/l]	37	7	37	7	<NG	<NG	0,009	0,026	0,076	0,106	0,204	0,042
Se Selen	[µg/l]	37	7	37	7	<NG	<NG	<BG	<BG	<BG	3,263	6,450	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	37	28	37	28	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,042	0,076	<BG
Sr Strontium	[µg/l]	45	0	45	0	3,00	41,3	100	269	332	423	776	239
Th Thorium	[µg/l]	37	12	37	12	<NG	<NG	<NG	0,029	0,107	0,132	0,225	0,053
Ti Titan	[µg/l]	37	1	37	1	<NG	0,875	1,096	1,390	2,477	3,742	17,94	2,308
Tl Thallium	[µg/l]	37	28	37	28	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,005	0,120	0,005
U Uran	[µg/l]	37	0	37	0	0,0031	0,0856	0,2280	0,8000	2,169	3,303	8,032	1,385
V Vanadium	[µg/l]	37	6	37	6	<NG	<NG	0,144	0,356	0,540	0,861	2,830	0,438
Y Yttrium	[µg/l]	37	3	37	3	<NG	0,0054	0,0230	0,0350	0,0730	0,1252	1,540	0,0945
Zn Zink	[µg/l]	37	0	37	0	2,304	3,286	5,634	7,778	15,05	55,12	878,3	60,49

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-23: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus den Quartärschottern mit vorwiegend karbonatischer Zusammensetzung

6.1 Quartärschotter mit vorwiegend karbonatischer Zusammensetzung													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	711	0	753	0	4,7	7,6	8,5	9,4	10,6	12,0	18,6	9,7
pH-Wert (Gelände)		702	0	744	0	6,30	6,99	7,15	7,30	7,48	7,60	8,50	7,31
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	722	0	764	0	4,0	23,4	48,0	63,8	82,4	99,0	222,0	64,2
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	686	0	725	0	<BG	1,25	4,10	7,30	9,30	10,40	12,93	6,57
O ₂ -Sättigung	[%]	611	0	650	0	<BG	10,8	37,8	67,2	86,8	95,2	121,6	60,5
CO ₂ frei	[mg/l]	668	0	710	0	<BG	9,7	18,5	29,0	43,3	59,0	277,0	33,4
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	375	205	400	213	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,08	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	723	4	764	4	<NG	3,46	9,00	18,10	38,32	63,36	257,80	27,29
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	373	345	398	364	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,50	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	724	32	765	36	<NG	2,21	6,59	16,30	31,04	51,38	234,09	23,01
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	675	659	704	687	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	5,40	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	723	8	764	8	<NG	9,00	14,06	24,21	47,07	77,88	412,00	37,01
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	474	431	501	452	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	22,90	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	713	0	754	0	60,4	247,7	311,0	359,4	402,7	438,1	848,0	352,6
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	663	0	692	0	0,080	1,118	3,300	6,030	10,31	16,18	87,32	8,173
K ⁺ Kalium	[mg/l]	658	1	687	1	<NG	0,500	0,900	1,546	3,000	5,951	60,00	2,928
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	655	638	684	661	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	4,01	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	721	0	762	0	18,80	66,50	84,60	100,6	122,1	140,9	230,9	102,9
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	721	0	762	0	1,569	14,62	19,90	24,80	29,70	35,30	76,10	24,88
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	710	301	751	312	<NG	<NG	<NG	<BG	0,0707	0,3000	77,60	0,3950
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	672	460	701	468	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,08450	1,100	0,03472
Si Silicium	[mg/l]	668	11	697	11	<NG	1,40	2,09	2,88	3,82	4,80	8,97	3,01
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	365	67	387	71	<NG	<NG	<NG	<NG	1,55	3,20	51,70	2,20
Gesamtmineralisation	[mg/l]	691	0	730	0	116,9	391,3	486,3	570,1	677,8	786,1	1.524	579,9
Gesamthärte	[° dH]	725	0	766	0	3,62	13,2	16,8	19,7	23,5	27,4	46,9	20,1
Karbonathärte	[° dH]	713	0	754	0	2,77	11,37	14,28	16,50	18,49	20,11	38,93	16,19
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		679	0	720	0	-2,82	-0,59	-0,46	-0,35	-0,26	-0,14	0,48	-0,36
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	668	0	710	0	<BG	0,22	0,42	0,66	0,98	1,34	6,30	0,76
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	713	0	754	0	0,990	4,060	5,097	5,890	6,600	7,180	13,898	5,777
Ag Silber	[µg/l]	270	175	294	199	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,049	0,190	<BG
Al Aluminium	[µg/l]	343	100	368	111	<NG	<NG	<NG	1,573	5,366	49,69	131,5	12,45
As Arsen	[µg/l]	344	10	369	11	<NG	0,059	0,197	0,420	1,053	1,910	27,12	1,048
Au Gold	[µg/l]	260	71	281	81	<NG	<NG	<NG	<BG	0,048	0,094	0,565	0,041
B Bor	[µg/l]	343	21	368	26	<NG	2,759	6,012	13,00	26,49	44,63	361,8	20,70
Ba Barium	[µg/l]	343	1	368	1	<NG	15,0	31,6	45,5	67,0	101	229	53,9
Be Beryllium	[µg/l]	337	234	359	248	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,070	0,260	<BG
Bi Wismut	[µg/l]	342	115	367	128	<NG	<NG	<NG	<BG	0,012	0,020	0,800	0,013
Cd Cadmium	[µg/l]	344	74	369	83	<NG	<NG	<BG	0,013	0,034	0,057	1,993	0,031
Ce Cer	[µg/l]	266	21	290	22	<NG	<BG	<BG	0,008	0,022	0,056	1,271	0,031
Co Cobalt	[µg/l]	343	26	368	27	<NG	0,004	0,041	0,080	0,139	0,231	3,520	0,114
Cr Chrom	[µg/l]	344	66	369	79	<NG	<NG	<BG	0,414	1,044	3,062	8,326	0,993
Cs Cäsium	[µg/l]	343	39	368	40	<NG	<NG	0,0020	0,0050	0,0100	0,0277	1,712	0,0311
Cu Kupfer	[µg/l]	343	5	368	6	<NG	0,390	0,774	1,364	2,231	3,701	21,65	1,894
Hg Quecksilber	[µg/l]	344	159	369	176	<NG	<NG	<NG	<BG	0,061	0,442	2,710	0,144
La Lanthan	[µg/l]	343	41	368	42	<NG	<NG	0,0030	0,0070	0,0190	0,0499	4,542	0,0376
Li Lithium	[µg/l]	343	2	368	3	<NG	0,589	0,999	2,030	3,448	5,517	17,69	2,657
Mo Molybdän	[µg/l]	343	111	368	124	<NG	<NG	<NG	0,260	0,670	1,283	10,02	0,544
Ni Nickel	[µg/l]	343	87	368	98	<NG	<NG	<NG	0,677	1,315	2,315	22,20	1,271
Pb Blei	[µg/l]	343	49	368	57	<NG	<NG	0,040	0,120	0,305	0,599	3,589	0,260
Rb Rubidium	[µg/l]	343	0	368	0	0,063	0,254	0,374	0,570	0,828	1,539	41,20	1,053
Sb Antimon	[µg/l]	342	20	367	21	<NG	0,011	0,034	0,082	0,170	0,270	0,908	0,122
Se Selen	[µg/l]	344	81	369	88	<NG	<NG	<BG	<BG	2,332	4,241	18,05	2,063
Sn Zinn	[µg/l]	343	117	368	127	<NG	<NG	<NG	<BG	0,057	0,210	1,657	0,067
Sr Strontium	[µg/l]	343	0	368	0	17,2	114	170	214	268	345	1.433	236
Th Thorium	[µg/l]	342	123	367	137	<NG	<NG	<NG	<BG	0,033	0,069	1,220	0,030
Ti Titan	[µg/l]	343	19	368	20	<NG	0,265	0,574	1,091	2,143	3,166	60,65	2,050
Tl Thallium	[µg/l]	342	186	367	200	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,050	0,820	0,014
U Uran	[µg/l]	342	1	367	1	<NG	0,5700	0,9635	1,345	2,666	5,131	74,69	2,511
V Vanadium	[µg/l]	343	46	368	52	<NG	<NG	0,103	0,426	0,760	1,381	3,811	0,333
Y Yttrium	[µg/l]	343	26	368	27	<NG	0,0052	0,0130	0,0200	0,0368	0,0826	0,6852	0,0464
Zn Zink	[µg/l]	344	4	369	5	<NG	2,891	5,512	10,64	22,91	53,19	414,1	24,05

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-24: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus den quartären Grundwasserleitern im Moränenbereich

6.2 Quartäre Grundwasserleiter im Moränenbereich													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	259	0	268	0	3,6	6,6	7,8	8,6	9,3	10,2	12,8	8,6
pH-Wert (Gelände)		246	0	253	0	6,90	7,20	7,33	7,50	7,74	8,09	8,64	7,58
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	259	0	270	0	3,6	28,1	42,0	55,1	63,7	72,7	505,0	60,2
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	235	0	245	0	<BG	3,94	6,60	8,50	10,20	11,46	14,10	8,15
O ₂ -Sättigung	[%]	183	0	185	0	0,8	35,2	53,3	74,5	88,6	102,9	129,0	71,6
CO ₂ frei	[mg/l]	215	0	219	0	<BG	7,1	16,7	29,9	48,1	63,0	118,8	33,5
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	122	106	123	106	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,64	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	261	1	272	2	<NG	0,57	1,80	6,00	11,94	20,21	47,20	8,47
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	119	115	120	116	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	260	5	271	5	<NG	1,58	3,13	7,66	16,19	31,00	156,90	12,67
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	259	251	267	259	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	31,00	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	259	3	270	3	<NG	2,93	6,23	10,32	14,88	21,00	139,30	12,62
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	131	122	133	124	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	15,60	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	259	0	270	0	85,4	188,4	264,5	345,3	388,1	429,5	587,4	325,7
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	259	1	270	1	<NG	0,360	1,300	2,572	4,300	8,814	25,50	3,709
K ⁺ Kalium	[mg/l]	259	7	270	7	<NG	<BG	0,407	0,800	1,432	2,620	36,00	1,492
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	258	257	269	268	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	31,02	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	259	0	270	0	18,97	47,68	67,07	90,20	105,0	117,4	149,5	86,28
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	258	0	269	0	0,364	5,268	15,85	21,15	24,95	27,93	37,88	19,32
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	260	93	271	96	<NG	<NG	0,0200	0,0650	0,2709	10,80	0,1543	
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	260	224	270	234	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,5500	0,00592
Si Silicium	[mg/l]	261	12	272	12	<NG	<BG	1,36	2,35	3,24	4,16	8,36	2,42
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	119	15	120	15	<NG	<NG	<NG	<NG	1,43	1,99	11,92	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	255	0	266	0	112,6	262,3	390,7	504,9	569,2	632,2	814,8	472,4
Gesamthärte	[° dH]	261	0	272	0	3,97	9,04	13,2	17,6	20,0	22,2	27,4	16,5
Karbonathärte	[° dH]	259	0	270	0	3,92	8,65	12,14	15,85	17,82	19,72	26,97	14,95
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		242	0	248	0	-1,06	-0,47	-0,37	-0,27	-0,14	0,02	0,60	-0,25
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	215	0	219	0	<BG	0,16	0,38	0,68	1,09	1,43	2,70	0,76
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	259	0	270	0	1,400	3,088	4,335	5,659	6,361	7,040	9,627	5,338
Ag Silber	[µg/l]	67	56	67	56	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,043	<BG
Al Aluminium	[µg/l]	119	42	120	42	<NG	<NG	<NG	1,141	2,925	8,898	6,482	58,22
As Arsen	[µg/l]	122	10	123	11	<NG	<BG	0,087	0,192	0,939	1,736	212,6	2,372
Au Gold	[µg/l]	66	32	66	32	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,048	0,150	<BG
B Bor	[µg/l]	119	18	120	18	<NG	<NG	3,163	7,388	13,16	23,17	2,312	30,39
Ba Barium	[µg/l]	119	1	120	1	<NG	3,75	9,60	29,0	49,9	64,4	268	34,8
Be Beryllium	[µg/l]	119	78	120	78	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,130	<NG
Bi Wismut	[µg/l]	118	60	119	61	<NG	<NG	<NG	<NG	0,008	0,032	0,420	0,018
Cd Cadmium	[µg/l]	122	65	123	66	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,018	0,500	0,013
Ce Cer	[µg/l]	66	17	66	17	<NG	<NG	<NG	<BG	0,008	0,015	0,106	0,007
Co Cobalt	[µg/l]	119	34	120	35	<NG	<NG	<NG	0,027	0,078	0,189	6,340	0,142
Cr Chrom	[µg/l]	122	7	123	7	<NG	0,257	0,423	1,268	2,056	3,508	17,42	2,000
Cs Cäsium	[µg/l]	119	40	120	41	<NG	<NG	<NG	0,0014	0,0034	0,0070	0,1090	0,0036
Cu Kupfer	[µg/l]	119	4	120	4	<NG	0,184	0,392	0,620	1,114	1,887	11,54	0,974
Hg Quecksilber	[µg/l]	122	59	123	59	<NG	<NG	<NG	<BG	0,087	0,613	2,100	0,157
La Lanthan	[µg/l]	119	51	120	52	<NG	<NG	<NG	0,0020	0,0059	0,0124	2,719	0,0326
Li Lithium	[µg/l]	119	10	120	11	<NG	<BG	0,288	0,930	1,615	2,799	7,680	1,219
Mo Molybdän	[µg/l]	119	34	120	34	<NG	<NG	<NG	0,160	0,427	0,688	6,730	0,339
Ni Nickel	[µg/l]	119	39	120	40	<NG	<NG	<NG	0,326	0,539	0,995	5,498	0,477
Pb Blei	[µg/l]	121	56	122	57	<NG	<NG	<NG	<BG	0,157	0,490	8,000	0,206
Rb Rubidium	[µg/l]	119	1	120	1	<NG	0,095	0,170	0,323	0,543	0,747	4,080	0,438
Sb Antimon	[µg/l]	119	22	120	22	<NG	<NG	0,022	0,110	0,173	0,256	0,942	0,124
Se Selen	[µg/l]	121	37	122	37	<NG	<NG	<NG	<BG	4,066	14,59	22,90	3,984
Sn Zinn	[µg/l]	119	84	120	84	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,650	<BG
Sr Strontium	[µg/l]	119	0	120	0	7,60	24,0	40,8	150	209	291	698	155
Th Thorium	[µg/l]	118	51	119	52	<NG	<NG	<NG	<BG	0,027	0,062	1,700	0,050
Ti Titan	[µg/l]	119	19	120	20	<NG	<NG	<NG	0,521	2,783	4,442	85,69	2,260
Tl Thallium	[µg/l]	118	72	119	72	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,021	0,390	0,016
U Uran	[µg/l]	118	9	119	9	<NG	0,0301	0,0902	0,3990	1,330	1,956	16,86	0,9640
V Vanadium	[µg/l]	119	1	120	1	<NG	0,064	0,147	0,301	0,464	0,684	4,340	0,523
Y Yttrium	[µg/l]	119	40	120	41	<NG	<NG	<NG	0,0064	0,0145	0,0308	0,5960	0,0191
Zn Zink	[µg/l]	122	8	123	9	<NG	0,154	0,910	4,044	7,955	16,02	155,7	7,996

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-25: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus der seichten Vorlandmolasse

6.3 Seichte Vorlandmolasse													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	276	0	335	0	5,2	7,6	8,9	9,9	11,2	12,9	18,5	10,2
pH-Wert (Gelände)		279	0	337	0	4,80	6,85	7,13	7,32	7,50	7,69	8,50	7,29
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	283	0	342	0	8,8	38,2	49,6	64,3	77,3	93,4	181,5	65,3
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	273	0	329	0	0,10	1,40	4,40	7,60	9,30	10,19	12,08	6,74
O ₂ -Sättigung	[%]	254	0	308	0	<BG	12,6	39,2	69,4	84,6	96,0	122,4	62,1
CO ₂ frei	[mg/l]	268	0	326	0	<BG	7,0	13,1	22,9	36,3	51,7	123,2	26,9
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	182	78	241	108	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	3,03	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	279	0	339	0	0,71	1,81	7,37	22,12	38,12	57,40	304,35	28,37
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	182	159	241	206	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	2,30	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	280	44	340	60	<NG	<NG	5,55	29,67	50,02	81,36	265,26	36,93
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	262	254	321	311	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,60	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	278	3	337	4	<NG	9,61	15,63	25,19	38,96	61,69	527,83	33,37
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	203	190	262	243	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	19,20	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	279	0	338	0	23,6	191,9	245,3	305,5	371,0	420,7	573,6	302,5
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	263	0	323	0	0,200	2,710	4,090	5,875	9,333	13,96	358,4	9,996
K ⁺ Kalium	[mg/l]	263	0	323	0	<BG	0,335	0,498	0,800	1,696	4,328	64,30	2,284
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	264	252	323	310	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	2,30	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	280	0	340	0	8,290	47,30	66,40	87,83	107,0	128,3	269,5	87,75
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	279	0	339	0	1,700	11,74	19,22	26,74	32,32	38,31	53,58	25,87
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	280	66	339	95	<NG	<NG	<BG	0,0236	0,1300	0,5102	7,660	0,2024
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	264	102	323	114	<NG	<NG	<NG	<BG	0,01763	0,05527	0,6034	0,02339
Si Silicium	[mg/l]	263	0	322	0	<BG	3,26	4,72	5,80	7,12	8,86	18,71	6,09
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	176	41	231	50	<NG	<NG	<NG	<NG	1,93	3,06	52,17	2,76
Gesamtmineralisation	[mg/l]	269	0	330	0	69,71	328,0	427,7	536,0	622,9	735,6	1.333	537,1
Gesamthärte	[° dH]	280	0	340	0	1,90	10,2	13,8	18,2	21,9	25,6	50,0	18,2
Karbonathärte	[° dH]	279	0	338	0	1,08	8,81	11,26	14,03	17,03	19,31	26,33	13,89
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		267	0	324	0	-4,32	-1,03	-0,58	-0,39	-0,23	-0,09	0,46	-0,51
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	268	0	326	0	<BG	0,16	0,30	0,52	0,82	1,18	2,80	0,61
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	279	0	338	0	0,387	3,146	4,019	5,007	6,080	6,894	9,400	4,958
Ag Silber	[µg/l]	155	75	212	123	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,054	0,164	0,015
Al Aluminium	[µg/l]	177	59	236	92	<NG	<NG	<NG	1,263	4,585	19,65	133,2	6,759
As Arsen	[µg/l]	182	1	241	1	<NG	0,148	0,477	0,921	1,628	3,108	49,37	1,913
Au Gold	[µg/l]	152	42	206	65	<NG	<NG	<NG	<BG	0,039	0,076	0,961	0,038
B Bor	[µg/l]	181	19	240	43	<NG	<NG	3,258	5,680	14,77	29,13	1.282	21,22
Ba Barium	[µg/l]	182	0	241	0	7,22	13,1	19,2	27,8	52,2	118	370	50,2
Be Beryllium	[µg/l]	171	147	227	194	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,440	<NG
Bi Wismut	[µg/l]	178	51	237	82	<NG	<NG	<NG	<BG	0,009	0,023	0,750	0,015
Cd Cadmium	[µg/l]	182	29	241	43	<NG	<NG	<BG	0,011	0,021	0,070	0,473	0,033
Ce Cer	[µg/l]	155	3	212	5	<NG	<BG	<BG	0,008	0,016	0,029	0,500	0,021
Co Cobalt	[µg/l]	182	8	241	14	<NG	<BG	0,019	0,052	0,108	0,283	2,021	0,113
Cr Chrom	[µg/l]	182	21	241	42	<NG	0,365	0,882	1,862	3,046	9,592	1,359	
Cs Cäsium	[µg/l]	181	8	240	8	<NG	0,0010	0,0016	0,0041	0,0126	0,0556	10,70	0,1032
Cu Kupfer	[µg/l]	182	4	241	13	<NG	0,213	0,367	0,715	1,379	3,432	17,02	1,492
Hg Quecksilber	[µg/l]	177	48	236	78	<NG	<NG	<NG	0,030	0,058	0,103	3,790	0,116
La Lanthan	[µg/l]	173	14	232	16	<NG	0,0011	0,0047	0,0130	0,0290	0,0586	1,363	0,0379
Li Lithium	[µg/l]	183	0	242	0	0,191	1,475	2,173	3,456	6,444	9,230	326,9	7,020
Mo Molybdän	[µg/l]	182	28	241	64	<NG	0,060	0,246	0,761	1,291	6,696	0,577	
Ni Nickel	[µg/l]	182	31	241	55	<NG	<NG	0,142	0,676	1,113	2,698	45,71	1,382
Pb Blei	[µg/l]	181	55	240	84	<NG	<NG	<NG	0,040	0,165	0,606	17,61	0,307
Rb Rubidium	[µg/l]	182	0	241	0	0,028	0,192	0,260	0,417	1,096	2,389	35,43	1,235
Sb Antimon	[µg/l]	182	17	241	34	<NG	<BG	0,024	0,047	0,101	0,195	2,036	0,097
Se Selen	[µg/l]	173	70	232	94	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	3,165	15,44	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	177	34	236	65	<NG	<NG	<BG	<BG	0,050	0,093	1,002	0,044
Sr Strontium	[µg/l]	182	0	241	0	11,1	87,9	106	139	215	331	612	176
Th Thorium	[µg/l]	181	36	240	62	<NG	<NG	<BG	<BG	0,021	0,046	0,890	0,026
Ti Titan	[µg/l]	182	1	241	1	<NG	0,527	0,784	1,110	1,840	3,756	24,84	2,387
Tl Thallium	[µg/l]	182	64	241	100	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,010	0,720	0,012
U Uran	[µg/l]	182	4	241	5	<NG	0,1630	0,5925	1,098	1,826	3,000	6,419	1,367
V Vanadium	[µg/l]	182	18	241	34	<NG	<BG	0,109	0,178	0,480	1,067	4,169	0,405
Y Yttrium	[µg/l]	182	7	241	8	<NG	0,0109	0,0190	0,0363	0,0808	0,1772	0,7484	0,0733
Zn Zink	[µg/l]	182	1	241	8	<NG	2,917	4,194	7,348	26,11	225,5	5.337	150,6

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-26: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus der tiefen Vorlandmolasse

6.4 Tiefe Vorlandmolasse												
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	436	0	514	0	7,0	9,7	10,4	11,2	12,4	14,1	32,6
pH-Wert (Gelände)		460	0	548	0	6,50	7,23	7,37	7,56	7,74	7,97	9,20
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	464	0	552	0	4,2	38,7	45,1	51,4	60,0	70,7	742,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	422	0	484	0	<BG	0,66	1,40	2,70	5,74	8,69	12,20
O ₂ -Sättigung	[%]	391	0	431	0	<BG	6,6	13,8	26,0	54,3	85,0	115,0
CO ₂ frei	[mg/l]	421	0	484	0	<BG	2,6	7,0	14,1	22,0	34,3	66,0
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	325	118	405	150	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,37	7,99
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	465	15	554	16	<NG	0,87	1,40	3,97	12,38	29,85	276,50
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	316	276	372	323	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,24
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	462	240	550	280	<NG	<NG	<NG	<NG	7,34	22,91	199,54
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	454	436	541	517	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,65
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	460	16	548	22	<NG	4,19	8,52	12,78	21,04	33,48	129,31
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	342	317	422	392	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,43
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	456	0	539	0	48,8	229,0	268,5	314,1	361,2	411,7	695,0
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	455	0	541	0	1,200	3,203	3,900	5,900	14,48	72,76	368,0
K ⁺ Kalium	[mg/l]	455	0	541	1	0,300	0,497	0,694	0,957	1,500	2,509	58,80
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	458	408	545	491	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	4,90
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	462	0	550	0	0,990	23,30	46,67	59,93	76,25	89,28	174,1
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	462	0	550	1	0,690	10,18	18,42	24,40	28,63	32,97	64,00
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	462	78	550	89	<NG	<NG	0,0170	0,1035	0,3067	0,6188	15,03
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	458	138	544	151	<NG	<NG	<NG	0,01101	0,03330	0,06066	0,7600
Si Silicium	[mg/l]	458	3	542	3	<NG	4,86	5,90	7,02	8,65	12,23	22,66
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	306	176	378	212	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,42	10,01
Gesamtmineralisation	[mg/l]	444	0	546	0	224,4	337,0	397,1	454,6	514,2	602,2	1,344
Gesamthärte	[° dH]	466	0	555	0	0,297	5,96	11,0	14,3	16,8	19,6	31,0
Karbonathärte	[° dH]	456	0	539	0	2,24	10,51	12,32	14,42	16,58	18,90	31,91
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		422	0	493	0	-8,44	-0,55	-0,46	-0,36	-0,23	-0,11	0,57
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	421	0	484	0	<BG	0,06	0,16	0,32	0,50	0,78	1,50
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	456	0	539	0	0,800	3,754	4,400	5,148	5,920	6,747	11,390
Ag Silber	[µg/l]	262	160	304	198	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,042	1,900
Al Aluminium	[µg/l]	301	106	345	131	<NG	<NG	<NG	0,989	3,900	25,00	131,9
As Arsen	[µg/l]	320	4	367	6	<NG	0,067	0,291	0,897	1,827	3,911	74,00
Au Gold	[µg/l]	259	118	300	144	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,041	0,185
B Bor	[µg/l]	311	44	354	66	<NG	<NG	<BG	5,645	19,66	56,53	2,900
Ba Barium	[µg/l]	311	1	355	1	<NG	11,6	22,9	84,5	129	181	390
Be Beryllium	[µg/l]	287	241	330	275	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,151
Bi Wismut	[µg/l]	299	88	342	111	<NG	<NG	<BG	0,009	0,020	0,020	0,008
Cd Cadmium	[µg/l]	314	71	358	99	<NG	<NG	<BG	<BG	0,020	0,050	0,340
Ce Cer	[µg/l]	260	25	301	28	<NG	<BG	<BG	<BG	0,008	0,024	0,279
Co Cobalt	[µg/l]	310	7	354	16	<NG	<BG	0,011	0,033	0,070	0,140	4,200
Cr Chrom	[µg/l]	314	76	358	104	<NG	<BG	0,279	0,689	1,859	16,54	0,715
Cs Cäsium	[µg/l]	309	3	352	4	<NG	0,0010	0,0020	0,0050	0,0210	0,7005	20,00
Cu Kupfer	[µg/l]	310	5	353	12	<NG	0,231	0,419	0,790	1,948	3,384	32,40
Hg Quecksilber	[µg/l]	303	117	347	149	<NG	<NG	<BG	0,051	0,342	2,950	0,119
La Lanthan	[µg/l]	283	5	326	6	<NG	0,0020	0,0036	0,0056	0,0101	0,0200	0,2070
Li Lithium	[µg/l]	313	0	357	1	0,302	2,949	4,078	8,217	14,27	29,21	240,0
Mo Molybdän	[µg/l]	310	33	353	40	<NG	<BG	0,262	0,733	1,411	3,116	19,94
Ni Nickel	[µg/l]	312	111	357	137	<NG	<NG	<NG	0,310	0,827	1,573	18,60
Pb Blei	[µg/l]	313	65	357	87	<NG	<NG	<BG	0,075	0,181	0,449	5,283
Rb Rubidium	[µg/l]	310	0	353	0	0,143	0,258	0,340	0,528	1,316	3,580	10,18
Sb Antimon	[µg/l]	310	65	353	91	<NG	<NG	<BG	0,020	0,053	0,110	0,633
Se Selen	[µg/l]	292	137	335	168	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	3,267	15,40
Su Zinn	[µg/l]	304	50	347	69	<NG	<NG	<BG	0,037	0,070	0,181	0,770
Sr Strontium	[µg/l]	313	0	357	0	22,7	84,9	121	223	523	764	1,526
Th Thorium	[µg/l]	306	74	349	98	<NG	<NG	<BG	0,022	0,048	0,048	0,019
Ti Titan	[µg/l]	309	6	352	7	<NG	0,221	0,466	0,962	1,680	2,816	25,27
Tl Thallium	[µg/l]	309	166	353	198	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,020	0,500
U Uran	[µg/l]	310	0	353	0	0,0050	0,0372	0,1383	0,6556	1,809	3,087	18,83
V Vanadium	[µg/l]	310	70	353	102	<NG	<NG	<BG	0,080	0,232	0,232	5,077
Y Yttrium	[µg/l]	307	1	350	2	<NG	0,0078	0,0126	0,0200	0,0304	0,0500	0,6700
Zn Zink	[µg/l]	312	1	356	2	<NG	3,237	5,227	11,21	34,77	133,6	2,383

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-27: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus der Faltenmolasse

7.1 Faltenmolasse													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	58	0	66	0	6,2	7,1	7,6	8,1	8,9	9,8	13,3	8,4
pH-Wert (Gelände)		58	0	65	0	7,00	7,18	7,30	7,41	7,58	7,71	8,56	7,45
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	60	0	67	0	18,8	29,5	39,6	49,4	57,4	61,9	207,2	51,4
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	58	0	64	0	0,01	4,00	5,94	7,72	9,38	9,81	10,65	7,33
O ₂ -Sättigung	[%]	55	0	61	0	0,1	39,0	56,9	74,9	86,8	91,5	99,7	69,8
CO ₂ frei	[mg/l]	57	0	64	0	1,0	7,9	13,2	22,0	37,0	54,3	72,2	26,9
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	36	30	37	29	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	3,07	<BG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	60	0	68	1	<NG	0,56	0,91	1,88	3,79	7,47	2.848,50	54,13
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	36	34	37	34	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	37,68	1,13
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	60	2	67	2	<NG	2,00	3,06	5,26	7,47	9,01	11,43	5,37
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	60	59	67	66	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	60	2	68	2	<NG	3,30	4,10	5,48	7,04	9,65	15,00	6,05
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	36	20	38	22	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,33	1,71	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	60	0	68	0	161,0	219,4	260,8	326,3	384,9	410,8	1.127,3	332,6
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	60	0	68	0	0,100	0,412	0,600	1,000	2,733	5,084	2.238	44,59
K ⁺ Kalium	[mg/l]	60	0	68	1	<BG	0,234	0,339	0,522	0,753	1,302	10,40	0,833
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	58	56	65	62	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	4,68	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	60	0	68	0	5,560	53,34	65,88	72,46	87,89	93,89	126,0	73,73
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	60	0	68	0	0,995	9,670	12,56	18,84	23,20	28,72	33,00	18,29
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	57	25	64	32	<NG	<NG	<NG	<BG	0,0400	0,0880	0,3300	0,0363
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	60	49	67	56	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,03000	<BG
Si Silicium	[mg/l]	59	0	67	0	<BG	<BG	1,40	1,57	2,04	3,05	6,68	1,81
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	36	0	36	0	<NG	<NG	<NG	<NG	1,80	3,22	12,58	1,95
Gesamtmineralisation	[mg/l]	60	0	68	0	215,4	296,9	352,3	439,5	514,5	546,5	6.318	538,7
Gesamthärte	[° dH]	60	0	68	0	1,01	9,77	12,1	15,1	17,5	18,9	22,0	14,5
Karbonathärte	[° dH]	60	0	68	0	7,39	10,07	11,97	14,98	17,67	18,86	51,75	15,27
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		58	0	65	0	-0,93	-0,66	-0,55	-0,45	-0,29	-0,13	0,26	-0,41
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	57	0	64	0	<BG	0,18	0,30	0,50	0,84	1,23	1,64	0,61
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	60	0	68	0	2,639	3,595	4,275	5,347	6,309	6,733	18,474	5,451
Ag Silber	[µg/l]	34	32	34	32	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<NG
Al Aluminium	[µg/l]	36	32	37	32	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,604	75,50	3,905
As Arsen	[µg/l]	36	0	36	0	<BG	<BG	0,080	0,125	0,179	0,433	56,52	1,947
Au Gold	[µg/l]	34	22	34	22	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,108	0,161	<BG
B Bor	[µg/l]	36	33	36	33	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,750	49,98
Ba Barium	[µg/l]	36	0	36	0	9,23	16,8	21,2	28,6	54,0	104	538	56,1
Be Beryllium	[µg/l]	36	31	36	31	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	1,110	<BG
Bi Wismut	[µg/l]	36	20	36	20	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,021	0,650	0,023
Cd Cadmium	[µg/l]	36	31	36	31	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,460	0,014
Ce Cer	[µg/l]	34	5	34	5	<NG	<NG	<BG	0,009	0,015	0,024	0,165	0,014
Co Cobalt	[µg/l]	36	2	36	2	<NG	0,036	0,054	0,067	0,080	0,094	0,120	0,065
Cr Chrom	[µg/l]	36	0	36	0	<BG	0,196	0,241	0,316	0,448	0,675	10,23	0,696
Cs Cäsium	[µg/l]	36	20	36	20	<NG	<NG	<NG	<NG	0,0010	0,0025	1,310	0,0379
Cu Kupfer	[µg/l]	36	0	36	0	0,195	0,361	0,492	0,622	1,241	2,287	37,38	1,929
Hg Quecksilber	[µg/l]	36	15	36	15	<NG	<NG	<NG	0,028	0,047	0,083	4,090	0,194
La Lanthan	[µg/l]	36	0	36	0	0,0030	0,0070	0,0105	0,0170	0,0220	0,0365	0,3500	0,0269
Li Lithium	[µg/l]	36	0	36	0	0,415	0,778	0,940	1,209	2,390	5,657	687,8	24,35
Mo Molybdän	[µg/l]	36	22	36	22	<NG	<NG	<NG	<NG	0,090	0,697	2,180	0,185
Ni Nickel	[µg/l]	36	18	36	18	<NG	<NG	<NG	<NG	0,149	0,536	20,12	0,697
Pb Blei	[µg/l]	36	25	36	25	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,148	0,465	0,045
Rb Rubidium	[µg/l]	36	0	36	0	0,239	0,268	0,369	0,509	0,785	1,023	13,63	0,958
Sb Antimon	[µg/l]	36	10	36	10	<NG	<NG	<NG	0,018	0,043	0,087	0,723	0,059
Se Selen	[µg/l]	36	30	36	30	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	4,418	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	36	33	36	33	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,071	<NG
Sr Strontium	[µg/l]	36	0	37	0	99,6	120	138	192	232	396	3.813	311
Th Thorium	[µg/l]	36	24	36	24	<NG	<NG	<NG	<NG	0,023	0,084	1,060	0,048
Ti Titan	[µg/l]	36	1	36	1	<NG	<BG	0,292	0,200	0,292	0,604	47,85	1,758
Tl Thallium	[µg/l]	36	35	36	35	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,580	0,016
U Uran	[µg/l]	36	0	36	0	0,0540	0,3130	0,5345	0,7480	0,9628	1,230	1,471	0,7500
V Vanadium	[µg/l]	36	1	36	1	<NG	0,121	0,222	0,313	0,425	0,899	26,91	1,161
Y Yttrium	[µg/l]	36	1	36	1	<NG	0,0305	0,0428	0,0545	0,0855	0,2115	1,402	0,1199
Zn Zink	[µg/l]	36	0	36	0	1,121	1,302	1,503	2,624	6,721	11,41	277,4	12,31

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-28: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Helvetikum

7.2 Helvetikum													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	33	0	42	0	4,2	5,2	5,9	7,0	8,2	9,0	10,1	7,1
pH-Wert (Gelände)		33	0	42	0	7,19	7,39	7,49	7,59	7,72	7,85	8,04	7,61
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	33	0	42	0	17,6	22,1	24,7	32,2	35,9	47,8	61,8	33,3
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	33	0	42	0	2,05	6,37	8,20	8,91	9,84	10,28	11,80	8,56
O ₂ -Sättigung	[%]	30	0	39	0	17,9	54,1	78,5	84,7	90,2	92,2	98,9	78,7
CO ₂ frei	[mg/l]	33	0	42	0	2,6	3,7	5,3	7,9	12,3	20,1	81,3	12,3
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	28	21	30	23	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	33	1	42	3	<NG	<NG	<NG	<NG	1,00	1,38	18,26	1,52
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	28	28	30	30	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	33	0	42	2	<NG	<NG	<NG	2,25	2,99	3,39	10,50	2,38
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	33	33	42	42	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	33	0	42	0	<NG	2,95	4,72	8,15	10,50	16,78	27,18	8,93
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	28	22	30	24	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	33	0	42	0	101,3	127,0	147,7	189,2	240,4	316,2	430,4	206,2
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	33	1	42	1	<NG	0,143	0,554	1,300	2,900	7,940	11,11	2,472
K ⁺ Kalium	[mg/l]	33	0	42	1	<BG	<BG	0,247	0,362	0,680	0,800	4,089	0,579
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	33	32	42	40	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,52	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	33	0	42	0	35,39	42,21	47,87	61,06	69,14	82,12	106,1	61,74
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	33	0	42	0	0,493	1,058	2,013	3,064	5,273	13,21	18,36	4,859
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	33	17	42	23	<NG	<NG	<NG	<NG	0,0150	0,0703	2,830	0,1107
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	33	25	42	32	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,01181	0,3558	0,02292
Si Silicium	[mg/l]	33	0	42	0	<BG	<BG	<BG	1,32	1,63	1,85	3,25	1,33
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	27	0	29	0	<NG	<NG	<NG	<NG	2,02	2,40	8,49	1,73
Gesamtmineralisation	[mg/l]	33	0	42	0	146,7	184,6	218,9	269,4	322,4	454,1	573,5	290,4
Gesamthärte	[° dH]	33	0	42	0	5,21	6,42	7,55	9,16	10,8	14,4	18,4	9,75
Karbonathärte	[° dH]	33	0	42	0	4,65	5,83	6,78	8,68	11,04	14,52	19,76	9,46
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		33	0	42	0	-0,95	-0,78	-0,72	-0,58	-0,46	-0,33	-0,04	-0,56
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	33	0	42	0	0,06	0,08	0,12	0,18	0,28	0,46	1,85	0,28
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	33	0	42	0	1,660	2,082	2,420	3,100	3,940	5,182	7,053	3,379
Ag Silber	[µg/l]	26	26	28	28	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Al Aluminium	[µg/l]	28	20	30	20	<NG	<NG	<NG	<NG	2,454	9,343	42,44	3,300
As Arsen	[µg/l]	28	3	30	3	<NG	<BG	<BG	<BG	0,088	0,119	0,470	0,070
Au Gold	[µg/l]	26	13	28	15	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,054	0,101	<BG
B Bor	[µg/l]	28	20	30	20	<NG	<NG	<NG	<NG	6,255	17,21	83,70	7,463
Ba Barium	[µg/l]	28	1	30	1	<NG	4,33	6,16	14,6	28,4	58,1	169	26,6
Be Beryllium	[µg/l]	28	17	30	19	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	<BG	<NG
Bi Wismut	[µg/l]	28	4	30	5	<NG	<NG	<BG	<BG	<BG	0,012	0,092	0,008
Cd Cadmium	[µg/l]	28	25	30	26	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,070	<BG
Ce Cer	[µg/l]	26	0	28	0	<BG	0,010	0,012	0,018	0,023	0,036	0,075	0,021
Co Cobalt	[µg/l]	28	2	30	2	<NG	0,038	0,054	0,066	0,094	0,107	0,134	0,070
Cr Chrom	[µg/l]	28	1	30	1	<NG	<BG	0,228	0,264	0,321	0,363	1,580	0,329
Cs Cäsium	[µg/l]	28	9	30	9	<NG	<NG	<NG	0,0010	0,0020	0,0046	0,0240	0,0025
Cu Kupfer	[µg/l]	28	0	30	0	0,194	0,240	0,278	0,384	0,483	0,961	1,277	0,468
Hg Quecksilber	[µg/l]	28	13	30	15	<NG	<NG	<NG	<BG	0,038	0,089	0,270	0,034
La Lanthan	[µg/l]	28	2	30	2	<NG	0,0047	0,0090	0,0150	0,0220	0,0283	0,0430	0,0163
Li Lithium	[µg/l]	28	0	30	0	0,165	0,347	0,945	1,724	2,809	5,052	6,800	2,286
Mo Molybdän	[µg/l]	28	24	30	26	<NG	<NG	<NG	<NG	0,094	0,320	<BG	<BG
Ni Nickel	[µg/l]	28	6	30	6	<NG	<NG	<BG	0,175	0,294	0,471	0,642	0,198
Pb Blei	[µg/l]	28	24	30	24	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,073	<NG
Rb Rubidium	[µg/l]	28	0	30	0	0,104	0,205	0,286	0,336	0,472	0,737	1,443	0,417
Sb Antimon	[µg/l]	28	9	30	10	<NG	<NG	<NG	<BG	0,017	0,025	0,048	0,010
Se Selen	[µg/l]	28	15	30	17	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	<BG	<NG
Sn Zinn	[µg/l]	28	27	30	29	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,071	<NG
Sr Strontium	[µg/l]	28	0	30	0	113	135	162	313	467	525	738	321
Th Thorium	[µg/l]	28	10	30	12	<NG	<NG	<NG	<BG	0,028	0,054	0,380	0,029
Ti Titan	[µg/l]	28	0	30	0	<BG	0,273	0,353	0,563	1,254	3,940	0,681	<BG
Tl Thallium	[µg/l]	28	27	30	29	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,070	<BG
U Uran	[µg/l]	28	1	30	1	<NG	0,1029	0,1475	0,1895	0,2703	0,4641	0,5050	0,2295
V Vanadium	[µg/l]	28	0	30	0	<BG	0,075	0,093	0,123	0,154	0,253	0,812	0,156
Y Yttrium	[µg/l]	28	2	30	2	<NG	0,0278	0,0345	0,0460	0,0568	0,0947	0,3530	0,0600
Zn Zink	[µg/l]	28	0	30	0	0,803	1,274	1,556	2,707	6,427	13,83	49,24	6,590

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-29: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Flysch

7.3 Flysch													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	61	0	66	0	4,3	5,6	6,7	7,1	7,4	9,5	12,8	7,2
pH-Wert (Gelände)		62	0	67	0	7,29	7,40	7,57	7,71	7,81	8,00	9,30	7,74
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	62	0	67	0	12,4	22,6	28,9	34,2	37,6	41,8	149,6	35,2
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	60	0	65	0	1,90	8,39	9,38	9,97	10,53	11,15	12,80	9,78
O ₂ -Sättigung	[%]	50	0	55	0	19,2	80,1	85,7	90,1	95,2	99,3	102,3	87,7
CO ₂ frei	[mg/l]	56	0	61	0	<BG	2,6	3,5	5,3	8,2	12,3	49,3	7,3
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	47	41	47	41	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,52	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	64	1	69	1	<NG	<NG	<NG	0,80	1,05	2,00	32,26	1,45
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	47	47	47	47	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	64	2	69	2	<NG	1,42	2,09	3,67	5,28	6,61	20,66	4,17
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	63	62	68	67	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	4,00	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	63	1	68	1	<NG	4,76	8,44	10,07	12,69	15,83	102,90	12,11
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	49	48	49	48	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	62	0	67	0	56,3	123,6	160,2	188,5	224,5	260,3	928,0	206,0
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	62	0	67	0	0,200	0,733	1,179	1,752	3,283	4,031	397,5	8,496
K ⁺ Kalium	[mg/l]	62	0	67	1	<BG	0,300	0,400	0,554	0,698	1,054	1,670	0,611
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	56	55	60	59	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	62	0	67	0	3,600	35,09	47,08	58,04	63,28	73,43	114,6	55,70
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	62	0	67	0	0,200	2,400	3,374	5,062	6,469	12,98	22,60	6,343
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	63	45	67	49	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,0440	0,7000	0,0279
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	63	58	68	63	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,02000	<BG
Si Silicium	[mg/l]	63	0	68	0	<BG	1,26	1,69	2,05	2,37	2,55	3,05	2,00
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	47	2	47	2	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	1,74	3,96	<NG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	62	0	67	0	89,36	182,9	237,2	273,7	319,8	369,7	1.471	297,4
Gesamthärte	[° dH]	64	0	69	0	0,549	5,90	8,01	9,05	10,5	12,3	20,5	9,23
Karbonathärte	[° dH]	62	0	67	0	2,58	5,68	7,35	8,65	10,30	11,95	42,60	9,46
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		60	0	65	0	-1,85	-0,79	-0,64	-0,50	-0,36	-0,21	0,68	-0,48
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	56	0	61	0	<BG	0,06	0,08	0,12	0,19	0,28	1,12	0,17
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	62	0	67	0	0,923	2,026	2,625	3,090	3,679	4,265	15,208	3,376
Ag Silber	[µg/l]	39	34	39	34	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,136	<BG
Al Aluminium	[µg/l]	47	35	47	35	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	3,865	18,10	1,416
As Arsen	[µg/l]	47	8	47	8	<NG	<NG	<BG	0,056	0,078	0,129	0,430	0,078
Au Gold	[µg/l]	39	15	39	15	<NG	<NG	<NG	<BG	0,043	0,096	0,126	<BG
B Bor	[µg/l]	47	15	47	15	<NG	<NG	<NG	8,635	22,99	36,67	67,38	15,16
Ba Barium	[µg/l]	47	0	47	0	5,00	13,0	15,7	22,7	33,0	40,0	79,6	26,0
Be Beryllium	[µg/l]	47	46	47	46	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<NG
Bi Wismut	[µg/l]	47	14	47	12	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,015	0,028	<BG
Cd Cadmium	[µg/l]	47	43	47	43	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,140	<BG
Ce Cer	[µg/l]	39	0	39	0	<BG	0,009	0,011	0,011	0,013	0,017	0,027	0,012
Co Cobalt	[µg/l]	47	8	47	8	<NG	<NG	0,018	0,033	0,043	0,058	0,085	0,031
Cr Chrom	[µg/l]	47	3	47	3	<NG	<BG	<BG	0,200	0,311	0,905	2,860	0,349
Cs Cäsium	[µg/l]	47	12	47	12	<NG	<NG	<BG	0,0010	0,0028	0,0050	0,0150	0,0022
Cu Kupfer	[µg/l]	47	1	47	1	<NG	0,176	0,235	0,285	0,401	0,561	0,902	0,340
Hg Quecksilber	[µg/l]	47	33	47	33	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,040	0,130	<BG
La Lanthan	[µg/l]	47	8	47	8	<NG	<NG	0,0025	0,0040	0,0060	0,0096	0,0210	0,0049
Li Lithium	[µg/l]	47	0	47	0	0,690	1,169	2,430	3,367	4,927	6,119	9,608	3,784
Mo Molybdän	[µg/l]	47	31	47	31	<NG	<NG	<NG	<NG	0,083	0,137	0,580	<BG
Ni Nickel	[µg/l]	47	30	47	30	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,159	0,248	<BG
Pb Blei	[µg/l]	47	42	47	42	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,023	<NG
Rb Rubidium	[µg/l]	47	0	47	0	0,170	0,255	0,338	0,430	0,552	0,791	1,243	0,484
Sb Antimon	[µg/l]	47	31	47	31	<NG	<NG	<NG	<NG	0,013	0,026	0,057	0,008
Se Selen	[µg/l]	47	30	47	30	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	<BG	<NG
Sn Zinn	[µg/l]	47	44	47	44	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,280	<BG
Sr Strontium	[µg/l]	47	0	47	0	78,8	148	234	314	564	685	1209	405
Th Thorium	[µg/l]	47	17	47	17	<NG	<NG	<NG	0,013	0,017	0,031	0,162	0,015
Ti Titan	[µg/l]	47	2	47	2	<NG	<BG	0,228	0,331	0,491	3,204	4,570	0,760
Tl Thallium	[µg/l]	47	45	47	45	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<NG
U Uran	[µg/l]	47	6	47	6	<NG	<NG	0,1045	0,1460	0,2265	0,2604	0,4800	0,1603
V Vanadium	[µg/l]	47	2	47	2	<NG	<BG	0,037	0,062	0,098	0,298	0,388	0,096
Y Yttrium	[µg/l]	47	6	47	6	<NG	<NG	0,0260	0,0340	0,0475	0,0548	0,9830	0,0601
Zn Zink	[µg/l]	47	0	47	0	0,509	0,733	0,850	1,273	3,674	6,121	15,86	2,745

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-30: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus den Kalkalpen in vorwiegend kalkiger Fazies

7.4 Kalkalpen in vorwiegend kalkiger Fazies												
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	139	0	144	0	1,3	4,1	5,3	6,3	7,2	10,1	19,2
pH-Wert (Gelände)		138	0	144	0	7,30	7,60	7,78	7,97	8,22	8,45	9,10
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	139	0	146	0	1,3	4,8	17,1	30,4	45,7	201,0	474,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	127	0	128	0	3,90	7,38	8,46	9,70	10,52	11,51	19,80
O ₂ -Sättigung	[%]	122	0	123	0	42,0	70,7	78,3	88,3	95,4	102,7	124,0
CO ₂ frei	[mg/l]	96	0	97	0	<BG	1,8	2,6	5,3	8,8	16,7	28,0
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	120	109	121	109	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,37
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	138	18	145	18	<NG	<NG	<NG	<NG	0,61	1,42	20,28
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	123	114	125	115	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,30
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	138	7	140	7	<NG	<NG	1,26	2,30	3,52	5,31	10,60
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	138	126	139	127	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,97
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	139	25	146	28	<NG	<NG	<NG	2,75	6,83	11,11	37,20
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	124	118	126	119	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	139	0	145	0	46,4	93,7	111,0	152,5	190,8	218,8	314,8
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	139	5	146	5	<NG	<BG	0,084	0,231	0,455	1,100	3,770
K ⁺ Kalium	[mg/l]	139	11	141	11	<NG	<BG	<BG	<BG	0,300	0,401	0,800
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	135	135	136	136	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	139	0	146	0	13,86	25,24	33,83	42,90	50,50	60,52	90,60
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	139	0	146	0	0,340	0,579	1,294	4,796	8,470	14,55	20,99
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	139	71	141	73	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,0200	0,2600
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	137	102	138	103	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,00200	0,3147
Si Silicium	[mg/l]	138	37	140	37	<NG	<NG	<NG	<BG	1,85	6,75	24,83
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	121	20	122	21	<NG	<NG	<NG	<NG	1,99	2,51	5,83
Gesamtmineralisation	[mg/l]	139	0	147	0	68,27	129,6	155,9	211,3	260,8	300,1	427,4
Gesamthärte	[° dH]	139	0	146	0	2,14	4,27	5,22	7,29	9,13	10,6	14,7
Karbonathärte	[° dH]	139	0	145	0	2,13	4,30	5,10	7,00	8,76	10,05	14,45
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		138	0	141	0	-1,31	-0,81	-0,59	-0,47	-0,28	-0,07	0,45
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	96	0	97	0	<BG	<BG	0,06	0,12	0,20	0,38	0,64
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	139	0	145	0	0,760	1,535	1,820	2,500	3,128	3,586	5,160
Ag Silber	[µg/l]	107	69	108	70	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,054	0,302
Al Aluminium	[µg/l]	121	21	122	22	<NG	<NG	1,066	2,592	4,957	10,000	153,9
As Arsen	[µg/l]	121	4	122	4	<NG	<BG	0,095	0,198	0,289	0,723	1,720
Au Gold	[µg/l]	91	59	92	59	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,035	0,102
B Bor	[µg/l]	121	29	122	30	<NG	<NG	<BG	2,315	4,550	9,903	33,46
Ba Barium	[µg/l]	121	3	122	3	<NG	<BG	<BG	2,80	9,02	23,7	73,3
Be Beryllium	[µg/l]	121	77	122	78	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	<BG
Bi Wismut	[µg/l]	121	73	122	73	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,013	0,330
Cd Cadmium	[µg/l]	121	40	122	41	<NG	<NG	<NG	<BG	0,017	0,033	0,103
Ce Cer	[µg/l]	91	29	92	29	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,008	0,049
Co Cobalt	[µg/l]	121	16	122	16	<NG	<NG	0,010	0,020	0,032	0,058	0,176
Cr Chrom	[µg/l]	121	11	122	12	<NG	<BG	0,244	0,414	1,283	6,748	11,71
Cs Cäsium	[µg/l]	121	15	122	15	<NG	<NG	<BG	0,0018	0,0030	0,0062	0,0228
Cu Kupfer	[µg/l]	121	12	122	13	<NG	<BG	0,152	0,310	0,621	1,531	13,62
Hg Quecksilber	[µg/l]	121	29	122	30	<NG	<NG	<BG	0,043	0,110	0,200	0,900
La Lanthan	[µg/l]	121	18	122	18	<NG	<NG	0,0020	0,0057	0,0134	0,0270	0,0590
Li Lithium	[µg/l]	121	13	122	13	<NG	<NG	<BG	0,139	0,547	1,319	3,095
Mo Molybdän	[µg/l]	121	25	122	26	<NG	<NG	<BG	0,088	0,187	0,450	4,600
Ni Nickel	[µg/l]	121	18	122	19	<NG	<NG	0,180	0,334	0,545	0,832	3,122
Pb Blei	[µg/l]	121	55	122	56	<NG	<NG	<NG	0,022	0,125	0,472	10,72
Rb Rubidium	[µg/l]	121	0	122	0	0,031	0,045	0,070	0,146	0,253	0,327	0,771
Sb Antimon	[µg/l]	121	0	122	0	0,022	0,059	0,084	0,134	0,188	0,254	0,540
Se Selen	[µg/l]	121	49	122	50	<NG	<NG	<NG	<BG	1,966	3,563	4,610
Sn Zinn	[µg/l]	121	42	122	42	<NG	<NG	<NG	<BG	0,038	0,073	0,210
Sr Strontium	[µg/l]	121	0	122	0	6,20	12,0	16,0	27,8	103	328	3.400
Th Thorium	[µg/l]	121	51	122	51	<NG	<NG	<NG	<BG	0,010	0,027	0,570
Ti Titan	[µg/l]	121	49	122	49	<NG	<NG	<NG	<BG	0,336	0,876	34,44
Tl Thallium	[µg/l]	121	51	122	52	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,006	0,300
U Uran	[µg/l]	121	0	122	0	0,0175	0,0268	0,0472	0,1115	0,2111	0,4880	1,836
V Vanadium	[µg/l]	121	2	122	2	<NG	<BG	0,083	0,200	0,410	1,973	3,266
Y Yttrium	[µg/l]	121	10	122	10	<NG	0,0010	0,0060	0,0145	0,0310	0,0440	0,6132
Zn Zink	[µg/l]	121	6	122	6	<NG	0,199	0,605	1,805	3,840	13,80	1.118

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-31: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus den Kalkalpen in vorwiegend dolomitischer Fazies

7.5 Kalkalpen in vorwiegend dolomitischer Fazies													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	71	0	79	0	3,8	5,6	6,1	7,2	8,2	9,4	13,2	7,4
pH-Wert (Gelände)		71	0	80	0	7,00	7,44	7,70	7,86	8,06	8,27	8,55	7,85
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	71	0	81	0	2,2	22,3	26,4	31,6	39,8	180,9	327,0	60,4
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	59	0	59	0	5,00	6,98	8,03	9,03	10,60	11,52	16,80	9,25
O ₂ -Sättigung	[%]	54	0	54	0	44,3	65,7	74,4	84,0	95,3	104,0	121,0	84,7
CO ₂ frei	[mg/l]	57	0	57	0	<BG	2,3	4,0	7,0	10,6	16,0	40,0	9,0
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	43	35	43	35	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,80	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	70	3	80	4	<NG	<NG	<NG	0,63	1,40	2,11	27,10	1,45
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	45	43	46	43	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,30	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	70	4	71	4	<NG	<NG	1,85	2,91	4,65	6,68	11,70	3,43
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	67	64	67	64	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	5,20	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	70	8	79	12	<NG	<NG	2,95	5,57	11,72	27,45	69,40	10,86
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	50	48	51	49	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	70	0	80	0	57,4	129,2	163,4	193,1	221,7	244,0	300,8	190,5
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	68	3	78	3	<NG	0,057	0,100	0,236	0,500	1,572	5,800	0,624
K ⁺ Kalium	[mg/l]	69	6	70	6	<NG	<BG	<BG	<BG	0,300	0,445	9,600	0,390
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	69	69	69	69	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	70	0	80	0	13,50	28,05	36,09	40,53	46,90	56,42	67,76	41,21
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	70	0	80	0	1,046	7,296	11,14	17,34	20,19	23,10	33,80	15,99
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	69	30	70	31	<NG	<NG	<NG	<BG	0,0200	0,0868	0,9000	0,0350
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	67	52	67	52	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,02000	<BG
Si Silicium	[mg/l]	67	26	68	26	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	1,17	27,08	1,11
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	43	9	43	9	<NG	<NG	<NG	<NG	2,07	4,53	6,67	1,66
Gesamtmineralisation	[mg/l]	69	0	79	0	80,67	186,0	219,0	264,2	306,8	343,9	456,1	262,8
Gesamthärte	[° dH]	70	0	80	0	2,59	6,48	7,73	9,41	11,0	13,1	17,2	9,44
Karbonathärte	[° dH]	70	0	80	0	2,63	5,93	7,50	8,86	10,18	11,20	13,81	8,75
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		70	0	77	0	-1,37	-0,78	-0,66	-0,53	-0,36	-0,20	0,16	-0,50
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	57	0	57	0	<BG	0,05	0,09	0,16	0,24	0,36	0,91	0,20
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	70	0	80	0	0,940	2,117	2,678	3,165	3,634	3,999	4,930	3,123
Ag Silber	[µg/l]	32	19	32	19	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,036	0,193	0,018
Al Aluminium	[µg/l]	43	9	43	9	<NG	<NG	<BG	2,100	3,350	6,094	29,53	3,251
As Arsen	[µg/l]	43	4	43	4	<NG	0,080	0,137	0,211	0,333	0,858	1,600	0,351
Au Gold	[µg/l]	24	11	24	11	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	<BG	0,071	<BG
B Bor	[µg/l]	43	12	43	12	<NG	<NG	<NG	2,309	5,062	11,20	21,23	4,100
Ba Barium	[µg/l]	43	1	43	1	<NG	<BG	1,47	2,60	6,22	8,77	17,4	4,19
Be Beryllium	[µg/l]	43	36	43	36	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	<NG
Bi Wismut	[µg/l]	43	26	43	26	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,030	0,390	0,023
Cd Cadmium	[µg/l]	43	22	43	22	<NG	<NG	<NG	<NG	0,013	0,023	0,151	0,013
Ce Cer	[µg/l]	24	7	24	7	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,012	0,015	<BG
Co Cobalt	[µg/l]	43	11	43	11	<NG	<NG	<BG	0,015	0,032	0,070	0,150	0,025
Cr Chrom	[µg/l]	43	6	43	6	<NG	<NG	<BG	0,270	0,557	7,925	12,01	1,521
Cs Cäsium	[µg/l]	43	11	43	11	<NG	<NG	<BG	0,0017	0,0042	0,0068	0,0200	0,0030
Cu Kupfer	[µg/l]	43	5	43	5	<NG	<BG	0,198	0,390	0,854	2,107	5,080	0,789
Hg Quecksilber	[µg/l]	43	10	43	10	<NG	<NG	<BG	0,060	0,163	0,632	1,700	0,199
La Lanthan	[µg/l]	43	12	43	12	<NG	<NG	<NG	0,0033	0,0079	0,0133	0,0591	0,0063
Li Lithium	[µg/l]	43	8	43	8	<NG	<NG	0,066	0,149	0,437	0,751	1,887	0,311
Mo Molybdän	[µg/l]	43	10	43	10	<NG	<NG	<BG	0,380	0,789	1,318	2,825	0,566
Ni Nickel	[µg/l]	43	4	43	4	<NG	<BG	0,308	0,410	0,670	1,174	5,300	0,627
Pb Blei	[µg/l]	43	24	43	24	<NG	<NG	<NG	<NG	0,218	0,646	12,37	0,651
Rb Rubidium	[µg/l]	43	0	43	0	0,025	0,072	0,139	0,177	0,226	0,322	0,740	0,195
Sb Antimon	[µg/l]	43	0	43	0	0,035	0,071	0,094	0,157	0,255	0,328	0,550	0,193
Se Selen	[µg/l]	43	26	43	26	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	2,944	27,80	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	43	25	43	25	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,062	0,133	<BG
Sr Strontium	[µg/l]	43	0	43	0	3,00	7,56	12,3	27,5	67,5	589	1,630	168
Th Thorium	[µg/l]	43	18	43	18	<NG	<NG	<NG	<BG	0,014	0,048	0,300	0,020
Ti Titan	[µg/l]	43	17	43	17	<NG	<NG	<NG	<BG	0,298	0,509	3,456	0,305
Tl Thallium	[µg/l]	43	13	43	13	<NG	<NG	<NG	0,005	0,020	0,115	0,340	0,035
U Uran	[µg/l]	43	0	43	0	0,0265	0,0442	0,1184	0,2695	0,7091	1,298	2,312	0,5032
V Vanadium	[µg/l]	43	2	43	2	<NG	0,057	0,160	0,258	0,535	2,227	3,527	0,595
Y Yttrium	[µg/l]	43	11	43	11	<NG	<NG	0,0017	0,0080	0,0164	0,0227	0,0598	0,0113
Zn Zink	[µg/l]	43	3	43	3	<NG	0,216	0,809	2,177	5,725	18,76	40,60	6,276

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 1-32: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus den Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies

7.6 Kalkalpen in vorwiegend salinarer Fazies													
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Anzahl der Proben		Statistik							
		gesamt	Parameter < NG	gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum	arithmet. Mittel
Wassertemperatur	[°C]	63	0	65	0	5,2	6,4	7,3	7,9	9,1	10,1	13,1	8,2
pH-Wert (Gelände)		63	0	65	0	7,00	7,20	7,38	7,60	7,81	7,99	8,18	7,59
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[mS/m]	66	0	68	0	11,2	31,2	40,5	60,3	106,5	174,9	756,0	90,9
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	52	0	52	0	0,01	3,56	6,41	8,57	9,50	10,00	10,90	7,58
O ₂ -Sättigung	[%]	51	0	51	0	0,1	30,3	59,2	81,6	87,3	91,3	96,7	70,1
CO ₂ frei	[mg/l]	59	0	61	0	<BG	3,3	5,3	11,0	21,5	27,5	34,3	13,7
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	35	15	35	15	<NG	<NG	<NG	<NG	0,43	0,68	1,40	<NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	66	4	68	4	<NG	<NG	0,48	1,08	6,10	15,89	108,00	8,13
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	35	35	35	35	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	66	9	68	9	<NG	<NG	1,21	2,91	3,92	4,60	11,04	2,79
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	64	60	66	62	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,91	<NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	66	0	68	0	<NG	4,63	21,31	129,71	341,02	753,25	1.480,00	274,95
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	43	42	45	44	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	66	0	68	0	145,2	162,9	199,2	222,7	242,7	276,4	449,7	226,9
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	64	2	66	2	<NG	0,150	0,400	0,812	3,200	6,621	56,20	4,165
K ⁺ Kalium	[mg/l]	64	1	66	2	<NG	<BG	0,232	0,543	1,270	2,780	36,00	1,925
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	56	55	58	57	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	2,43	<NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	66	0	68	0	32,75	46,21	60,50	97,80	169,2	257,6	550,2	140,3
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	66	0	68	0	2,718	8,776	15,63	24,69	34,97	63,73	95,51	29,07
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	66	32	68	34	<NG	<NG	<NG	<BG	0,0200	0,1025	2,043	0,0545
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	64	52	66	54	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,00200	0,1266	0,00312
Si Silicium	[mg/l]	63	1	65	1	<NG	<BG	<BG	1,12	1,75	2,40	12,31	1,59
org. Kohlenstoff (TOC)	[mg/l]	35	7	35	7	<NG	<NG	<NG	<NG	2,21	2,99	4,24	<BG
Gesamtmineralisation	[mg/l]	64	0	66	0	202,5	262,0	343,4	512,3	763,2	1.296	2.540	686,7
Gesamthärte	[° dH]	66	0	68	0	6,62	9,14	11,9	19,4	31,0	53,2	96,1	26,3
Karbonathärte	[° dH]	66	0	68	0	6,67	7,48	9,14	10,22	11,14	12,69	20,64	10,42
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		63	0	65	0	-0,94	-0,59	-0,53	-0,32	-0,13	0,03	0,66	-0,30
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	59	0	61	0	<BG	0,08	0,12	0,25	0,49	0,62	0,78	0,31
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	66	0	68	0	2,380	2,669	3,265	3,650	3,977	4,530	7,370	3,719
Ag Silber	[µg/l]	28	15	28	15	<NG	<NG	<NG	<NG	0,525	1,883	2,500	0,430
Al Aluminium	[µg/l]	35	16	35	16	<NG	<NG	<NG	1,130	8,012	16,36	951,9	64,86
As Arsen	[µg/l]	35	1	35	1	<NG	0,077	0,136	0,458	0,927	1,305	1,669	0,572
Au Gold	[µg/l]	22	10	22	10	<NG	<NG	<NG	<BG	0,037	0,116	0,603	0,074
B Bor	[µg/l]	35	12	35	12	<NG	<NG	<NG	8,190	27,05	207,1	1.806	127,1
Ba Barium	[µg/l]	35	0	35	0	<BG	5,01	9,43	13,8	27,3	40,4	69,2	20,3
Be Beryllium	[µg/l]	35	31	35	31	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,139	<NG
Bi Wismut	[µg/l]	35	17	35	17	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	0,044	0,440	0,023
Cd Cadmium	[µg/l]	35	18	35	18	<NG	<NG	<NG	<NG	0,018	0,113	0,962	0,074
Ce Cer	[µg/l]	22	2	22	2	<NG	<BG	0,010	0,015	0,018	0,212	1,040	0,090
Co Cobalt	[µg/l]	35	6	35	6	<NG	<NG	0,006	0,042	0,087	0,254	0,528	0,089
Cr Chrom	[µg/l]	35	6	35	6	<NG	<NG	<BG	0,252	0,790	2,445	14,00	0,982
Cs Cäsium	[µg/l]	35	3	35	3	<NG	0,0010	0,0020	0,0045	0,0176	0,0462	0,1300	0,0168
Cu Kupfer	[µg/l]	35	1	35	1	<NG	0,064	0,160	0,405	1,384	5,045	13,60	1,536
Hg Quecksilber	[µg/l]	35	17	35	17	<NG	<NG	<NG	<BG	0,249	0,800	1,300	0,213
La Lanthan	[µg/l]	35	6	35	6	<NG	<NG	0,0017	0,0057	0,0090	0,0301	0,4670	0,0277
Li Lithium	[µg/l]	35	0	35	0	0,078	0,392	0,743	2,244	8,012	17,18	42,88	6,232
Mo Molybdän	[µg/l]	35	6	35	6	<NG	<NG	0,172	1,000	4,087	9,925	22,04	3,398
Ni Nickel	[µg/l]	35	6	35	6	<NG	<NG	0,188	0,700	1,470	3,239	7,057	1,266
Pb Blei	[µg/l]	35	26	35	26	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,320	4,290	0,344
Rb Rubidium	[µg/l]	35	0	35	0	0,099	0,243	0,304	0,525	0,883	1,798	2,792	0,737
Sb Antimon	[µg/l]	35	1	35	1	<NG	0,028	0,041	0,080	0,175	0,362	1,163	0,158
Se Selen	[µg/l]	35	24	35	24	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	<BG	20,00	<BG
Sn Zinn	[µg/l]	35	25	35	25	<NG	<NG	<NG	<NG	<BG	0,263	3,542	0,180
Sr Strontium	[µg/l]	35	0	35	0	10,1	57,1	239	532	4.646	10.250	11.869	2.975
Th Thorium	[µg/l]	35	6	35	6	<NG	<NG	<BG	0,011	0,046	0,107	4,086	0,217
Ti Titan	[µg/l]	35	7	35	7	<NG	<NG	<BG	0,332	2,074	17,45	29,13	3,924
Tl Thallium	[µg/l]	35	13	35	13	<NG	<NG	<NG	0,008	0,029	0,130	0,526	0,049
U Uran	[µg/l]	35	0	35	0	0,0844	0,3320	0,4030	0,7200	1,650	2,560	2,921	1,111
V Vanadium	[µg/l]	35	3	35	3	<NG	<BG	0,091	0,201	0,366	0,572	3,972	0,352
Y Yttrium	[µg/l]	35	6	35	6	<NG	<NG	0,0145	0,0340	0,0576	0,1399	0,2360	0,0510
Zn Zink	[µg/l]	35	0	35	0	0,527	0,795	1,699	8,302	23,26	35,71	77,54	14,97

<NG = kleiner Nachweisgrenze

<BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2: Spannweitendiagramme

Im Folgenden sind die Spannweiten der physikalisch-chemischen Parameter der Grundwasserbeschaffenheit in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten (s. Tab. 3-1 und 3-2) dargestellt. Die den Einheiten zugehörigen hydrogeologischen Großräume werden durch eine unterschiedliche farbige Schattierung kenntlich gemacht.

Bei den Einheiten ist jeweils in Klammern die Anzahl der berücksichtigten Werte angegeben. Die Darstellung der Parameter erfolgt in der Reihenfolge der Auflistung in den Tabellen von Anhang 1.

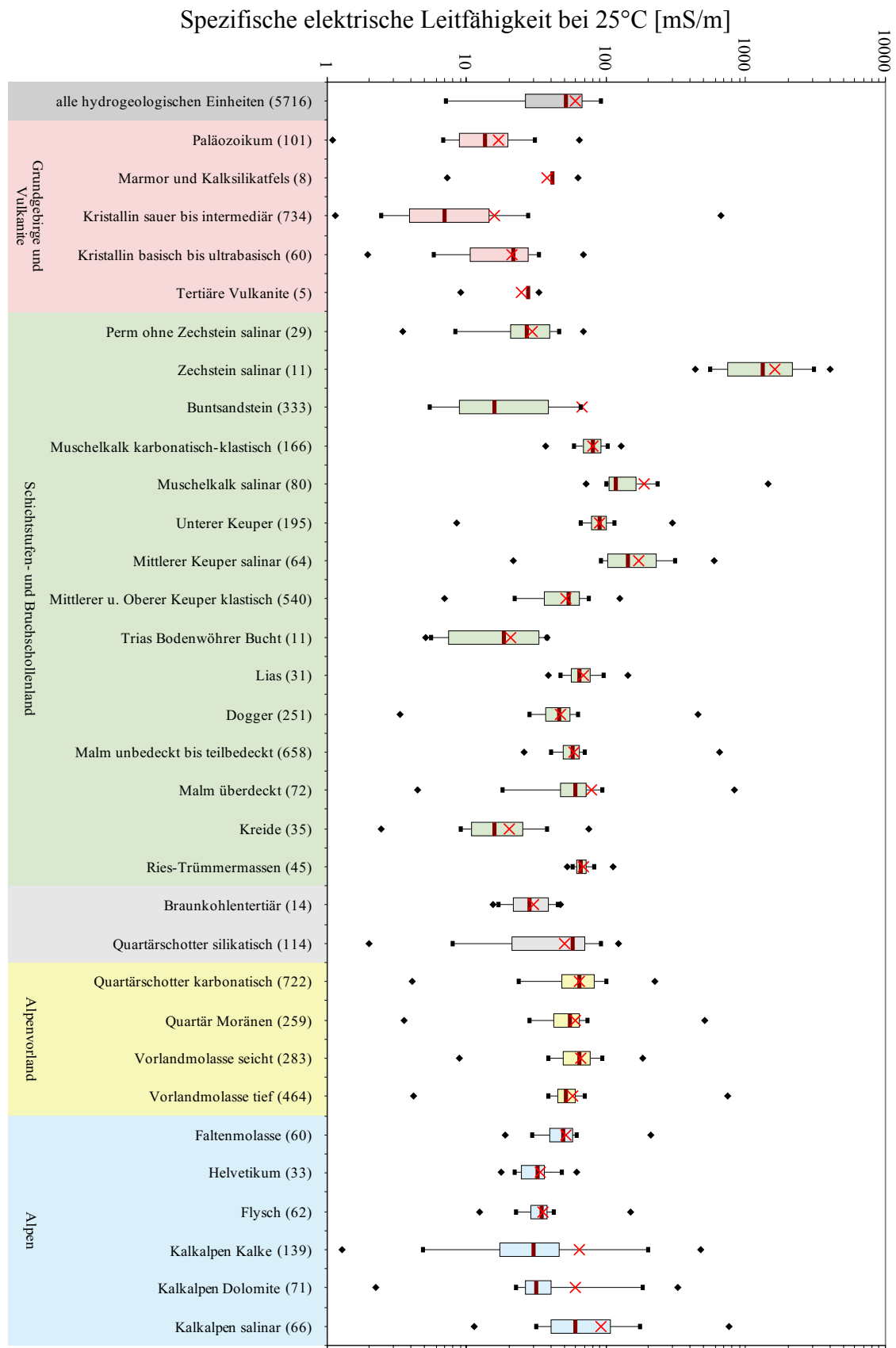
Eine Erläuterung der Spannweitendiagramme findet sich in Abb. 4-1. Im unteren Konzentrationsbereich sind die Diagramme jeweils bis zur Bestimmungs- bzw. Nachweisgrenze (BG bzw. NG) dargestellt.



Anhang 2-1: Spannweitendiagramme der Wassertemperatur in den verschiedenen hydrogeologischen Einheiten



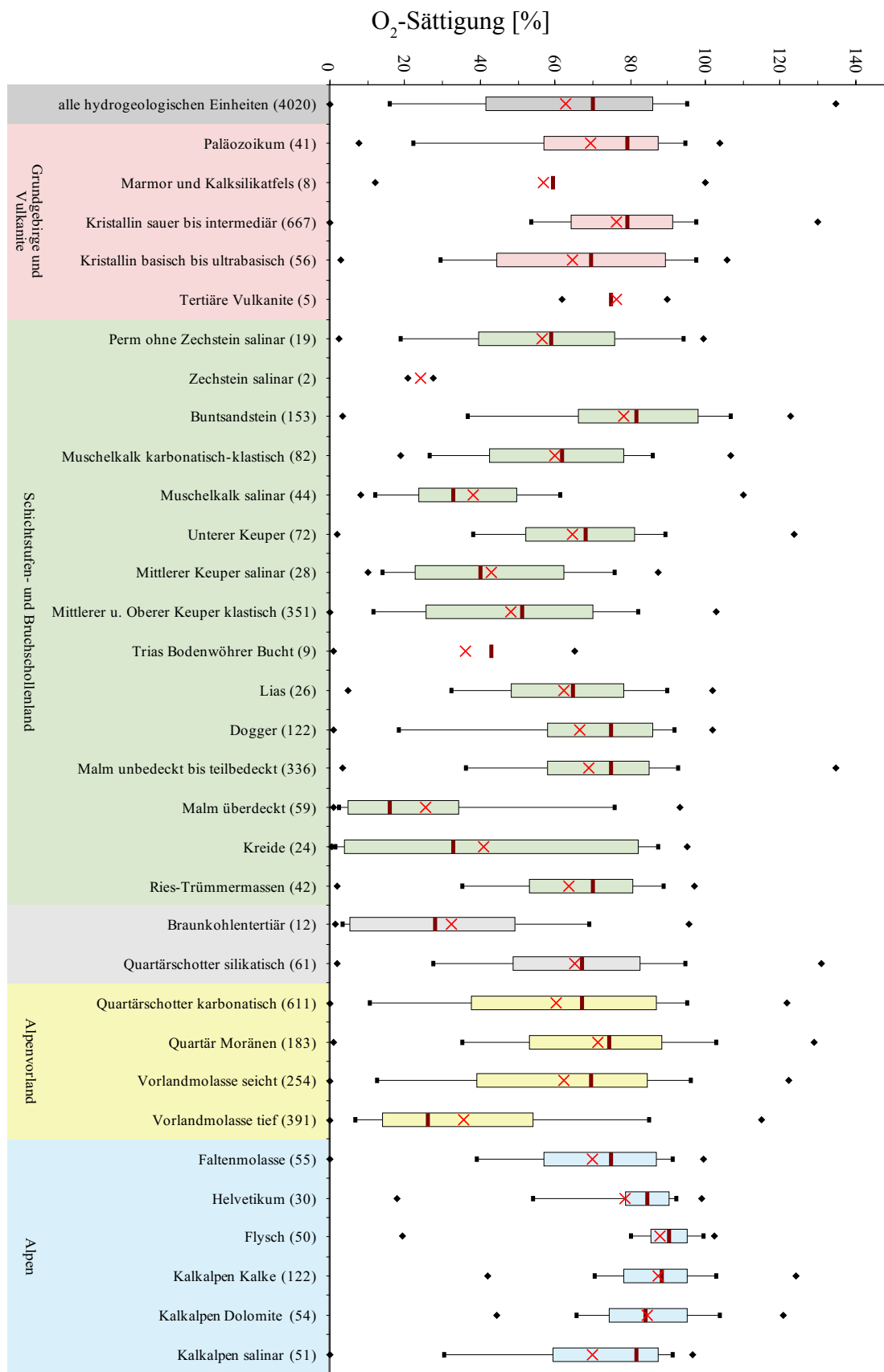
Anhang 2-2: Spannweitendiagramme des pH-Werts in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-3: Spannweitendiagramme der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-4: Spannweitendiagramme des Sauerstoffgehalts in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



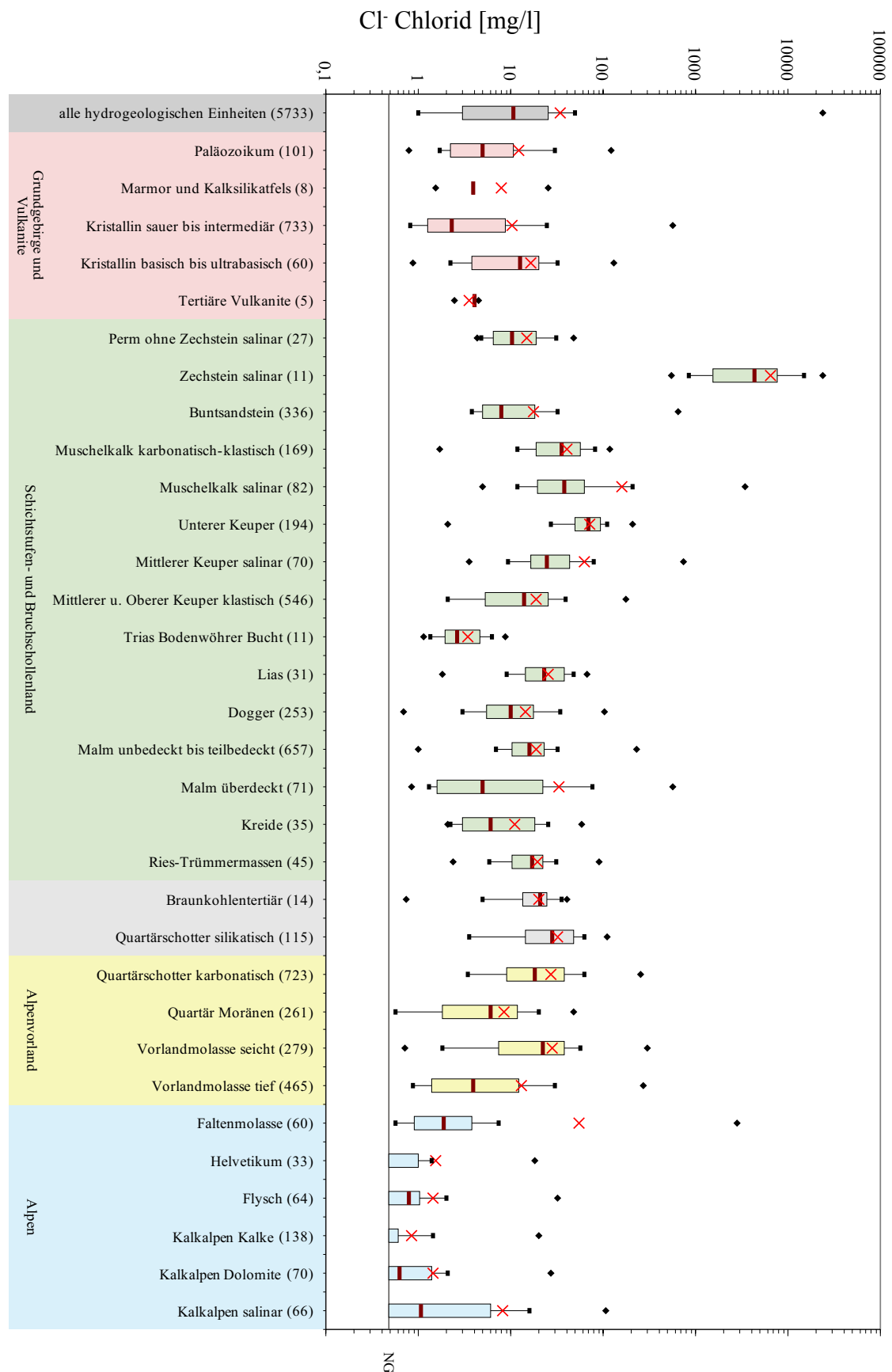
Anhang 2-5: Spannweitendiagramme der Sauerstoffsättigung in den verschiedenen hydrogeologischen Einheiten



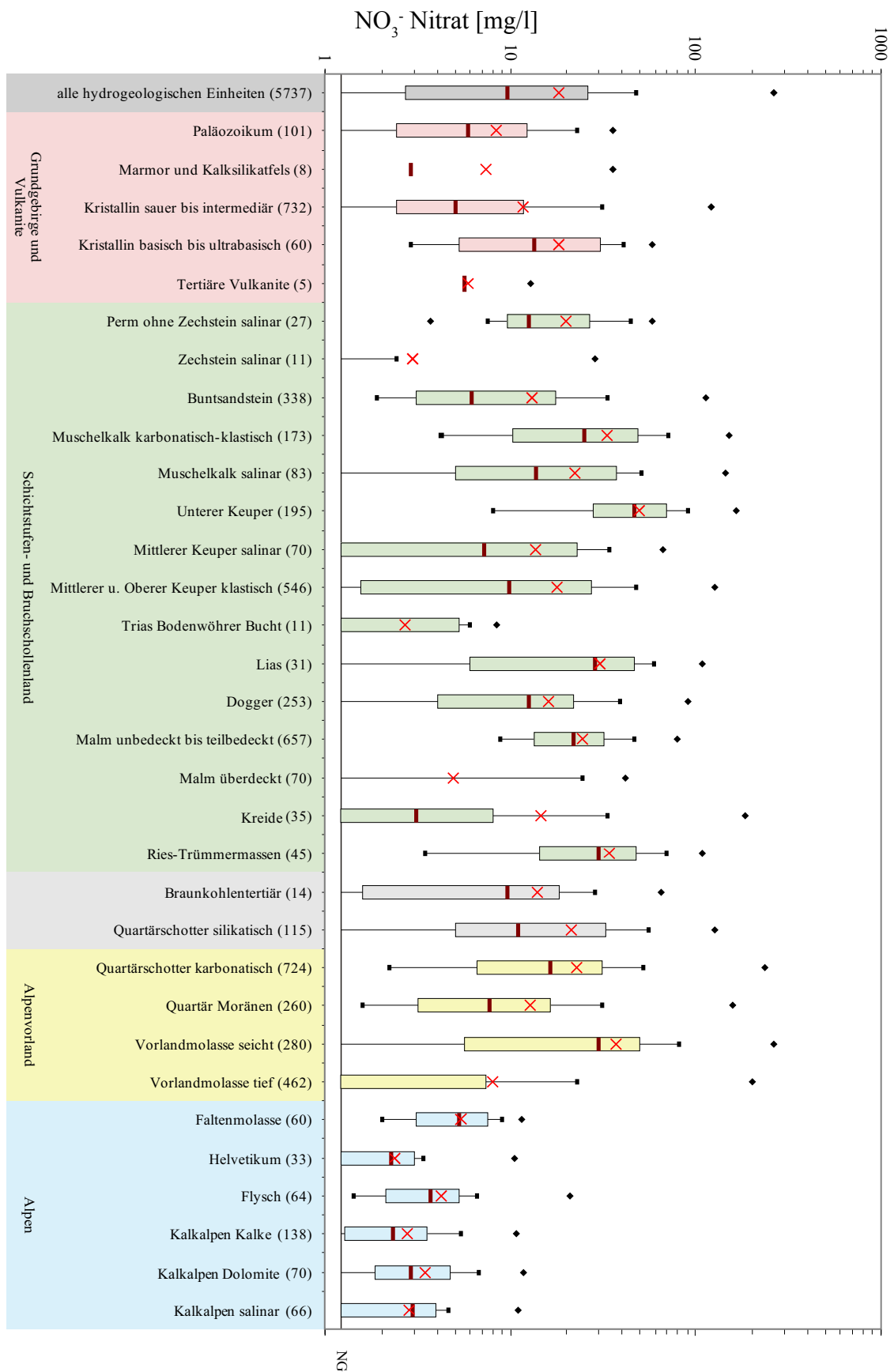
Anhang 2-6: Spannweitendiagramme der freien Kohlensäure in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-7: Spannweitendiagramme der Fluoridkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-8: Spannweitendiagramme der Chloridkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



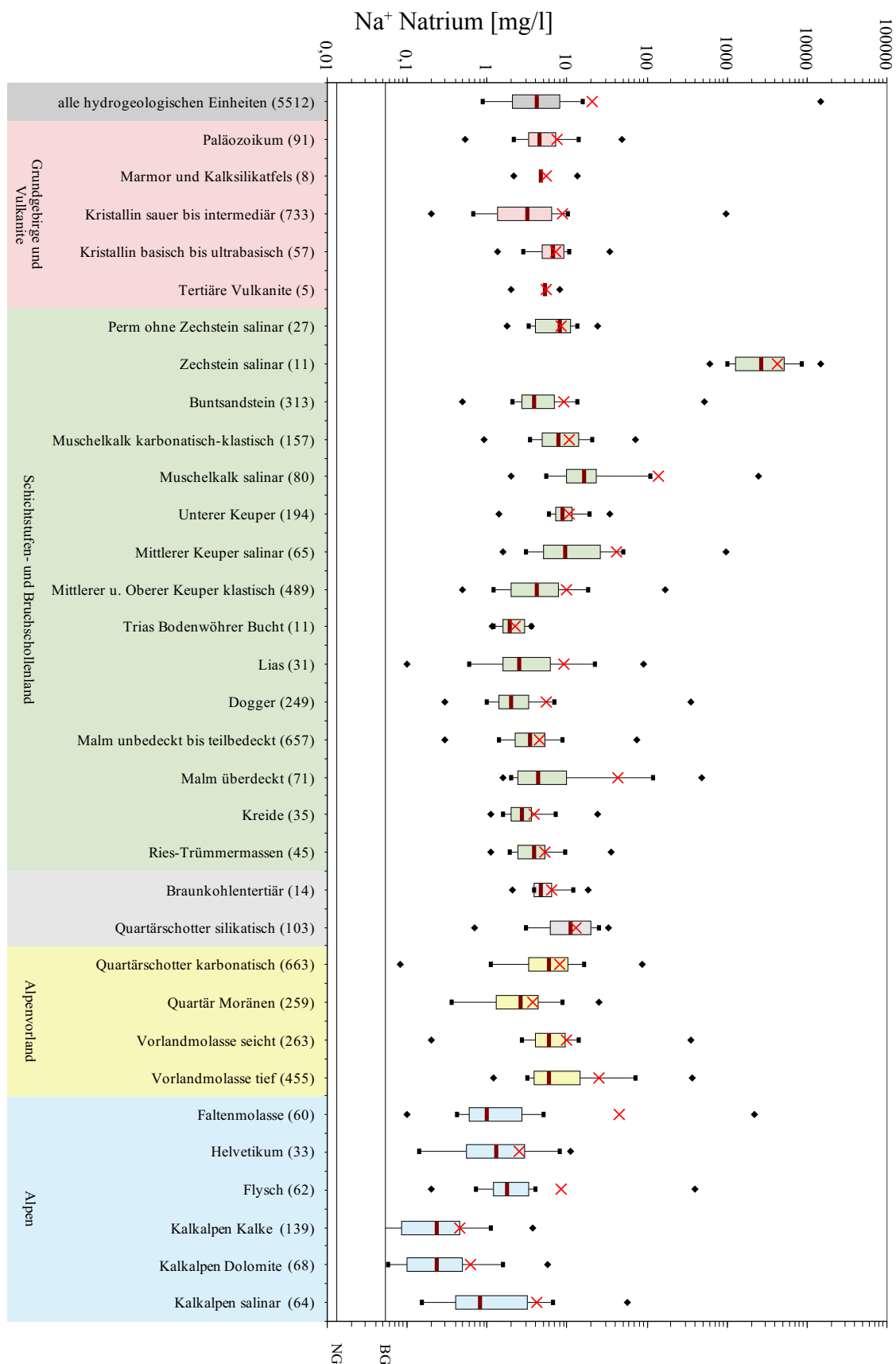
Anhang 2-9: Spannweitendiagramme der Nitratkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-10: Spannweitendiagramme der Sulfatkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-11: Spannweitendiagramme der Hydrogenkarbonatkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-12: Spannweitendiagramme der Natriumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-13: Spannweitendiagramme der Kaliumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-14: Spannweitendiagramme der Calciumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



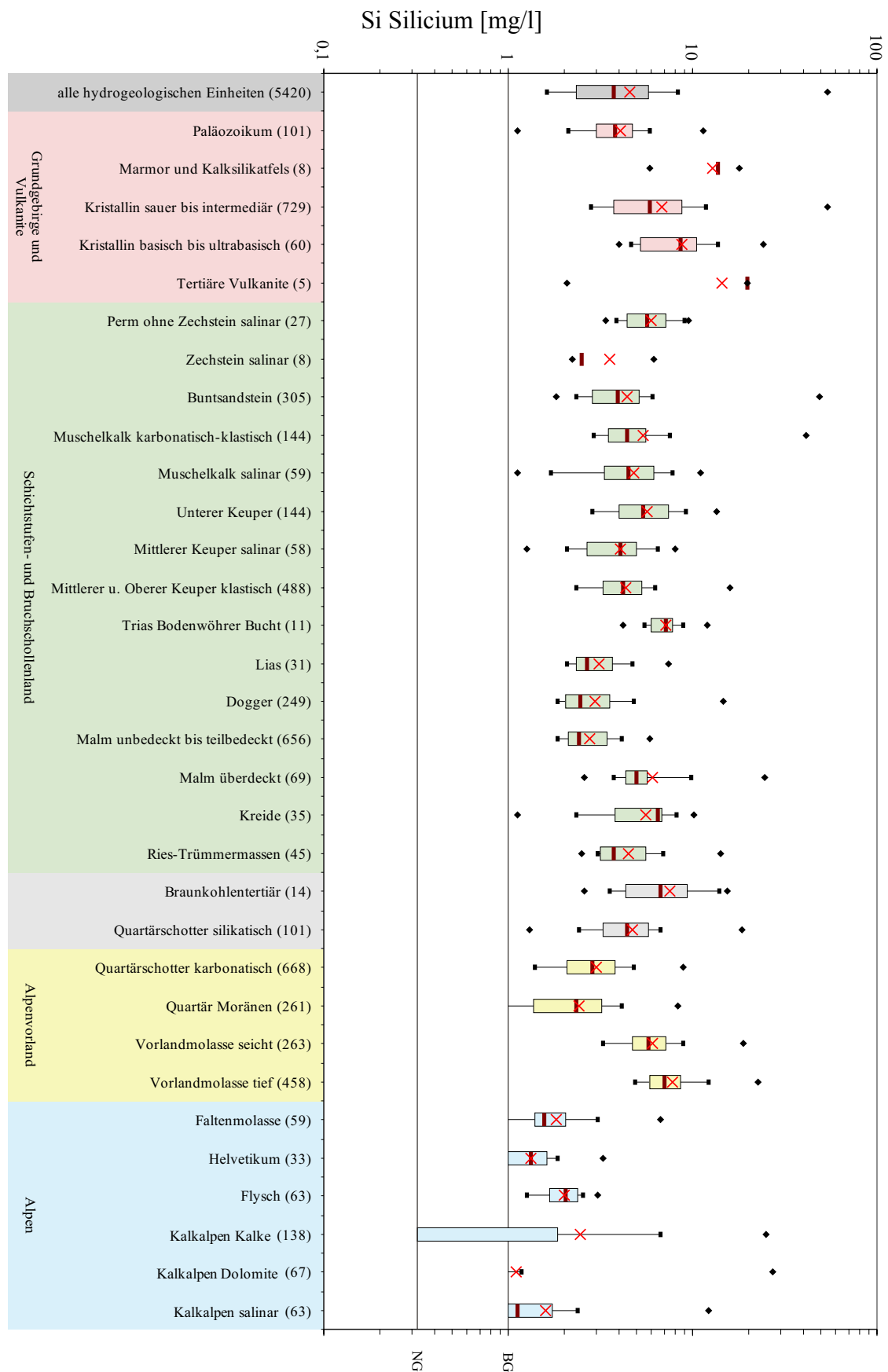
Anhang 2-15: Spannweitendiagramme der Magnesiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-16: Spannweitendiagramme der Eisenkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



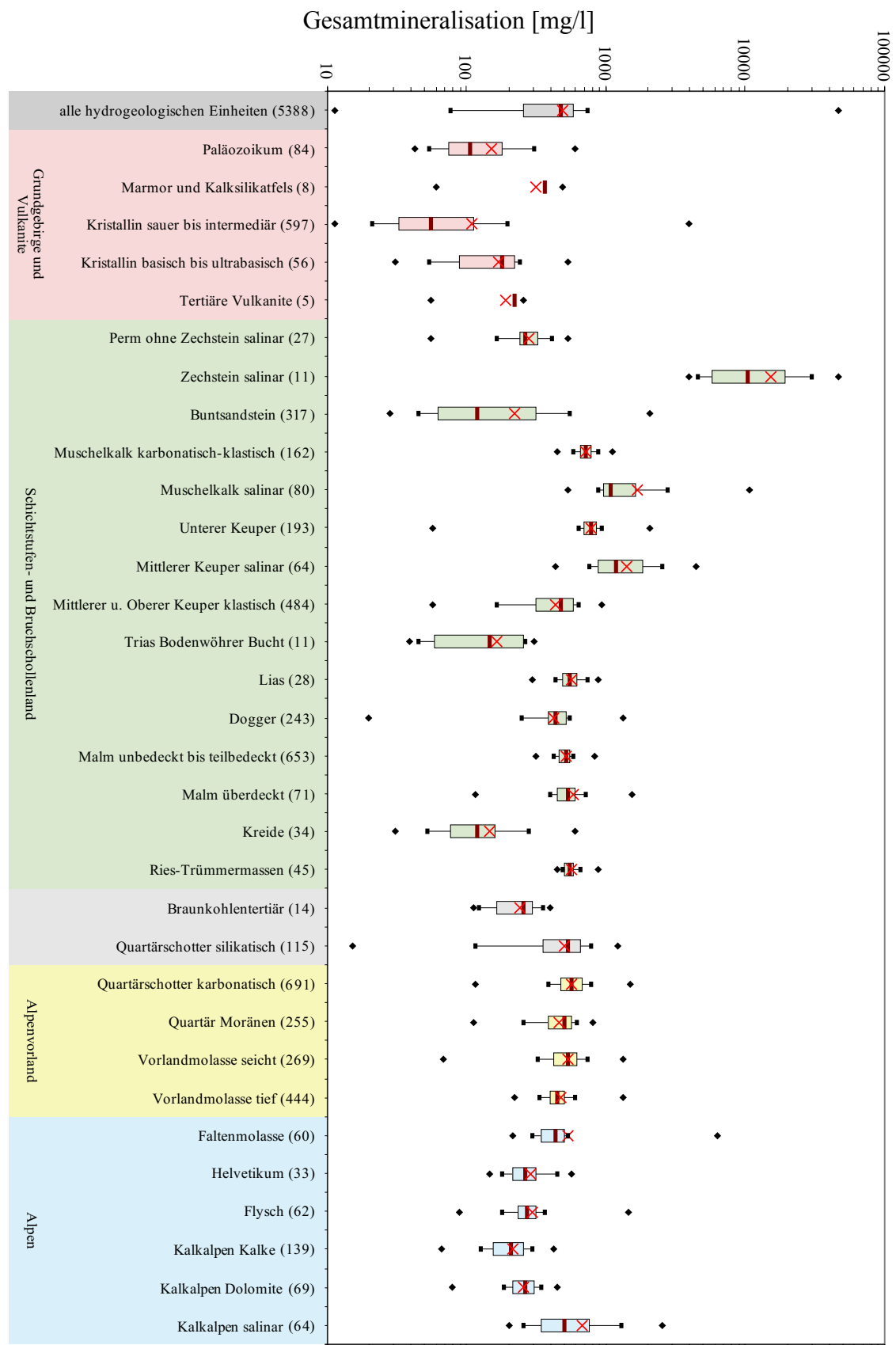
Anhang 2-17: Spannweitendiagramme der Mangankonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-18: Spannweitendiagramme der Siliciumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-19: Spannweitendiagramme der Konzentration an organischem Gesamtkohlenstoff (TOC) in den unterschiedlichen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-20: Spannweitendiagramme der Gesamtmineralisation in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten

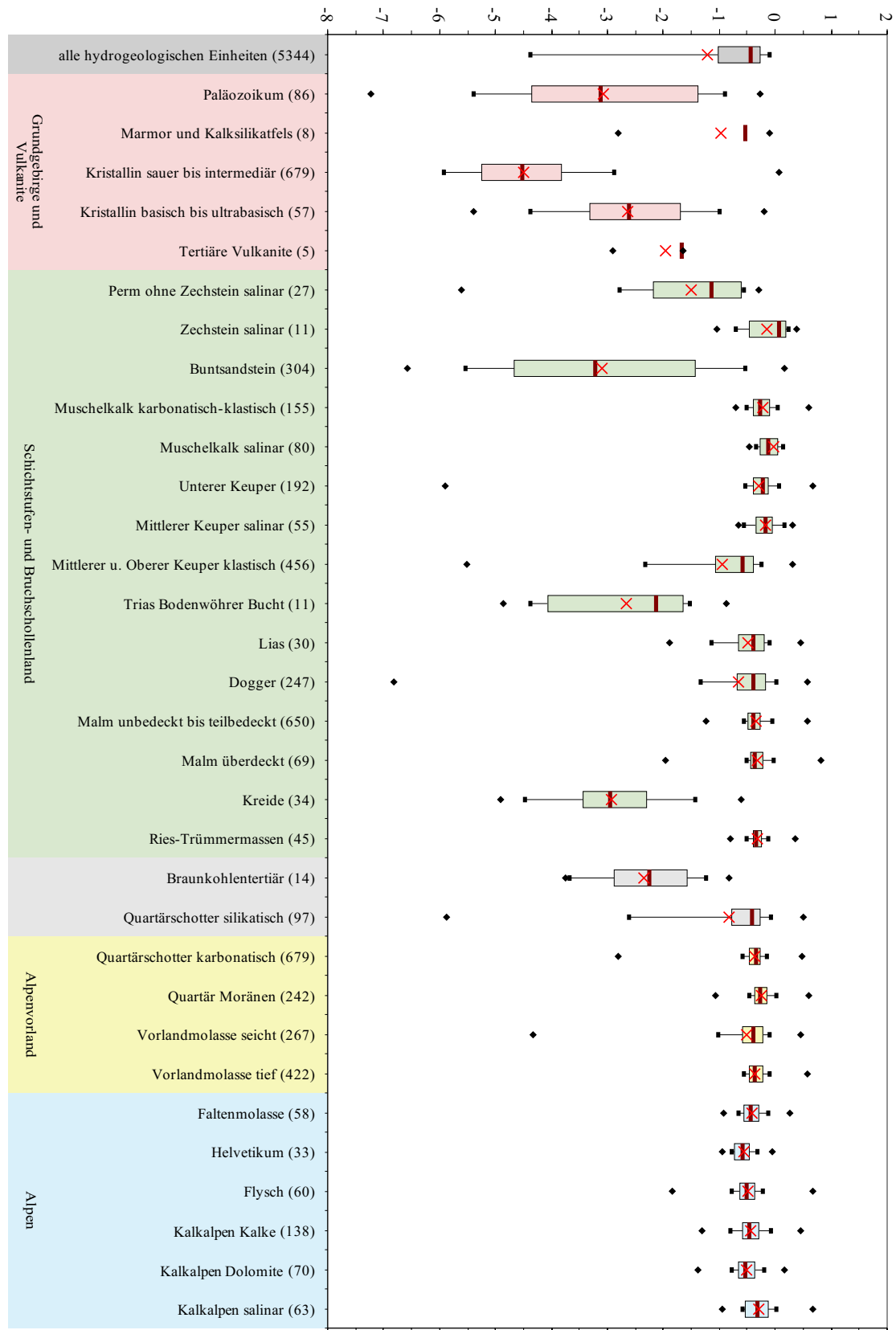


Anhang 2-21: Spannweitendiagramme der Gesamthärte in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-22: Spannweitendiagramme der Karbonathärte in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten

Sättigungsindex (Calciumkarbonat)



Anhang 2-23: Spannweitendiagramme des Sättigungsindex in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten

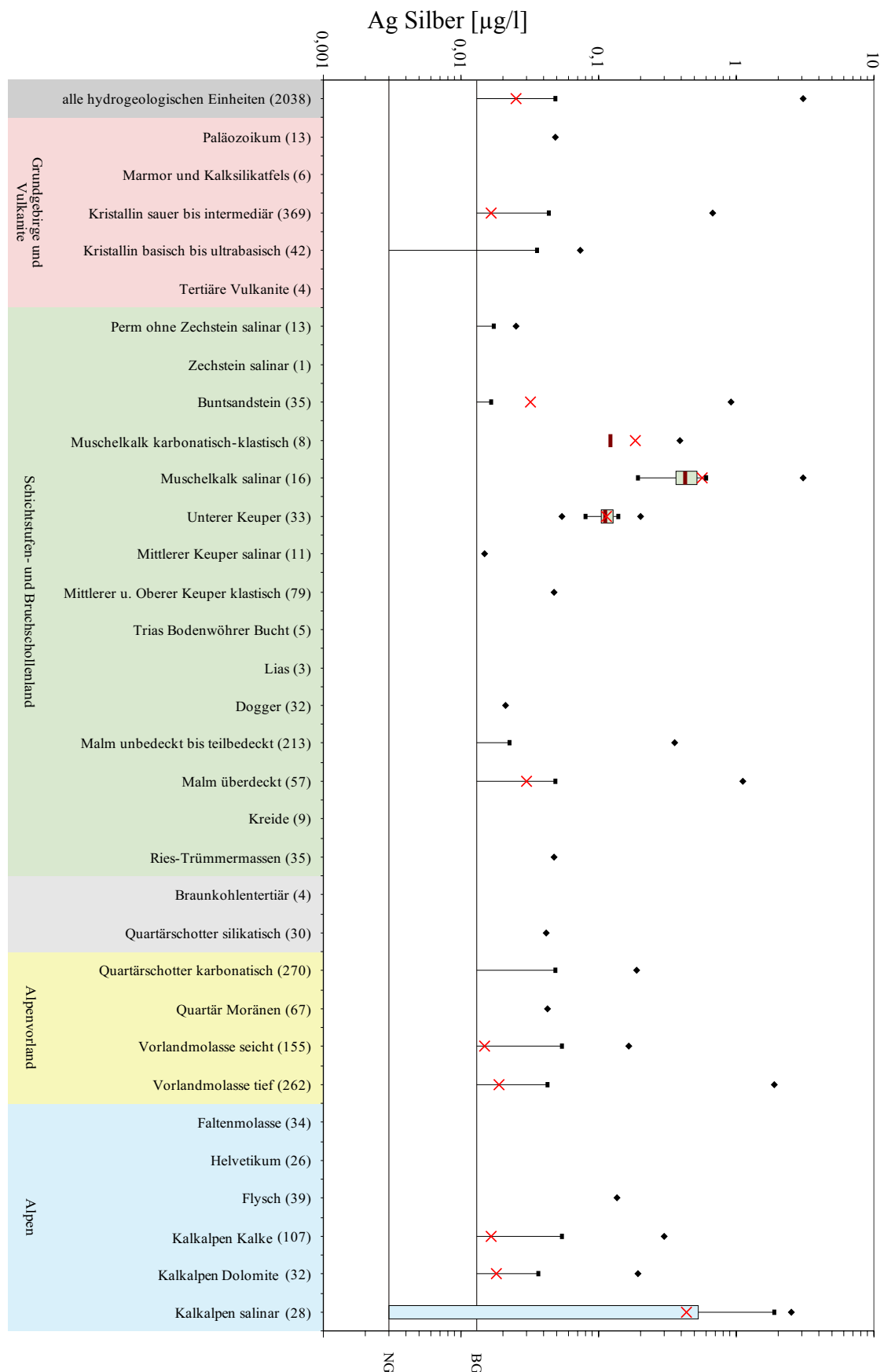


Anhang 2-24: Spannweitendiagramme der Basekapazität bis pH 8,2 in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten

Säurekapazität bis pH 4,3 [mmol/l]



Anhang 2-25: Spannweitendiagramme der Säurekapazität bis pH 4,3 in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



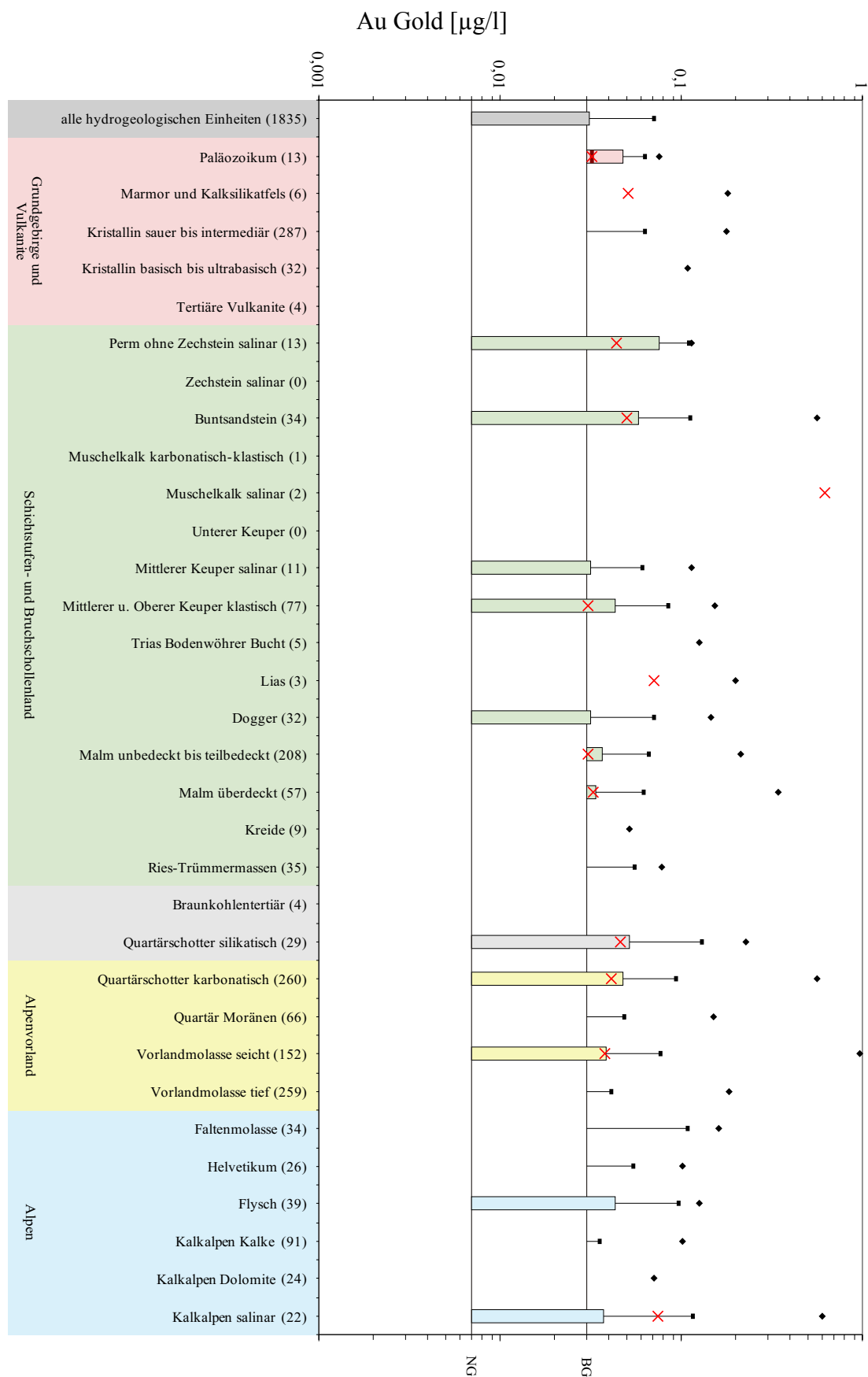
Anhang 2-26: Spannweitendiagramme der Silberkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-27: Spannweitendiagramme der Aluminiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-28: Spannweitendiagramme der Arsenkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



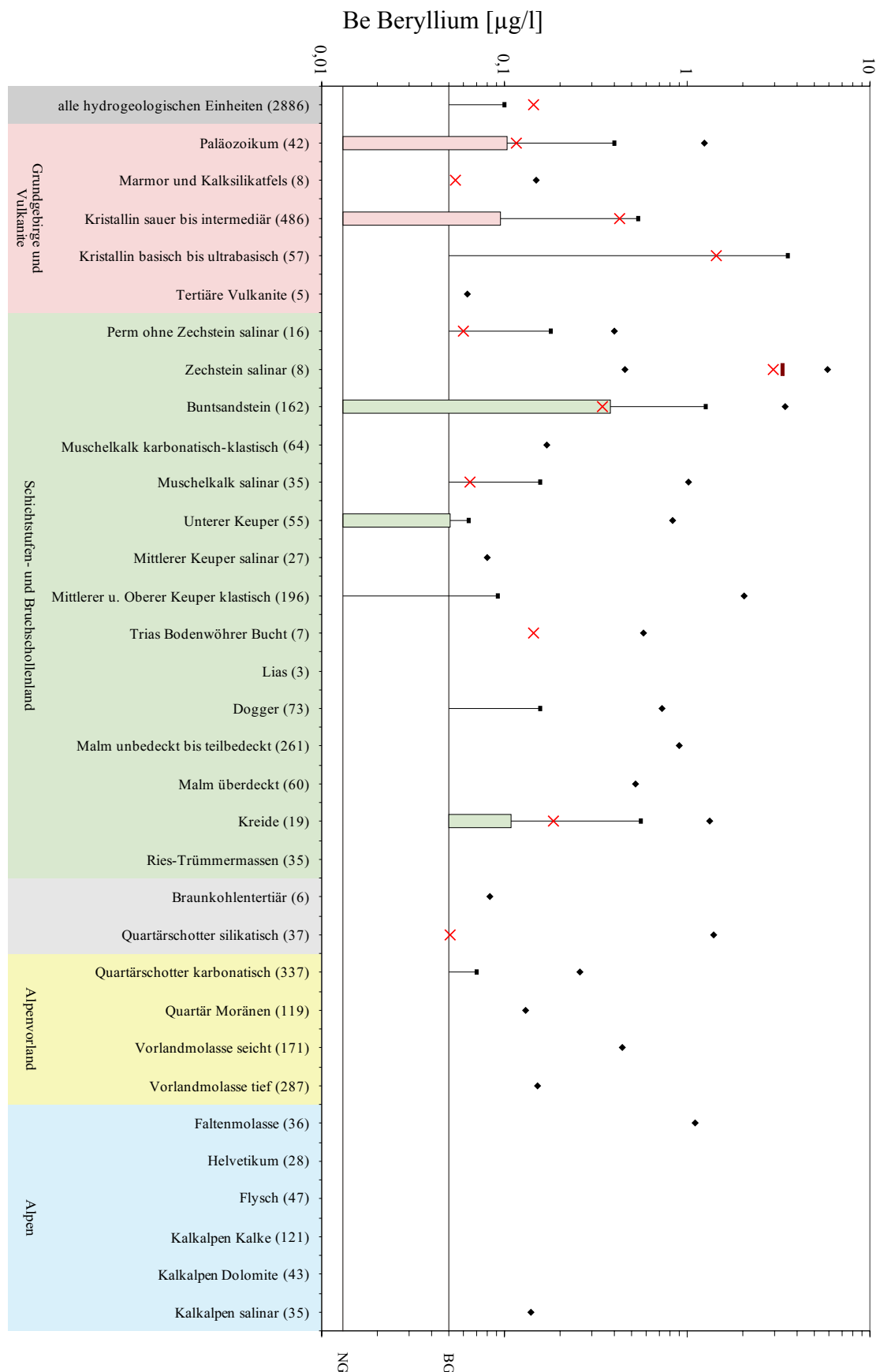
Anhang 2-29: Spannweitendiagramme der Goldkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



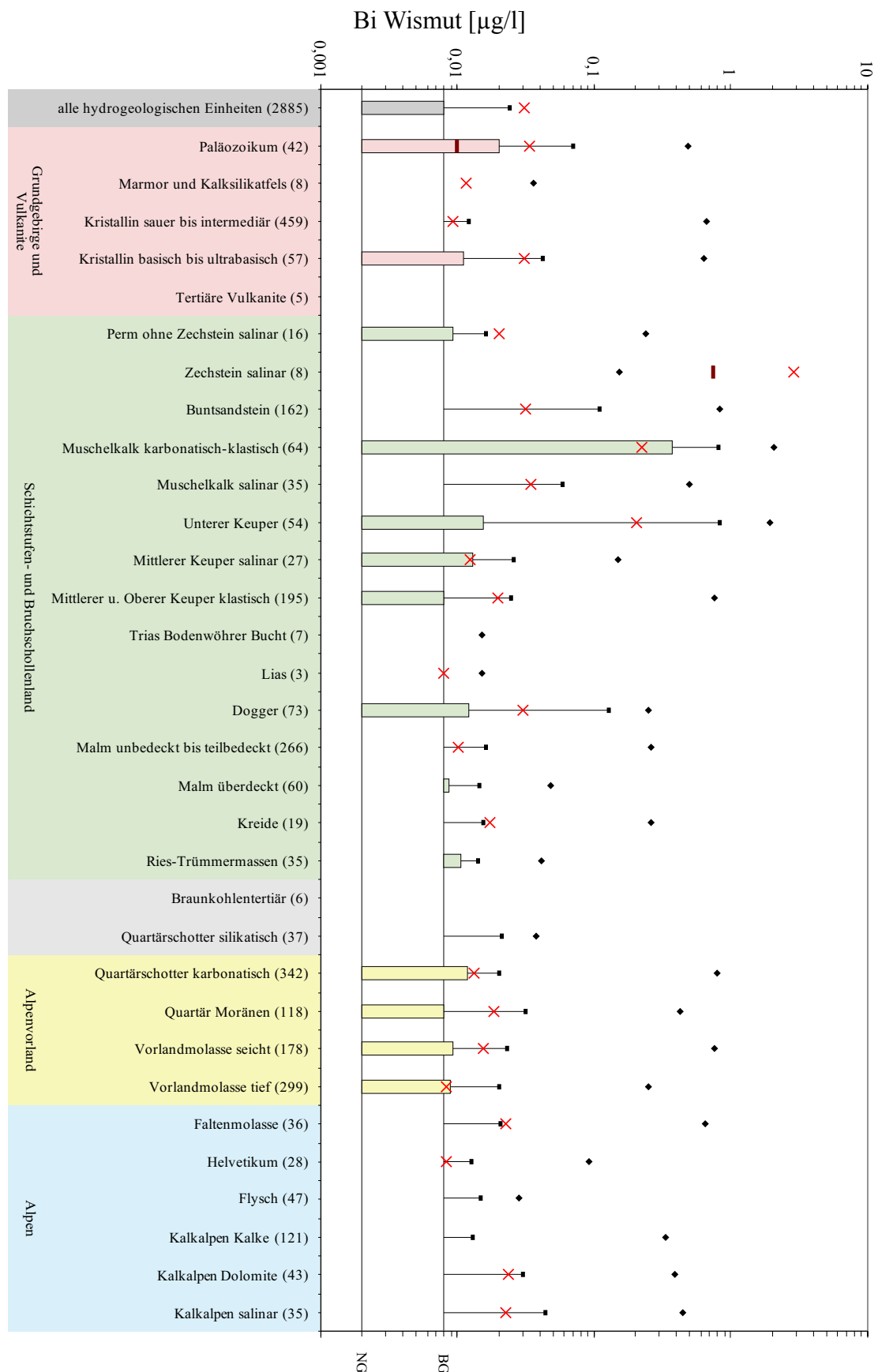
Anhang 2-30: Spannweitendiagramme der Borkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-31: Spannweitendiagramme der Bariumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



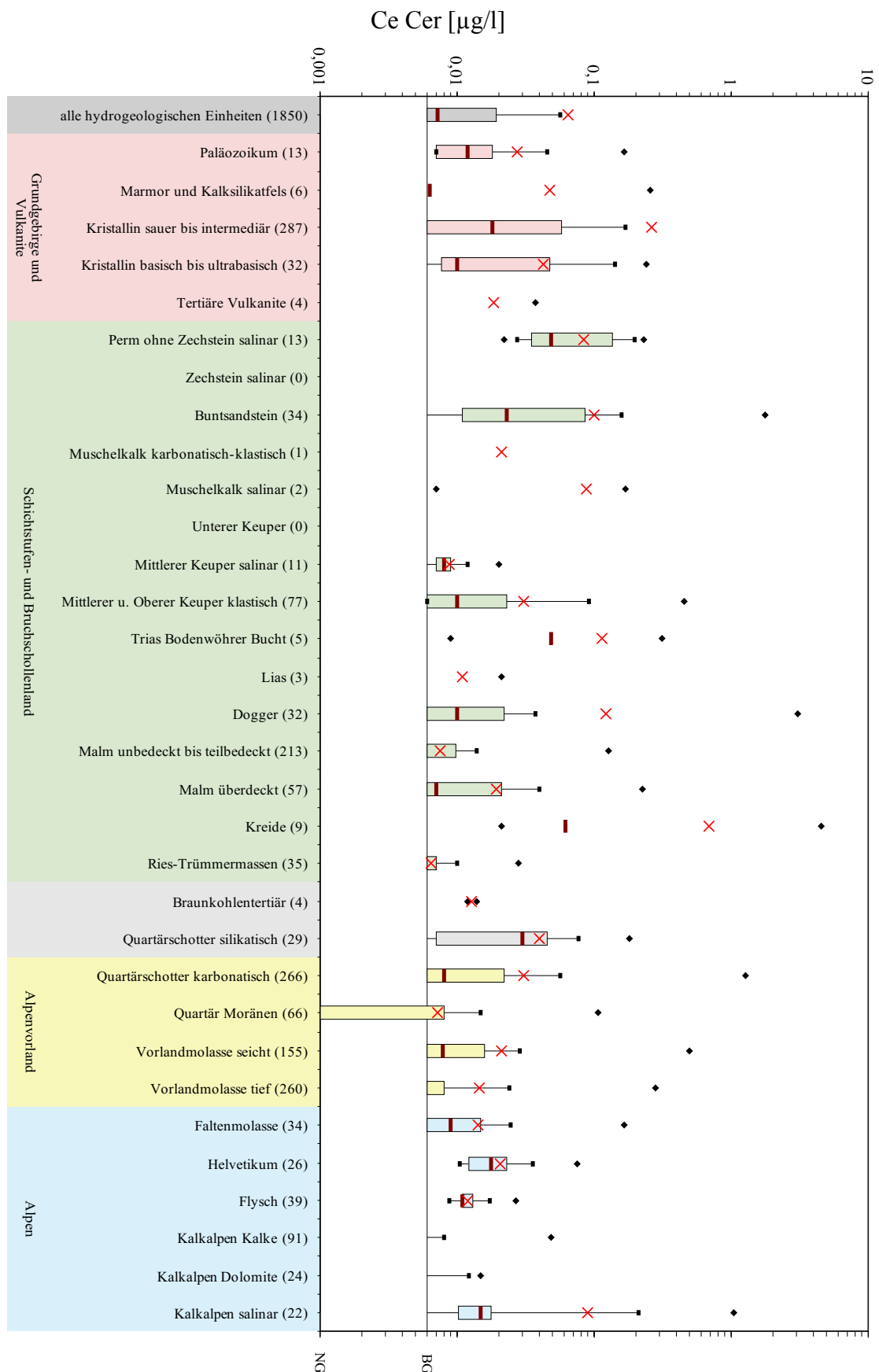
Anhang 2-32: Spannweitendiagramme der Berylliumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-33: Spannweitendiagramme der Wismutkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-34: Spannweitendiagramme der Cadmiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-35: Spannweitendiagramme der Cerkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



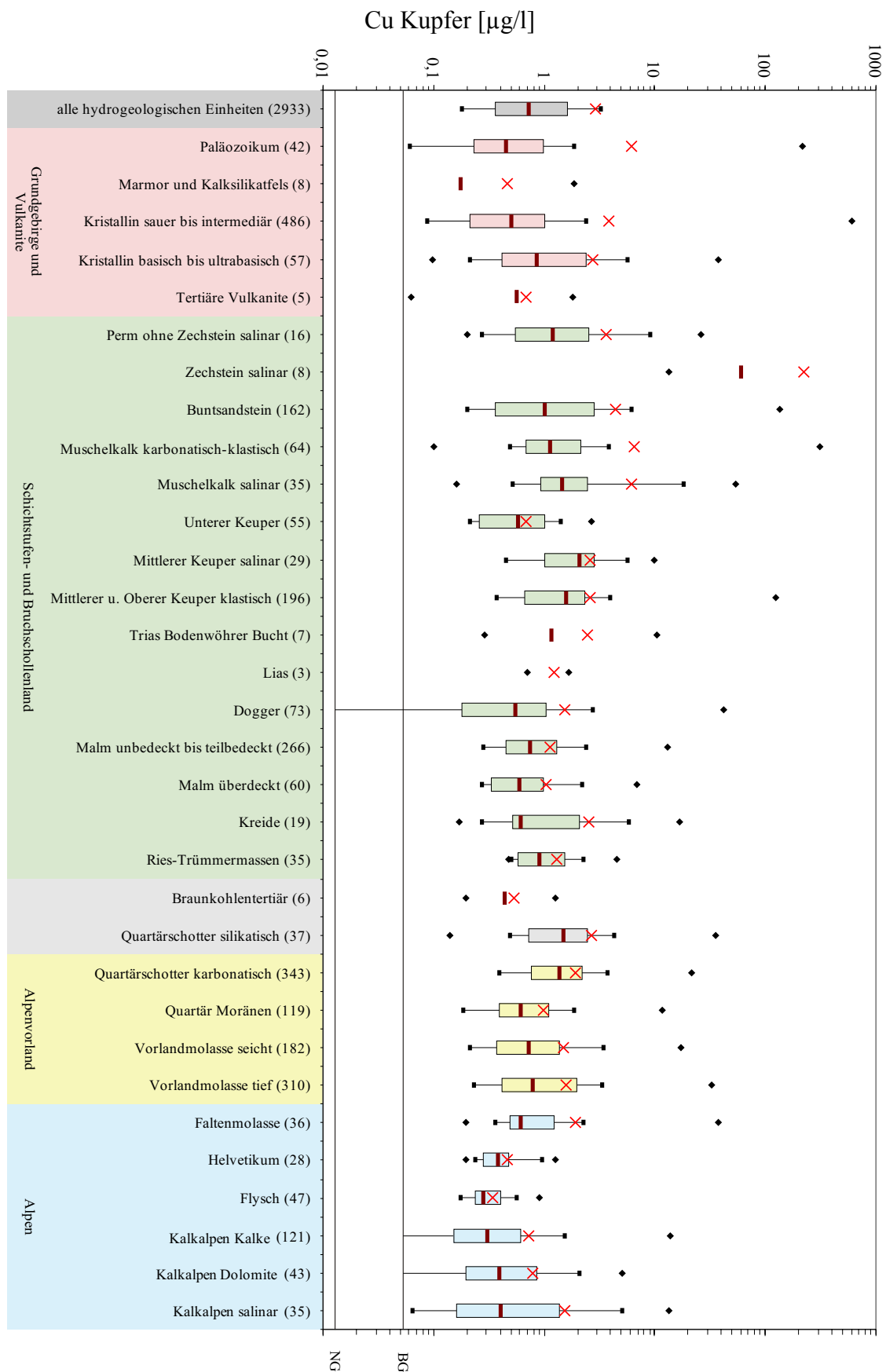
Anhang 2-36: Spannweitendiagramme der Cobaltkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



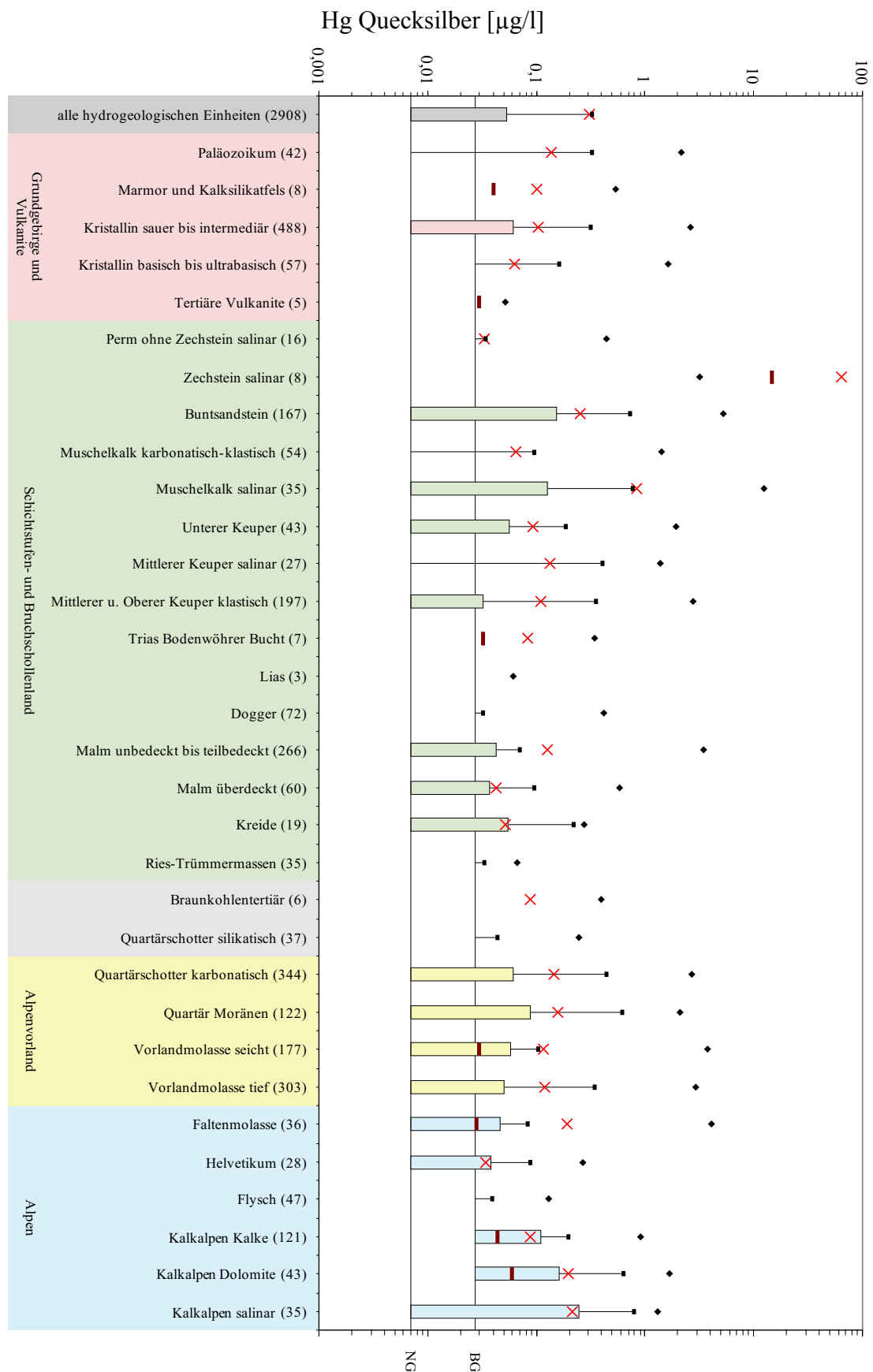
Anhang 2-37: Spannweitendiagramme der Chromkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



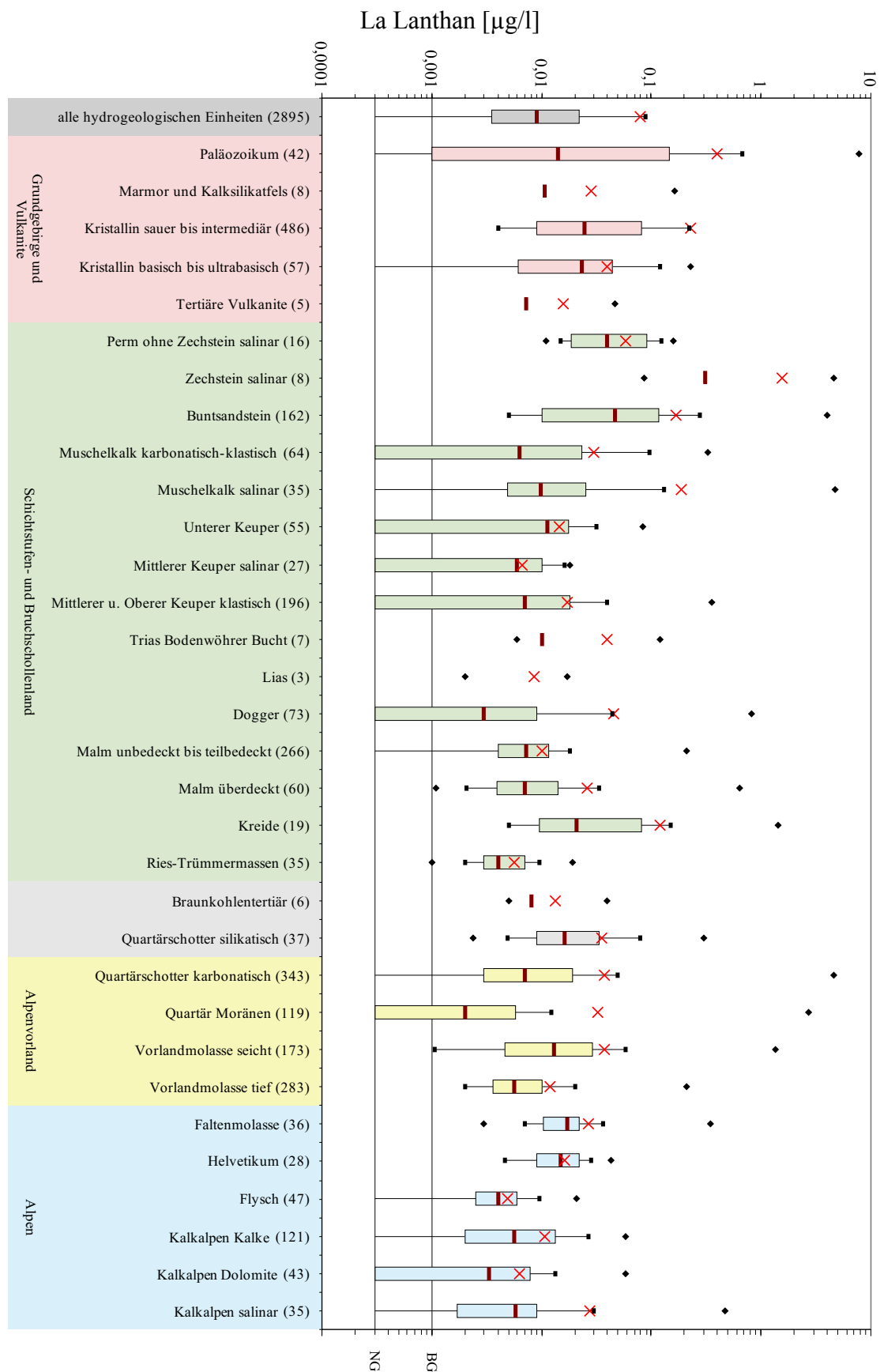
Anhang 2-38: Spannweitendiagramme der Cäsiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-39: Spannweitendiagramme der Kupferkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-40: Spannweitendiagramme der Quecksilberkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-41: Spannweitendiagramme der Lanthankonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-42: Spannweitendiagramme der Lithiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-43: Spannweitendiagramme der Molybdänkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-44: Spannweitendiagramme der Nickelkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-45: Spannweitendiagramme der Bleikonzentration in den unterschiedlichen hydrogeologischen Einheiten



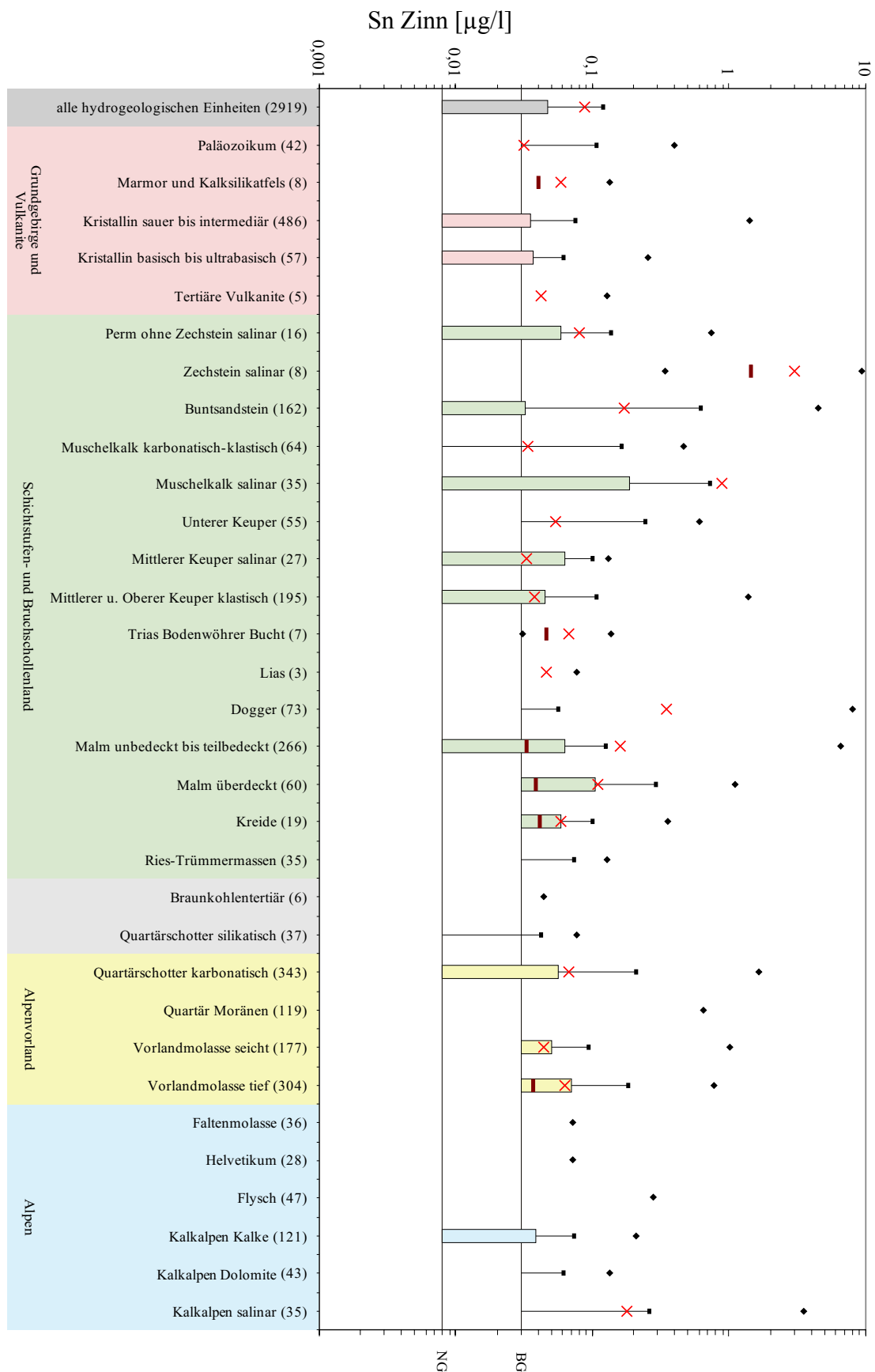
Anhang 2-46: Spannweitendiagramme der Rubidiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



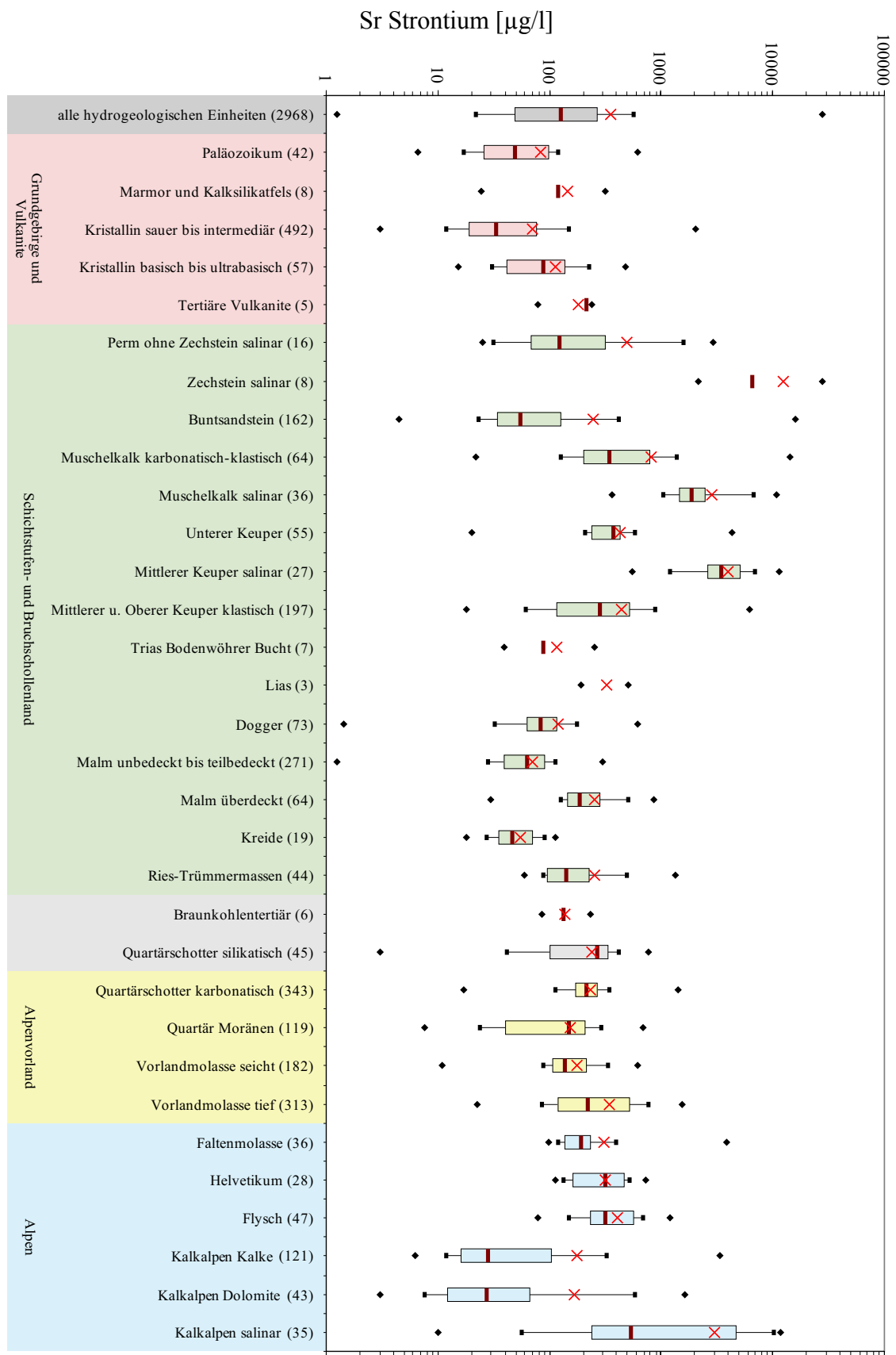
Anhang 2-47: Spannweitendiagramme der Antimonkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



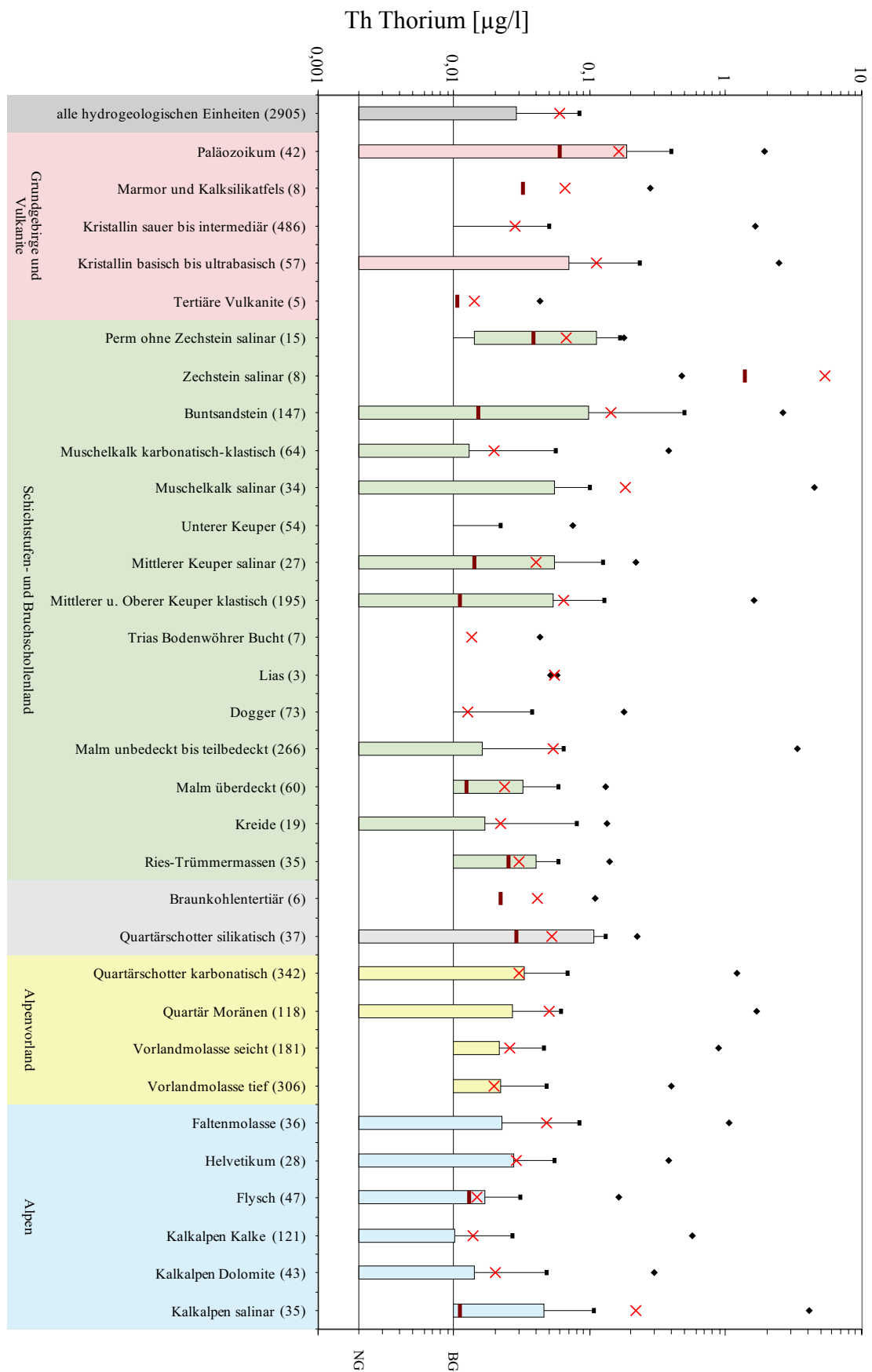
Anhang 2-48: Spannweitendiagramme der Selenkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-49: Spannweitendiagramme der Zinnkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



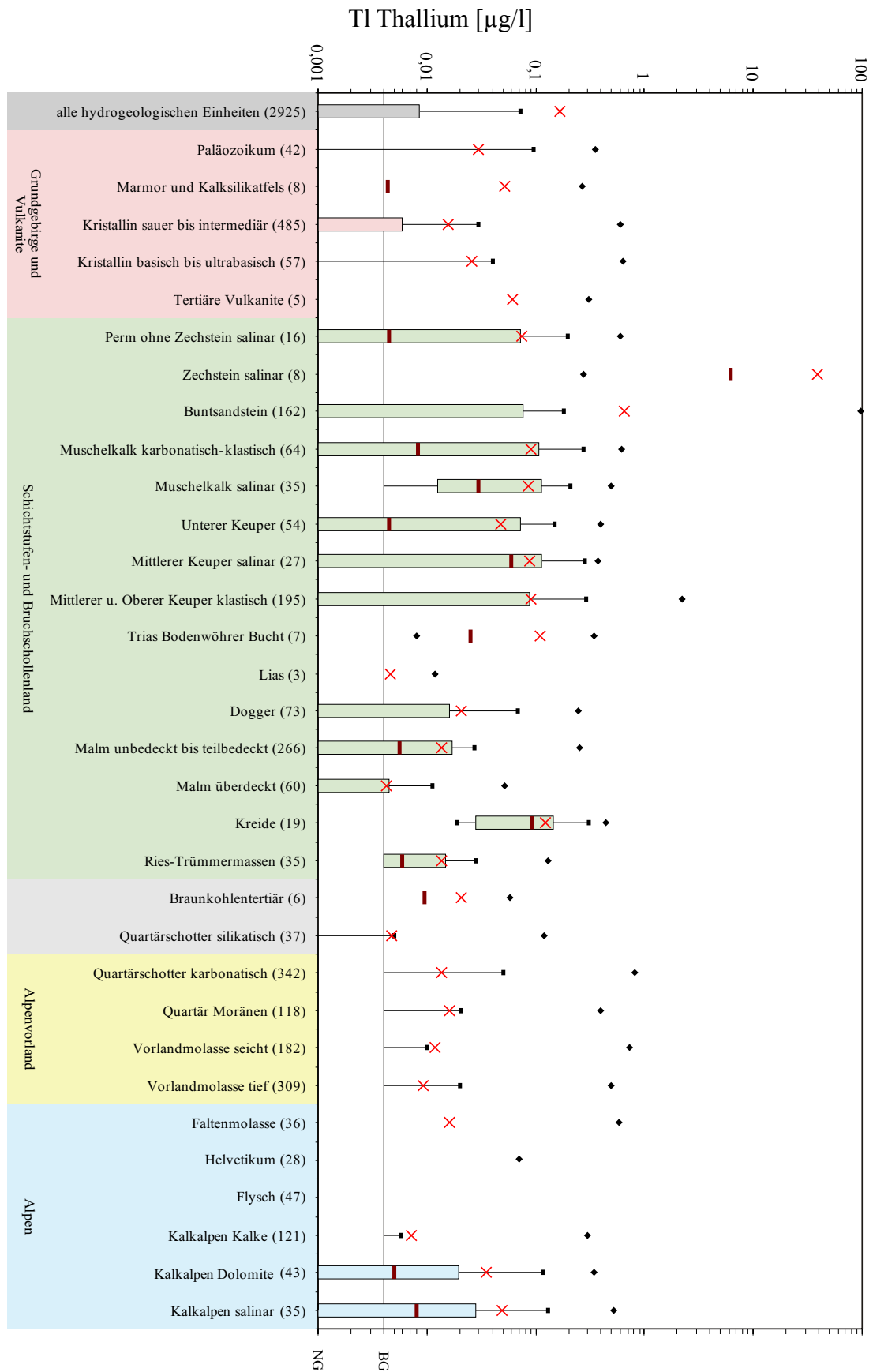
Anhang 2-50: Spannweitendiagramme der Strontiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



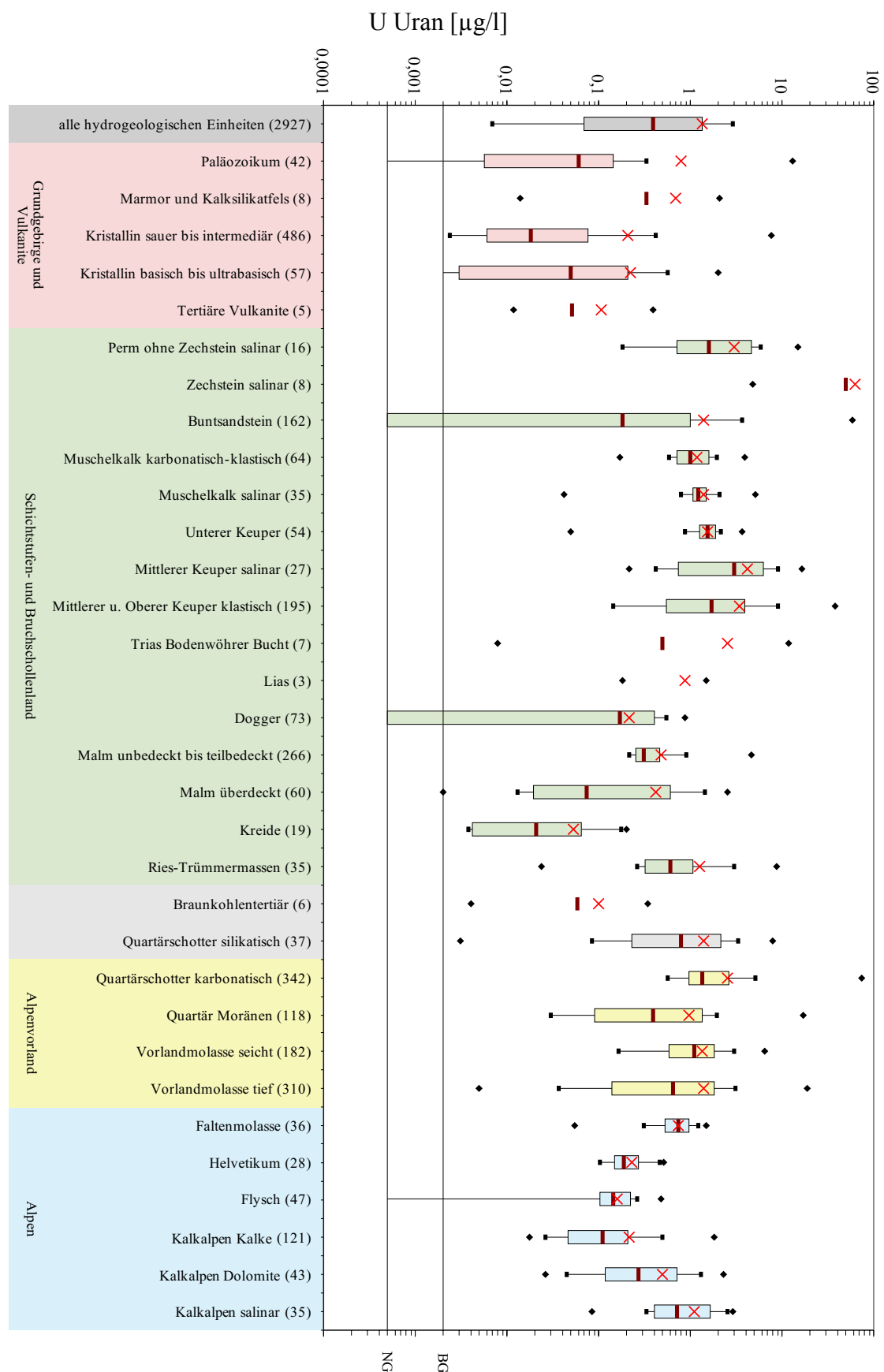
Anhang 2-51: Spannweitendiagramme der Thoriumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-52: Spannweitendiagramme der Titankonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



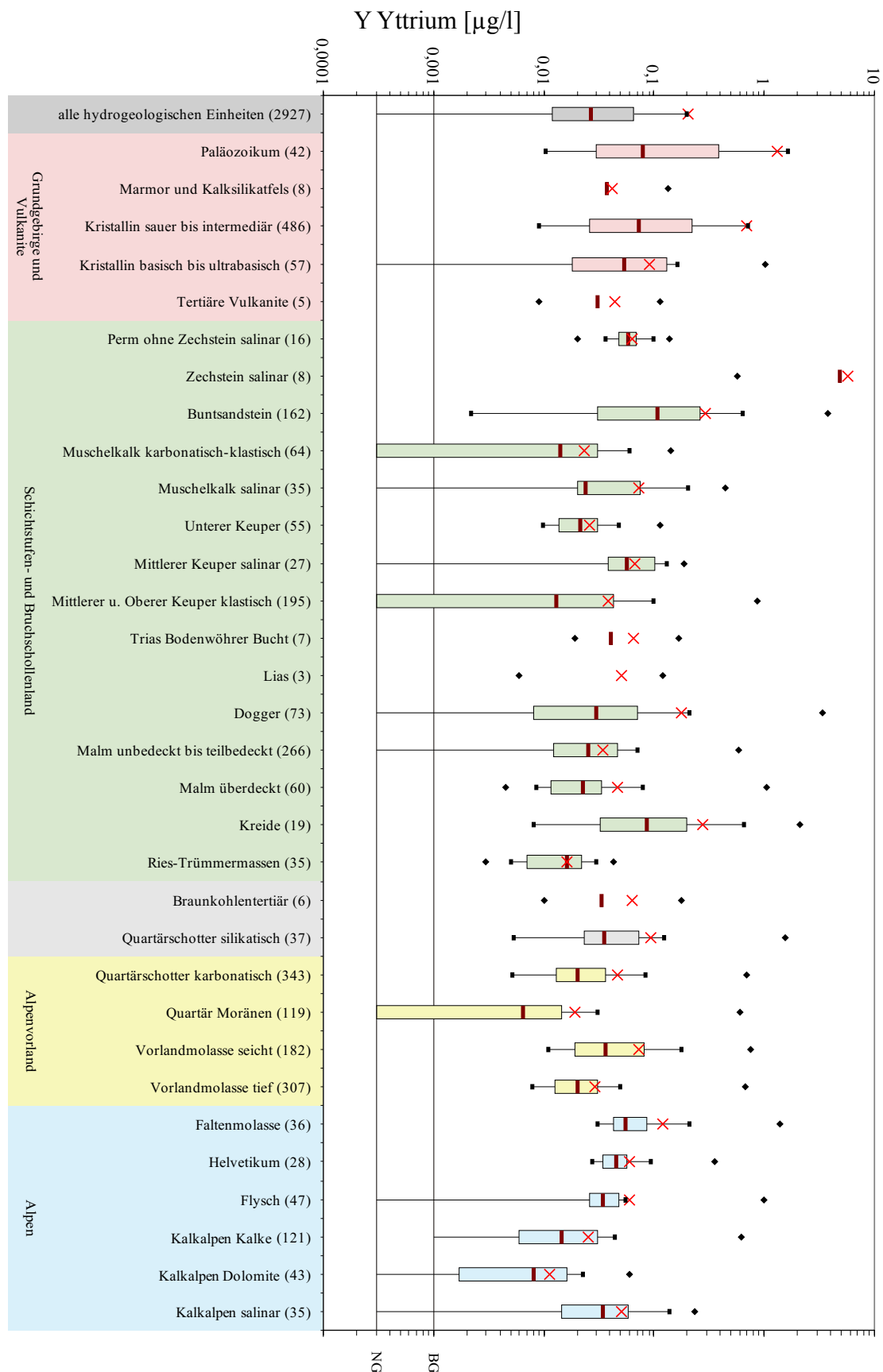
Anhang 2-53: Spannweitendiagramme der Thalliumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-54: Spannweitendiagramme der Urankonzentration in den unterschiedlichen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-55: Spannweitendiagramme der Vanadiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-56: Spannweitendiagramme der Yttriumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten



Anhang 2-57: Spannweitendiagramme der Zinkkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten

In der Reihe „GLA Fachberichte“ des Bayerischen Geologischen Landesamtes erschienen bisher:

- [1] AUERSWALD, K. & SCHMIDT, F. (1986): Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern.– GLA Fachberichte, **1**: 74 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [2] RUPPERT, H. & SCHMIDT, F. (1987): Natürliche Grundgehalte und anthropogene Anreicherungen von Schwermetallen in Böden Bayerns.– GLA Fachberichte, **2**: 97 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [3] WROBEL, J.-P. & HANKE, K. (1987): Karten der Gefährdung der Grundwässer in Bayern durch Nitrat.– GLA Fachberichte, **3/Teil 1**: 1-25; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
JONECK, M., STANJEK, CH. & HOLZNER, G. (1987): Nitratverlagerung und Nitratabbau in Böden, Deck- und Verwitterungsschichten in verschiedenen Klimabereichen Bayerns.– GLA Fachberichte, **3/Teil 2**: 27-127; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [4] RUPPERT, H., SCHMIDT, F., JONECK, M., JERZ, H. & DREXLER, O. (1988): Schwermetallgehalte in Böden des Donautales.– GLA Fachberichte, **4**: 51 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [5] WITTMANN, O. (1991): Standortkundliche Landschaftsgliederung von Bayern - Übersichtskarte 1 : 1 000 000 - und Abhängigkeitsbeziehungen der Bodennutzung.– GLA Fachberichte, **5/Teil 1**: 1-47.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
RUPPERT, H., SCHMIDT, F. & SCHMIDT, R. (1991): Bereiche natürlicher Spurenmetalle in den häufigsten Böden Bayerns.– GLA Fachberichte, **5/Teil 2**: 49-73; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [6] MARTIN, W., RUPPERT, H. & FRIED, G. (1991): Veränderungen von Elementgehalten, pH-Wert und potentieller Kationenaustauschkapazität in ausgewählten Böden Bayerns. Untersuchungen an 203 Profilen im Zeitraum 1964 bis 1986.– GLA Fachberichte, **6/Teil 1**: 1-35; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
RUPPERT, H. (1991): Zur Problematik der Abschätzung anthropogener Stoffgehalte in Böden am Beispiel von Schwermetallen.– GLA Fachberichte, **6/Teil 2**: 37-61; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [7] JONECK, M. & PRINZ, R. (1991): Dioxine in Böden Bayerns. Gehalte polychlorierter Dibenzodioxine (PCDD) und polychlorierter Dibenzofurane (PCDF) in Auflage- und Oberbodenhorizonten von Böden unterschiedlicher Nutzung und Immissions-situation.– GLA Fachberichte, **7**: 60 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [8] v. POSCHINGER, A. (1992): GEORISK. Erfassung und Untersuchung von Massenbewegungen im Bayerischen Alpenraum.– GLA Fachberichte, **8**: 33 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [9] JONECK, M. & PRINZ, R. (1993): Inventur organischer Schadstoffe in Böden Bayerns. Chlorierte Kohlenwasserstoffe, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und N-Herbizide in Böden unterschiedlicher Nutzung und Immissionssituation.– GLA Fachberichte, **9**: 155 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [10] JONECK, M. & PRINZ, R. (1993): Schwermetallgehalte in Böden des Maintales und angrenzender Nebentäler. GLA Fachberichte, **10**: 87 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).

- [11] SCHILLING, B. (1994): Boden-Dauerbeobachtungsflächen des Bayerischen Geologischen Landesamtes - Zielsetzung, Stand der Arbeiten und Ergebnisse aus den Erstuntersuchungen.– GLA Fachberichte, **11**: 60 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [12] JONECK, M. & PRINZ, R.. (1994): Hintergrundbelastung bayerischer Böden mit organischen Problemstoffen.– GLA Fachberichte, **12**: 55 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [13] DIEPOLDER, G. W. (1995): Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. Grundlagen - Bewertung - Darstellung in Karten.– GLA Fachberichte, **13/Teil 1**: 1-79; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- WAGNER, B. (1995): Untersuchungen zum Wasser- und Stofftransport in der ungesättigten Zone im Hinblick auf ihre Schutzfunktion für das Grundwasser.– GLA Fachberichte, **13/Teil 2**: 81-100; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [14] SCHILLING, B. & ZEITLER, G. (1997): Flächenvariabilität von Stoffgehalten in Böden dargestellt am Beispiel von Radionukliduntersuchungen auf einer Wald-Bodendauerbeobachtungsfläche des Bayerischen Geologischen Landesamtes.– GLA Fachberichte, **14/Teil 1**: 1-24; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- SCHILLING, B. (1997): Untersuchungen zum Verhalten radioaktiver Stoffe auf Monitoringflächen im Zeitraum 1990-94.– GLA Fachberichte, **14/Teil 2**: 25-47; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- SCHILLING, B. (1997): Wiederholungsuntersuchungen an Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Bayern.– GLA Fachberichte, **14/Teil 3**: 48-91; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [15] RUPPERT, H.(1998): Die Humusaufgabe von Waldböden Südbayerns als Anzeiger der relativen Immissionsbelastung durch Schwermetalle.– GLA Fachberichte, **15**: 44 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt) .
- [16] SUTTNER, TH., AUSSENDORF, M. & MARTIN, W.(1998): Hintergrundwerte anorganischer Problemstoffe in Böden Bayerns.– GLA Fachberichte, **16**: 70 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [17] PRINZ, R. & WITTENBECHER, M. (1999): Typische Gehalte ausgewählter Spurenelemente in Waldböden Bayerns.– GLA Fachberichte, **17**: 66 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [18] WITTENBECHER, M. (1999): Mobilisierbare Schwermetallgehalte in forstwirtschaftlich genutzten Böden Bayerns.– GLA Fachberichte, **18**: 35 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [19] DOPPLER, G., LINHARDT, E., RAST, U. & ROHRMÜLLER, H. (2002): ZDB-Schlüsselliste Petrographische Bezeichnung – Gesteinsbezeichnung für die Zentrale Datenbank (ZDB) des Bayerischen Geologischen Landesamtes.– GLA Fachberichte, **19**: 65 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- [20] BÜTTNER, G., PAMER, R. & WAGNER, B. (2003): Hydrogeologische Raumgliederung von Bayern.– GLA Fachberichte, **20**: 85 S.; München (Bayer. Geol. L.-Amt).



Bayerisches Geologisches Landesamt

ISSN 0932 - 9269