

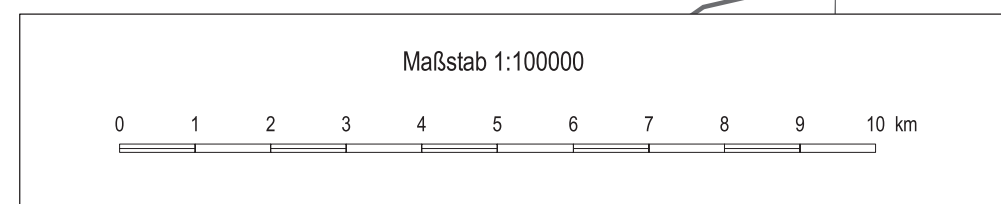
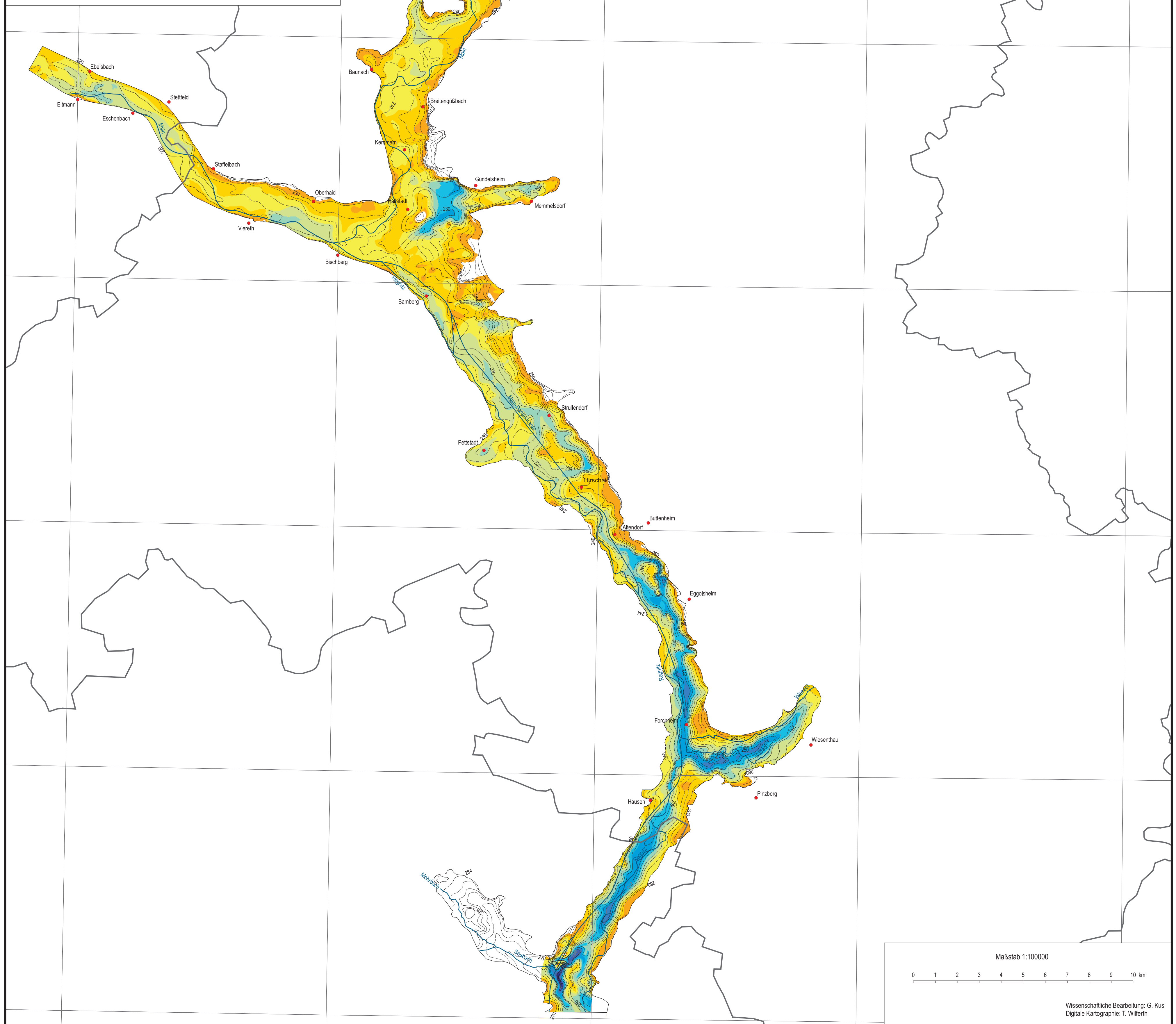
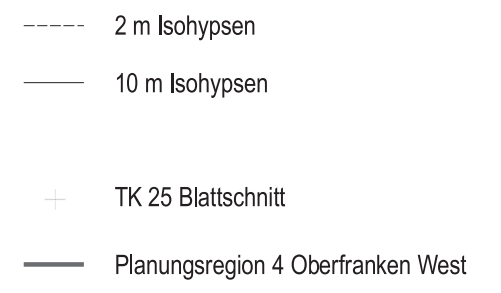
Hydrogeologische Karte 1:100000

Beilage 1:
Grundwassermächtigkeiten im Quartär und
Höhenlage der Quartärbasis

Grundwassermächtigkeiten (m)



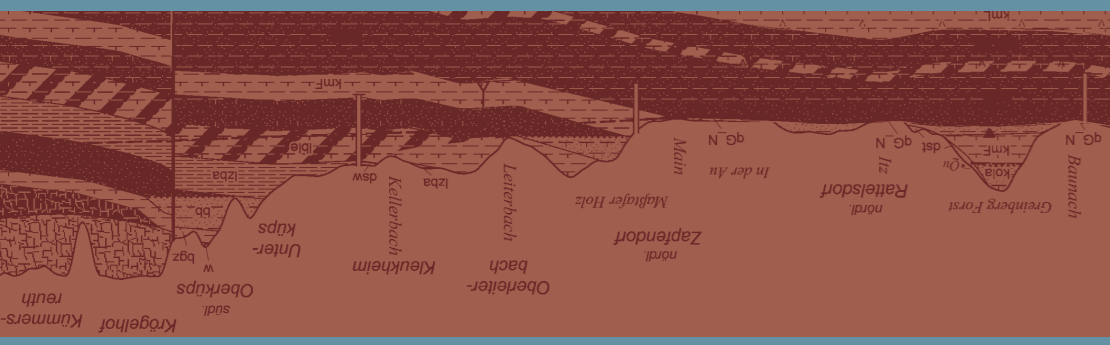
Höhengleichen der Quartärbasis (m über NN)



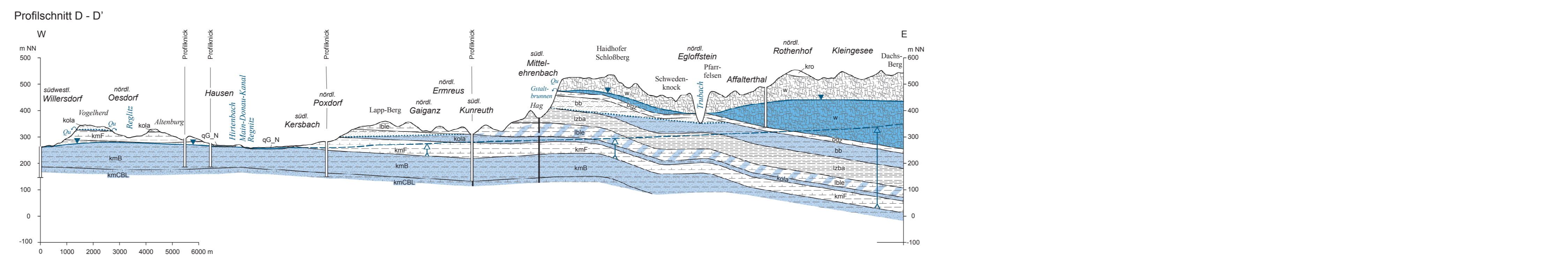
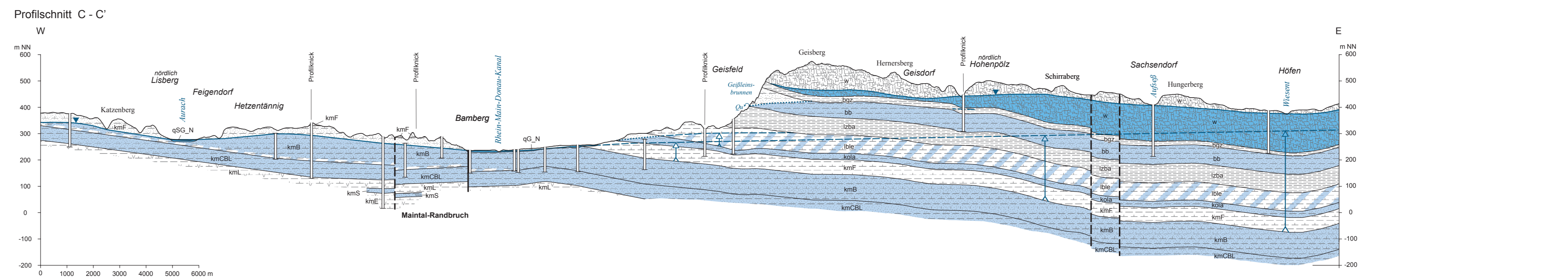
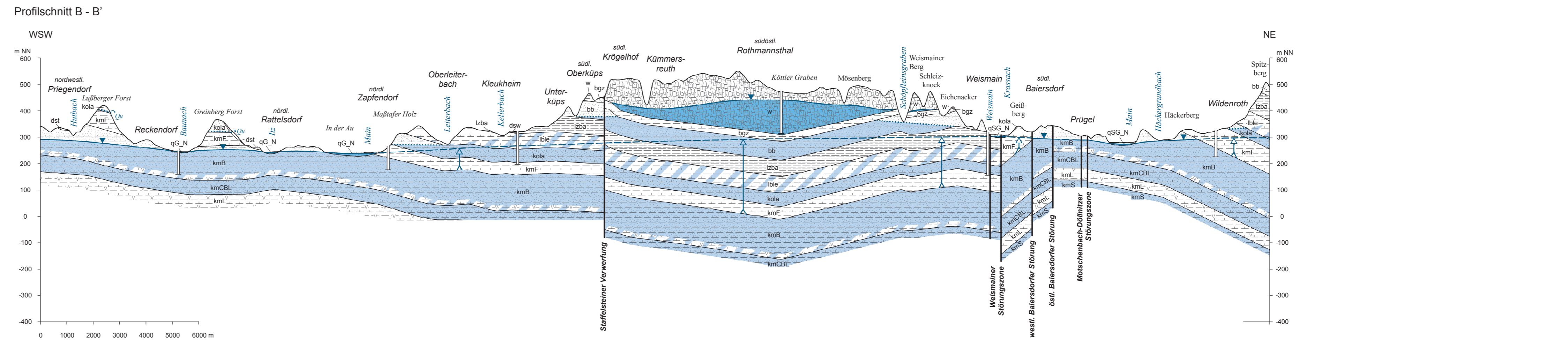
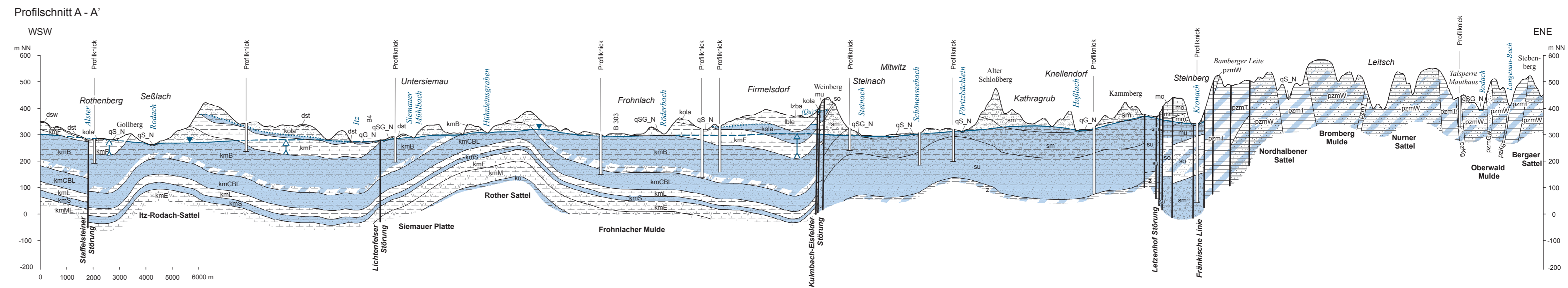
Hydrogeologische Karte 1 : 100 000

Blatt 5:
Hydrogeologische Profilschnitte
schematisch, 10-fach überhöht

Blatt 5: Hydrogeologische
Profilschnitte



Hydrogeologische Karte
Planungsregion 4 Oberfranken West
Geowissenschaftliche
Landesaufnahme in der
Planungsregion 4 Oberfranken West
1 : 100 000



Planungsregionen in Bayern



Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeierstraße 160
88179 Augsburg
http://www.lfu.bayern.de

Bayerisches Landesamt für Umwelt
Gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionalentwicklung (ERDF)

Herausgeber:
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bayermeierstraße 160
88179 Augsburg
Eine Behörde im Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz

Internet:
www.lfu.bayern.de

E-Mail:
poststelle@lfu.bayern.de

Wissenschaftliche Bearbeitung:
B. Aeböck, G. Kuh, S. Stelzle

Digitale Kartographie:
S. Schmidbauer

Druck:
Officedruckerei Kai Gramlich GmbH, 72124 Pleichausen

Copyright:
© Bayerisches Landesamt für Umwelt
Nachdruck, Vervielfältigung auf fotomechanischem oder ähnlichem Weg sowie Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen ist auch auszugsweise nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 4 Oberfranken West Hydrogeologische Karte 1 : 100 000 Augsburg 2007

*finanziert aus dem Projekt "Hydrogeologische Landesaufnahme Bayern" der Bayerischen Staatsregierung

Hydrogeologische Einheiten

dsw	Deckschicht mit stark wechselnder Zusammensetzung
dst	Deckschicht vorwiegend tonig-lehmige Ausbildung
qS_N	Quartäre Bach- oder Flussablagerungen mit hohem Feinkornanteil
qSG_N	Quartäre Flussschotter und -sande mit höherem Feinkornanteil
qG_N	Quartäre Flussschotter und -sande
kro	Kraie, ungliedert
w	Malm
bgz	Bajoc-Callov-Schichten (Dogger gamma - Dogger zeta)
bb	Eisensandstein (Dogger beta)
lba	Lias zeta - Dogger alpha
lz	Lias zeta - Lias alpha
lbe	Lias beta - Lias epsilon
kola	Rhät-Lias-Übergangsschichten
kmF	Feuerkette
kmB	Burgsandstein, ungliedert
kmCB	Blasensandstein mit Coburger Sandstein
kmS	Lehrbergsschichten
kmE	Schiffsandstein
kmM	Estherienschiefer
kmME	Myophorienschiefer
ku	Unterer Keuper
m	Muschelkalk, ungliedert
mo	Oberer Muschelkalk
mm	Mittlerer Muschelkalk
mu	Unterer Muschelkalk
so	Oberer Buntsandstein
sm	Mittlerer Buntsandstein
su	Unterer Buntsandstein
z	Zechstein
pzmT	Paläozoische Tonschiefer
pzmW	Paläozoische Tonschiefer-Wechsellagerung
pzmGw	Paläozoische Grauwacken

Lithologie

[Symbol]	Deckschichten unterschiedlicher, meist bindiger Zusammensetzung
[Symbol]	Sand mit Kies
[Symbol]	Kies mit Sand
[Symbol]	Kies mit Sand, tonig-schluffig
[Symbol]	Sand mit Kies, tonig-schluffig
[Symbol]	Sandstein oder Grauwacke oder Quarzit
[Symbol]	Sandstein, tonig oder wechselnd mit Tonstein
[Symbol]	Sandstein, tonig-karbonatisch oder wechselnd mit Tonstein/Karbonat
[Symbol]	Tonstein, sandig oder wechselnd mit Sandstein
[Symbol]	Tonstein, Schluffstein
[Symbol]	Mergelstein
[Symbol]	Tonstein, Mergelstein
[Symbol]	Kalkmergelstein
[Symbol]	Kalkstein
[Symbol]	Kalkstein und Dolomitstein, verkarstet
[Symbol]	Tonschiefer wechselnd mit Sandstein oder Grauwacke
[Symbol]	Tonschiefer
[Symbol]	Konglomerat, Breckie
[Symbol]	Blockschutt
[Symbol]	Gips-, Anhydrit-Einlagerungen

Grundwasserkörper

[Symbol]	Grundwasserleiter mit überwiegend sehr hoher bis mittlerer Durchlässigkeit
[Symbol]	Grundwasserleiter mit überwiegend mäßiger bis geringer Durchlässigkeit
[Symbol]	Bedingt Grundwasser führend; Überwiegend geringler mit Bereichsweise höherer Durchlässigkeit
[Symbol]	Grundwasserleiter Bereich oder geringler ohne nennenswerte Durchlässigkeit
[Symbol]	Grundwasseroberfläche
[Symbol]	Grundwasserdruckpiegel (großräumig gespanntes Grundwasser)
[Symbol]	Grundwasseroberfläche, vermutet

Allgemein

[Symbol]	Quelle
[Symbol]	Quelle, projiziert
[Symbol]	Bohrung
[Symbol]	Bohrung, projiziert
[Symbol]	Störung
[Symbol]	Störung, vermutet



Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 4 Oberfranken West

Erläuterungen zur Hydrogeologischen Karte 1 : 100 000





**Geowissenschaftliche
Landesaufnahme in der
Planungsregion 4 Oberfranken West**

**Erläuterungen zur
Hydrogeologischen Karte
1 : 100 000**



Impressum

Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 4 Oberfranken West
Erläuterungen zur Hydrogeologischen Karte 1 : 100 000
ISBN (Druck-Version): 978-3-940009-30-2
ISBN (Online-Version): 978-3-940009-31-9

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg

Tel.: (0821) 90 71 - 0

Fax.: (0821) 90 71 55 56

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de

Eine Behörde im Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt,
Gesundheit und Verbraucherschutz

Bearbeitung/Text/Konzept:

Günter Kus, Stephan Sieblitz, Tanja Wilferth und Claudia Pukowietz
Bayerisches Landesamt für Umwelt

Gunnar Lischeid

Universität Bayreuth – Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER)

Umweltforschung (BayCEER)

Dr. Hans-Frisch-Str. 1-3

95448 Bayreuth

Robert Pamer

Geologisches Büro Robert Pamer

Arnulfstr. 138

80634 München

Redaktion:

Günter Kus

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Druck:

Pauli Offsetdruck, Am Saaleschloßchen 6, 95145 Oberkotzau/Hof

Gedruckt auf Papier aus 100% Altpapier

Stand:

Oktober 2007

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Broschüre auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

Geowiss. Landesaufnahme Planungsregion 4 Oberfranken West*	Erl. HK100	224 S.	52 Abb.	8 Tab.	Augsburg 2007
--	------------	--------	---------	--------	---------------

*Finanziert aus dem Projekt „Hydrogeologische Landesaufnahme Bayerns“ der Bayerischen Staatsregierung, gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	6
1 Geologisch-hydrogeologischer Überblick	7
2 Oberflächengewässer	10
3 Hydrogeologischer Bau und Grundwasserdynamik	13
3.1 Datengrundlage und Methodik	13
3.1.1 Datengrundlage	13
3.1.2 Methodik	13
3.2 Hydrogeologische Einheiten	15
3.2.1 Paläozoikum	15
3.2.1.1 Älteres Paläozoikum	15
3.2.1.2 Rotliegend	18
3.2.1.3 Zechstein	20
3.2.2 Buntsandstein	20
3.2.3 Muschelkalk	23
3.2.4 Keuper und Rhätolias	24
3.2.4.1 Unterer Keuper	25
3.2.4.2 Gipskeuper	25
3.2.4.3 Sandsteinkeuper	27
3.2.4.4 Rhätolias	36
3.2.5 Lias	39
3.2.6 Dogger	39
3.2.7 Malm	40
3.2.8 Quartär	44
3.2.8.1 Haupttäler	46
3.2.8.2 Nebentäler	58
3.3 3D-Modellierung	61
4 Grundwasserbeschaffenheit	65
4.1 Datengrundlage	65
4.2 Datenaufbereitung und -darstellung	65
4.3 Charakterisierung der Grundwässer nach Grundwasserleitern	67
4.3.1 Älteres Paläozoikum	67
4.3.2 Rotliegend	70
4.3.3 Buntsandstein	73
4.3.4 Muschelkalk	76
4.3.5 Keuper und Rhätolias	77
4.3.5.1 Unterer Keuper	77
4.3.5.2 Gipskeuper	79
4.3.5.3 Sandsteinkeuper	80
4.3.5.4 Rhätolias	87

4.3.6	Lias	91
4.3.7	Dogger	92
4.3.8	Malm	94
4.3.9	Quartär	95
4.4	Multivariate Statistik	99
4.4.1	Zielsetzung	99
4.4.2	Daten und Methoden	99
4.4.2.1	Aufbereitung der Daten	99
4.4.2.2	Methoden	100
4.4.3	Ergebnisse	101
4.4.3.1	Bestimmung von Gruppierungen: Clusteranalyse	101
4.4.3.2	Überprüfung der Klassifizierung: Diskriminanzanalyse	102
4.4.3.3	Visualisierung der Daten und Ergebnisse: Selbstorganisierende Karte	103
4.4.4	Zusammenfassung	106
5	Grundwasserhaushalt	107
5.1	Klimatische Verhältnisse	107
5.2	Grundwasserneubildung	107
6	Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung	111
6.1	Einführung	111
6.2	Erstellung der Karten	112
6.2.1	Vorgehen	112
6.2.2	Bewerteter Grundwasserleiter	112
6.2.3	Sickerwasserspende und Sickerwasserfaktor	114
6.2.4	Anteil des Bodens	115
6.2.5	Anteil der tieferen Grundwasserüberdeckung	115
6.2.6	Einfluss besonderer hydrogeologischer Situationen	116
6.3	Datengrundlagen	116
6.3.1	Bodenkundlicher Überblick	116
6.3.2	Bewertung Deckschichten	120
6.3.3	Bewertung Festgestein	124
6.4	Aussagen zur Schutzfunktion	124
7	Nutzung des Grundwassers	128
8	Dargestellte Karteninhalte	132
8.1	Kartengrundlagen	132
8.2	Klassifikation der hydrogeologischen Einheiten	132
8.3	Grundwasserhöhengleichen	135
8.4	Hydrogeologische Grunddaten	136
8.5	Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung	136
8.6	Hydrogeologische Profilschnitte	137
9	Literatur	139

Verzeichnis der Abbildungen	150
Verzeichnis der Tabellen	153
Verzeichnis der Abkürzungen und Maßeinheiten	154
Anhang 1: Grundwasserbeschaffenheit – Verzeichnis der analysierten Parameter, Analysemethoden, Nachweis- und Bestimmungsgrenzen sowie Teilprobenbehandlung	157
Anhang 2: Grundwasserbeschaffenheit – Verzeichnis der statistischen Maßzahlen der physiko- chemischen Parameter, geordnet nach hydrogeologischen Einheiten	159
Anhang 3: Grundwasserbeschaffenheit – Verzeichnis der Spannweitendiagramme der physiko- chemischen Parameter der in der Planungsregion 4 Oberfranken West untersuchten Grundwasserproben	176
Anhang 4: Durchlässigkeitsbeiwerte – Verzeichnis der k_f -Werte der untersuchten hydrogeologischen Einheiten in der Planungsregion 4 Oberfranken West; ermittelt aus Pumpversuchen für Einheiten mit mehr als 10 Einzeldaten.	224

Vorwort

Geologische Karten haben in Bayern eine Jahrhunderte lange Tradition. Die „Gebürgs-Karte von Baiern und der Oberen Pfalz“ des Matthias von Flurl erschien bereits im Jahre 1792! Die systematische Kartierung Bayerns ist seit 1850 ein fester Bestandteil staatlicher Leistungen. Noch immer gehört die Arbeit im Gelände und im Labor zum „Tagesgeschäft“ der Geologen. Die Informationen sind durch gezielte Bohrungen und moderne Methoden wie die Geophysik jedoch wesentlich genauer geworden und geben auch Einblicke in den tieferen Untergrund. Geologische Karten sind unverzichtbare Grundlage für den Umweltschutz, die Landesplanung und die Rohstoffwirtschaft: Sie helfen, teure Fehlbohrungen zu vermeiden, verbessern die Sicherung wertvoller Ressourcen wie mineralische Rohstoffe und das Grundwasser und sind eine wichtige Planungshilfe, damit Vorhaben schnell und kostengünstig abgeschlossen werden können. Geowissenschaftliche Erkenntnisse und Karten haben deshalb einen erheblichen Nutzwert für die Wirtschaft, die Wissenschaft und Behörden.

Die geowissenschaftliche Landesaufnahme in Bayern führt das Landesamt für Umwelt durch. Wir haben sie von 1997 bis 2002 in einem Pilotprojekt „Planungsregion 10 Ingolstadt“ neu strukturiert. Seitdem werden ganze Planungsregionen ganzheitlich geowissenschaftlich bearbeitet. Seit 2001 ist das Landesamt außerdem mit der hydrogeologischen Landesaufnahme beauftragt worden. Sie widmet sich verstärkt dem Grundwasser, erfasst dessen Vorkommen, Dynamik und Beschaffenheit. Zusätzlich wird die wichtige Schutzfunktion des Untergrundes erfasst und bewertet. Bis 2015 soll die hydrogeologische Landesaufnahme flächendeckend in ganz Bayern abgeschlossen sein. Das hat der Bayerische Landtag beschlossen. Dieses Ziel kann nur bei gleichzeitiger Bearbeitung mehrerer Regionen erreicht werden.

Diese Veröffentlichung stellt die Ergebnisse der Arbeiten vor, die im Projektzyklus von 2001 bis 2007 in sechs Planungsregionen Bayerns durchgeführt wurden. Die Förderung der EU in mehreren Regionen hat uns wesentlich geholfen. Mit dieser Mittelausstattung war es möglich, mit verschiedenen Arbeitsteams gleichzeitig die Planungsregionen 4 Oberfranken West, 5 Oberfranken Ost, 12 Donau-Wald, 13 Landshut sowie größere Anteile der Regionen 6 Oberpfalz-Nord und 11 Regensburg zu bearbeiten. Damit sind nun etwa 40 Prozent der Fläche Bayerns bearbeitet und das Ziel einer flächendeckenden geologischen, bodenkundlichen und hydrogeologischen Aufnahme bis 2015 in greifbare Nähe gerückt.

Prof. Dr.-Ing. Albert Göttle
Präsident des Bayerischen Landesamtes für Umwelt

1 Geologisch-hydrogeologischer Überblick

Die Planungsregion 4 Oberfranken West liegt im N Bayerns. Sie umfasst von SW nach NE mit Teilen des Süddeutschen Schichtstufenlandes, des Obermainischen Bruchschollenlandes und des Südostdeutschen Schiefergebirges drei wesentliche geologische Baueinheiten, die sich in ihren hydrogeologischen Eigenschaften deutlich unterscheiden. Mit mesozoischen und am Ost- rand auch Resten von permischen Gesteinen bilden Schichtstufenland und Bruchschollenland das Deckgebirge, welches am Großlineament der Fränkischen Linie gegen das Schiefergebirge, den variskischen Sockel, abbricht. Deckgebirge und Sockel werden durch tief eingesenkte Sohl- und Kerbtäler zerschnitten und im Bereich der Talsohlen häufig von mehreren Meter mächtigen quartären Talfüllungen diskordant überlagert.

Die mesozoischen Einheiten des Schichtstufenlandes zeigen in der Region einen relativ gleich- mäßigen tektonischen Bau, gekennzeichnet durch die großräumig flach nach E bis SE geneigte Schichtlagerung und mehr oder weniger deutliche Verbiegungen, Aufwölbungen oder Einmul- dungen. Bedeutendste Struktur ist der vom bruchtektonisch geprägten Staffelsteiner Graben be- gleitete Muldenzug der Frankenalbfurche, die nach FREUDENBERGER (1996) bereits außerhalb der Region mit der Grabfeld-Mulde im N beginnt und in südöstlicher Richtung in die Hollfelder Mulde übergeht. Im NE angrenzenden Bruchschollenland wird das mesozoische Deckgebirge von her- zynisch streichenden Verbiegungen und Bruchtektonik stark zergliedert. Auffälligste Strukturen sind dort die aufschiebende Kulmbacher Störungszone und die weiter westlich ausgebildete Bruch- tektonik mit den Aufwölbungen des Krappenberger und Marktzeulner Sattels sowie die tektonisch angelegten Rotliegendtröge bei Stockheim. Der im E anschließende variskische Sockel ist durch SW-streichende, zum Teil engständige Sattel- und Muldenstrukturen, die durch zahlreiche parallel verlaufende Störungen begleitet werden, charakterisiert. Dies bedingt einen eng aufeinander folgen- den Wechsel meist steil einfallender paläozoischen Einheiten.

Zur geologisch-hydrogeologischen Charakterisierung der oberen Grundwasserleiter der Region bietet sich als Übersicht die Hydrogeologische Raumgliederung von Bayern nach BÜTTNER et al. (2003) an. Von SW nach NE werden folgende hydrogeologische Teilräume angetroffen (Abb. 1-1): Keuper-Bergland, Alborland, Fränkische Alb, Bruchschollenland i.e.S. und als Raum zusammen- gefasst das Südostdeutsche Schiefergebirge.

Keuper-Bergland und Alborland nehmen nahezu die Hälfte der Region ein. Diese Einheiten kenn- zeichnen vertikale und horizontale Wechsel von mesozoischen Sand-, Ton-, Mergel- Dolomit- und Kalksteinlagen, die in Mächtigkeit und hydraulischer Leitfähigkeit variieren (Abb. 3-1). Stratigra- phisch reichen die Schichten vom Gipskeuper bis zum Dogger. Darin bildet sich ein vielgliedriger, komplexer Grundwasserstockwerksbau aus mit mehr oder weniger zusammenhängenden oder isolierten Grundwasservorkommen und überwiegend mäßigen Ergiebigkeiten. Für die Grundwas- serführung und -speicherung ist vor allem das Trennflächengefüge der Sand- und vereinzelt auch Dolomit- bzw. Kalksteinlagen von Bedeutung. Die Grundwässer haben silikatischen bis karbona- tischen Charakter und sind bisweilen sulfatisch überprägt. Als regional wichtiger Grundwasserlei- terkomplex ist der Sandsteinkeuper (Blasensandstein i.w.S. und Burgsandstein) herauszustellen. Lokale Bedeutung haben die Grundwasservorkommen im Gipskeuper (Schilfsandstein), Rhätholias (Rhät- und Liassandsteine) und Dogger (Eisensandstein).

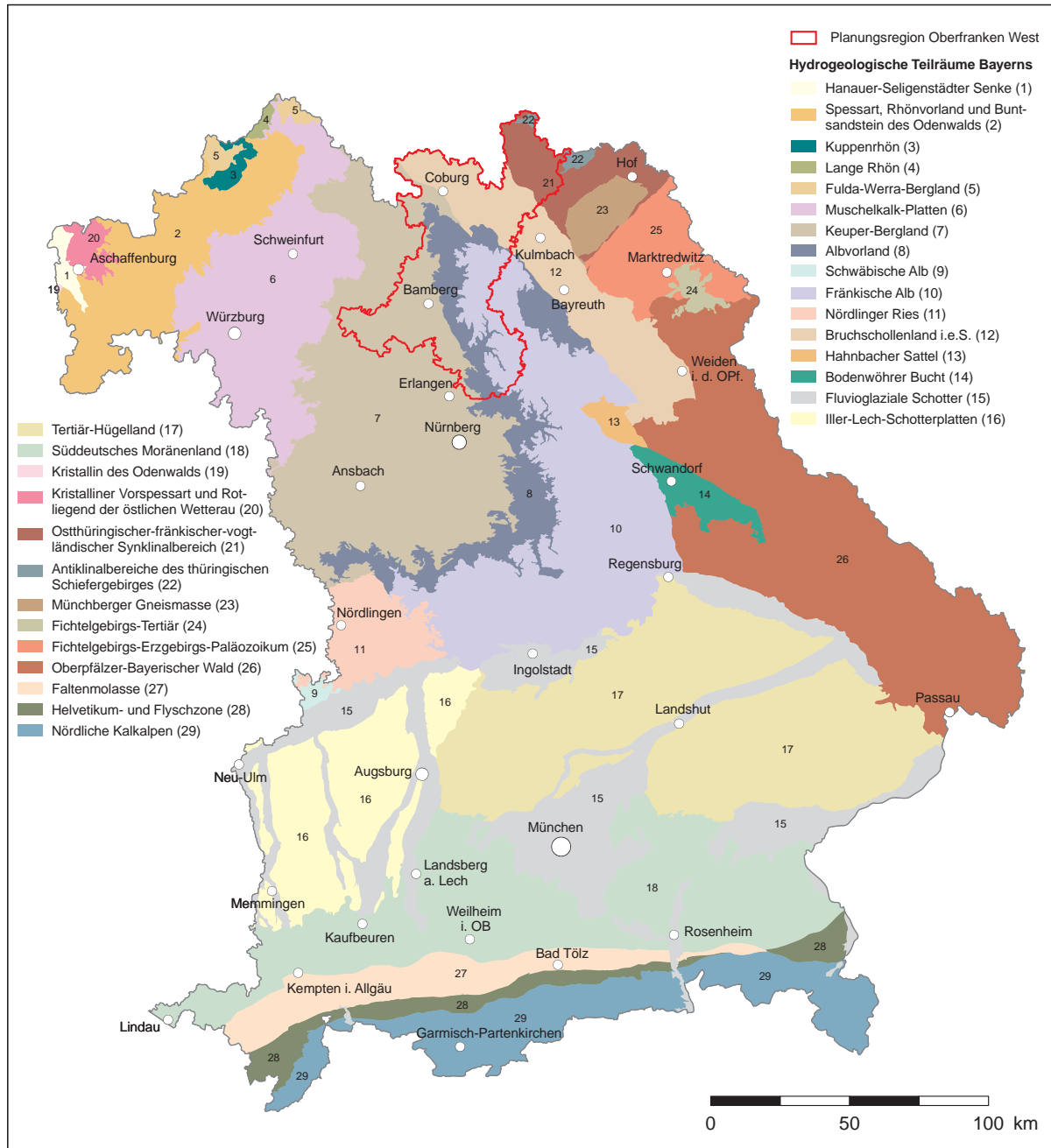


Abb. 1-1: Hydrogeologische Teilräume Bayerns mit Lage der Region Oberfranken West.

Auf die Fränkische Alb entfallen in der Planungsregion etwa 18% der Gesamtfläche. In den dort vorherrschenden bankig und stellenweise auch massig ausgebildeten Kalk- und Dolomitsteinen des Malm zirkulieren die Grundwässer in Klüften und zum Teil weit ausgedehnten Karsthohlräumen und bilden ein zusammenhängendes Grundwasservorkommen, welches meist über stark schüttende Karstquellen entwässert. Hydraulisch lässt sich Seichter und Tiefer Karst trennen. Die Grundwässer zeigen eine deutliche karbonatische Prägung. Infolge von Verbreitung, Mächtigkeit und Ergiebigkeit erreicht das Kluft-Karst-Grundwasserstockwerk regionale Bedeutung.

Das Bruchschollenland nimmt etwa 21% der Regionsfläche ein. Es setzt sich überwiegend aus sedimentären mesozoischen Gesteinseinheiten zusammen. Die stratigraphische Abfolge reicht vom Rotliegend bis zum Malm und spiegelt sich in einer sehr vielfältigen Sequenz von silikatischen bis karbonatischen Wechselfolgen wider. Dabei führen Schichtlagerung und Bruchtektonik im Zusammenspiel mit den faziell bedingten Gesteinswechseln bisweilen zu sehr heterogenen hydrogeologischen Verhältnissen, wobei die einzelnen Grundwasservorkommen durch die tektonisch bedingt schmalen, NW–SE gerichteten Grundwasserleiter räumlich eingeeengt werden. Es handelt sich in der Regel um Kluft-(Poren)- oder Kluft-(Karst)-Grundwasserleiter mit mäßigen, seltener hohen Ergiebigkeiten. Entsprechend des vielfältigen Gesteinschemismus werden silikatische, karbonatische und sulfatische Grundwässer angetroffen. Wichtigster Grundwasserleiter ist der Buntsandstein, der entlang der Kulmbacher Störungszone eine partielle hydraulische Anbindung an den benachbarten Sandsteinkeuper besitzt. Lokale Bedeutung erreichen die Grundwasservorkommen der Rotliegendtröge im Osten des Bruchschollenlandes. Die Vorkommen im Muschelkalk, Unteren Keuper und Gipskeuper sind mit wenigen Ausnahmen bedeutungslos. Erwähnenswert sind hierunter die im Lautertal gelegenen stark schüttenden Karstquellen des Muschelkalk.

Das Südostdeutsche Schiefergebirge erreicht in der Planungsregion etwa einen Flächenanteil von 12%. Es wird durch einen regen Wechsel altpaläozoischer Tonschiefer, Grauwacken und Quarziten mit vereinzelt Einschaltungen von Kalksteinen geprägt. Durch den tektonischen Bau (s.o.) und die geringe Durchlässigkeit der Gesteine bilden sich über weite Strecken isolierte, vom hydraulisch wirksamen Kluftnetz abhängige Grundwasservorkommen aus. Stellenweise besteht eine hydraulische Verbindung zu oberflächennahen Grundwässern der Verwitterungsdecken. Die Grundwässer weisen meist eine silikatische, seltener auch eine sulfatisch-karbonatische Prägung auf. Der geringe Hohlraumanteil im Gebirge bedingt generell gering ergiebige Grundwasservorkommen, die zudem aufgrund des häufigen Fehlens bindiger Deckschichten als sehr verschmutzungsempfindlich einzustufen sind. Einzelne Vorkommen erreichen nur lokale Bedeutung.

Die Talzüge von Main und Regnitz und einiger ihrer größeren Nebenflüsse bilden mit ihren quartären Schotterfüllungen einen eigenständigen Porengrundwasserleiter, der mit über 10 m stellenweise beachtliche Grundwassermächtigkeiten aufweisen kann. Er wird aufgrund der generell hohen Ergiebigkeiten wasserwirtschaftlich intensiv genutzt. Problematisch zeigt sich dabei die häufig durch anthropogene Stoffeinträge beeinträchtigte Grundwasserqualität. Das oberflächennahe Grundwasservorkommen ist im Allgemeinen als sehr verschmutzungsempfindlich zu bewerten. Die Talfüllungen spielen zudem als hydraulische Entlastungszonen für die Grundwasservorkommen im Festgestein eine bedeutende Rolle.

2 Oberflächengewässer

Die Planungsregion teilt sich entlang der Hauptwasserscheide zwischen Saale und Main im NE in die zwei hydrogeographischen Großräume des Rhein- und Elbeeinzugsgebietes. Dabei wird ein flächenmäßig unbedeutender Teil (55 km²) über die Loquitz nach N zur elbtributären Saale entwässert. Der übrige Teil der Planungsregion gehört zum Einzugsgebiet des Mains (3 620 km²) bzw. zum übergeordneten Rheineinzugsgebiet. Main und Regnitz bilden zusammen die zentrale Flussachse der Region und stellen mit einer Vielzahl von Nebenflüssen die Vorfluter für die meisten Grundwässer der Region dar. In Abhängigkeit wechselnder Gebirgsdurchlässigkeiten und Niederschlagsverhältnisse in den Teileinzugsgebieten entwickelten sich charakteristische Gewässernetze. Im Keuper-Bergland und Frankenwald sind sie weit verzweigt und dicht. In der Fränkischen Alb dagegen ist es nur sporadisch entwickelt, bisweilen auch völlig fehlend. Weitere Details hierzu finden sich unter Kapitel 3. Neben den Fließgewässern existieren zudem zahlreiche stehende Gewässer, die – soweit bekannt – ausnahmslos durch menschliche Eingriffe entstanden sind. Die folgende Beschreibung der Oberflächengewässer gliedert sich in die Abschnitte zu den Einzugsgebieten von Main und Regnitz. Die hydraulischen und geologischen Besonderheiten der Talzüge von Main, Regnitz und ihren Nebenflüssen werden insbesondere im Kapitel 3.2.8 eingehend behandelt und hier nur im Ansatz erläutert.

Der Main tritt östlich Burgkunstadt im Bereich des südlichen Obermain-Bruchschollenlandes aus SE kommend in die Planungsregion ein und fließt dort in einem breiten Tal Richtung NW. Bei Altenkunstadt nimmt er linksseitig den Weismain auf. Im weiteren Verlauf des Mains mündet bei Marktzeuln rechtseitig die Rodach ein. Bei Lichtenfels verlässt er das Obermainische Schollenland und setzt seinen Weg Richtung SSW durch das Itz-Baunach-Hügelland fort. Dort durchfließt er die Maintalauen in zahlreichen Mäandern. Bei Staffelstein tritt linksseitig der Lauterbach ein, der u. a. durch die stark schüttenden Karstquellen von Serkendorf und Schwabthal/End gespeist wird. Im weiteren Verlauf nimmt er bei Breitengüßbach rechts die Baunach und Itz und später bei Hallstadt links den aus der Nördlichen Frankenalb kommenden Leitenbach auf. Letzterer erhält u. a. Zuflüsse aus den stark schüttenden Karstquellen unterhalb Wattendorf. Nach wenigen Kilometern erreicht der Main Bamberg. Etwa auf der Höhe von Bischberg vereinigt sich die von Süden kommende Regnitz bzw. der Main-Donau-Kanal mit dem Main. Der biegt in westliche Richtung ab, tritt in die Ausläufer der Hassberge ein und verlässt die Planungsregion bei Staffelbach. Innerhalb der Planungsregion verringert sich das Sohlgefälle des Mains oberhalb Schwüritz von 0,85‰ auf 0,65‰ bei Hallstadt.

Der Weismain entspringt im Malmkarst in Kleinziegenfeld und nimmt seinen Lauf über knapp 20 km durch die Jura-Schichtstufe. Neben kleineren Zuflüssen nimmt er zwischen Weismain und Woffendorf die Krassach auf. Er bildet eine lokale Vorflut für den Malmkarst und untergeordnet auch für die liegenden Grundwasserstockwerke im Jura und Keuper. Die Rodach entspringt am Rennsteig in Thüringen. Sie tritt über die bayerische Grenze in die Planungsregion bei Nordhalben ein und entwässert zunächst den Frankenwald dem Schichtstreichen und der Bruchtektonik folgend nach SW. Südlich Nordhalben nimmt sie die Ködel auf, die aus den Bächen Tschirner, Ködel und der bei Mauthaus zur Ködeltalsperre aufgestauten Nordhalbener Ködel entsteht. Bis sie bei Marktzeuln in den Main mündet, durchfließt die Rodach das Obermain-Schollenland und dräniert zusammen mit ihren Zuflüssen Steinach, Haßlach und Kronach vor allem die Grundwasservorkommen im Buntsandstein und Keuper. Die Itz entspringt im Thüringer Wald und strebt nach Süden dem Main entgegen. Auf ihrem Weg tritt sie bei Weißenbrunn im Buntsandstein des Obermainischen Bruchschollenlands in die Planungsregion ein. Zwischen Rödental und Coburg fließt sie auf der Nördlichen Gipskeuperplatte. Zuletzt durchläuft sie das Itz-Baunach-Hügelland, nimmt bei Schenkenau die von rechts kommende Rodach auf und mündet bei Breitengüßbach in den Main. Ab Coburg bildet die Itz zusammen mit ihren Zuflüssen hauptsächlich für das Grundwasser aus dem Sandsteinkeuper

eine bedeutende Vorflut. Weiter westlich ist in diesem hydraulischen Kontext auch noch das Flusssystem der Baunach zu nennen. Stromaufwärts von Coburg dräniert die Itz zusammen mit Lauter und Röden vor allem Grundwasser aus dem Muschelkalk und Buntsandstein.

Im Einzugsgebiet des Mains existieren außerhalb des Haupttals mit Ausnahme der Talsperre Mauthaus und des Neuensees nördlich Michelau keine nennenswerten Stillgewässer. Die meisten wegen ihrer geringen Größe unbedeutenden Seen reihen sich entlang einzelner Fluss- und Bachtäler auf und dienen in der Regel der Fischzucht. Sie werden entweder vom nächsten Fließgewässer oder durch Quellen gespeist. Eine Grundwasseranbindung ist meist nur bei durchlässiger Talfüllung gegeben. Dagegen besteht im Maintal über weite Strecken ein nicht unwesentlicher Flächenanteil aus beim Abbau von Sand und Kies entstandenen Stillgewässern. Die Grundwasseranbindung ist altersbedingt recht unterschiedlich ausgeprägt, so dass Grundwasser- und Seeoberfläche stellenweise nur bedingt miteinander korrespondieren.

Die Regnitz ist der zweitwichtigste Vorfluter der Planungsregion. Sie tritt bei Baiersdorf SW Forchheim von S in die Planungsregion ein, fließt – wie der Main zwischen Zapfendorf und Bamberg – parallel zum Albrand am Fuß der Juraschichtstufe und strebt durch die Regnitzsenke dem Main nach N zu. Linksseitig, aus dem Steigerwald sowie der Nördlichen und Östlichen Keuperabdachung kommend, münden auf diesem Weg die Aisch bei Trailsdorf, die Reiche Ebrach bei Hirschaid, die Rauhe Ebrach NE Pettstadt und die Aurach nördlich von Pettstadt in die Regnitz. Sie bilden zusammen mit der Regnitz die wesentlichen Vorfluter für die Grundwasservorkommen im Sandsteinkeuper. Allen gemeinsam ist die dem großräumigen Schichteinfallen folgende Fließrichtung nach SE. Die rechtsseitigen kleineren Regnitznebenflüsse entspringen meist an der Dogger-Alpha/Dogger-Beta-Grenze entlang des Albraufs. Wichtigster rechtsseitiger Nebenfluss der Regnitz ist die bei Forchheim einmündende Wiesent (s.u.), die die Malmhochfläche des Untersuchungsgebietes entwässert. In den 39 km von Baiersdorf bis Bamberg hat die Regnitz ein durchschnittliches Gefälle von 0,7‰. Die Regnitz ist im S der Planungsregion in großen Abschnitten als Teil des Main-Donau-Kanals kanalisiert. Erst ab Neuses a. d. Regnitz fließen Regnitz und Main-Donau-Kanal weitgehend getrennt. Die Regnitz mäandriert dort in ihrem natürlichen Flussbett. NW Bamberg vereinigen sich Kanal und Fluss wieder. Der Main-Donau-Kanal hat auf der Strecke von Forchheim bis Bamberg zwei Schleusen W Strullendorf und SW Bamberg sowie drei Wehre bei Hausen, Buckenhofen und nördlich Neuses a. d. Regnitz.

Die Wiesent entwässert große Teile der Nördlichen Frankenalb. Sie entspringt ebenso wie ihr Nebenfluss Aufseß im Malm Delta und fließt dann zunächst nach SE. Tief in die Malmtafel eingeschnitten verlässt sie nach wenigen Kilometern bei Treunitz die Region. Im weiteren Lauf biegt sie bei Wiesentfels nach ENE ab, um sich bei Freienfels wieder in die ursprüngliche Richtung zu wenden und durch das Zentrum der Hollfelder Mulde zu fließen. Linksseitig fließen N Hollfeld die Kainach zu und in Plankenfels die Truppach. Auf der Malmhochfläche verliert die Wiesent zwischen Hollfeld und Plankenfels Wasser an den Untergrund (APEL & BÜTTNER 1995). Bei Waischenfeld ändert sie abermals ihre Richtung nach SW. Bei Doos vereinigt sich die Wiesent mit der Aufseß, richtet sich erneut nach SE und tritt anschließend in die Planungsregion ein, vereinigt sich kurz darauf mit der Püttlach und fließt danach in entgegengesetzte Richtung. Ab Muggendorf schneidet die Wiesent den Dogger an und wendet sich bei Streitberg erneut nach SW. In Gasseldorf mündet linksseitig die Leinleiter ein, die ihren Ursprung in den Mergelkalken des Malm Alpha/Beta hat und wie die Aufseß der Hauptkluftrichtung tief eingeschnitten in südöstliche Richtung folgt. Bevor die Wiesent nach 78,9 km bei Forchheim in die Regnitz mündet, nimmt sie in Pretzfeld die linksseitig kommende Trubbach auf, die ebenfalls im Malm entspringt. Der Höhenunterschied der Wiesent von der Quelle zur Mündung beträgt 195 m (KANZ et al. 1978).

Als Besonderheit erwähnenswert und charakteristisch für die Malmtafel sind die im Karst häufig vorkommenden Trockentäler. Diese führen nur episodisch oder periodisch nach der Schneeschmelze oder starken Niederschlagsereignissen Wasser. Dabei erfolgt die Wasserführung meist in den unteren Talbereichen, in denen oft „Hungerbrunnen“, sogenannte Tummler, austreten. Beispiele sind das obere Leinleitertal zwischen Poxdorf und den Leinleiterquellen, der Köttler Grund zwischen Köttel und N Arnstein, das Schederndorfer Tal/Paradiesttal zwischen Wattendorf und N Treunitz, das Klingental zwischen Ludwag und Königsfeld, das Kleinziegenfelder Tal SE Kleinziegenfeld, das Bärenthal E Wunkendorf, der Teichgrund N Kotzendorf, das Krumme Tal SE Großenohe und das Pitztal zwischen Obertrubach und Leupoldstein sowie die im N angrenzenden Täler Grundleintal und Teichtal.

Stillgewässer im Einzugsgebiet der Regnitz sind gleichen Ursprungs wie im Main Einzugsgebiet. Größere aus dem Abbau von Sand und Kies entstandene Seeflächen existieren nur im Regnitztal und besitzen meist einen Grundwasseranschluss. Im Keuper-Bergland liegen dagegen viele künstlich angelegte kleinere Seen verstreut. Stauende Tonsteinschichten und zahlreiche Quellaustritte und -bäche schaffen besonders günstige Voraussetzungen hierfür. In einigen Seitentälern sind, bedingt durch die regionstypische Teichwirtschaft, längere Weiherketten entwickelt. Im Aischgrund und den südlich anschließenden Keuperplateaus nehmen die Weiher einen nicht unwesentlichen Anteil der Fläche ein. Mit wenigen Ausnahmen dürften sie keine direkte Grundwasseranbindung aufweisen, wenngleich auch isolierte oberflächennahe Grundwasserhorizonte episodisch und direkt in die Gewässer drainieren können. Dies geschieht vor allem im Bereich mächtigerer sandiger Verwitterungsdecken.

3 Hydrogeologischer Bau und Grundwasserdynamik

3.1 Datengrundlage und Methodik

3.1.1 Datengrundlage

Die wesentliche Grundlage bilden die im Rahmen der hydrogeologischen Landesaufnahme erfassten und ausgewerteten Daten von Bohrungen, Brunnen, Grundwassermessstellen und Quellen. Diese wurden an den für die Region zuständigen Wasserwirtschaftsämtern, Landratsämtern, Gesundheitsämtern und sonstigen Behörden sowie Gemeinden, Ingenieurbüros, Bohrfirmen, Energieversorgungsunternehmen u.a. erhoben. Ergänzend hierzu wurden eigene Geländeerkundungen und Recherchen bei Firmen und Privatpersonen durchgeführt. Darüber hinaus erfolgten eine Quellenkartierung und die Durchführung von 5 Forschungsbohrungen im Sandsteinkeuper.

Insgesamt wurde ein umfangreicher zentraler Datenpool von ca. 10 000 geowissenschaftlichen Objekten im Umgriff der Region geschaffen, welcher im digitalen Bodeninformationssystem Bayern (BIS-BY) des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (BayLfU) zugänglich ist. Dort sind neben den allgemeinen Stammdaten zum Teil auch Schichtprofile, Ausbaupläne, Wasserstände, Pumpversuchs-, Mess- und Analysendaten erfasst. Wo es möglich erschien, wurden stratigraphische Einstufungen zu den Schichtenverzeichnissen vorgenommen.

Grundlage für die flächenhafte Darstellung der hydrogeologischen Einheiten und Deckschichten im Maßstab 1:100 000 waren die verfügbaren Geologischen Karten 1:25 000, 1:200 000 und diverse Diplommkartierungen der Universitäten Würzburg und Erlangen-Nürnberg sowie diverse Spezialliteratur (Literaturverzeichnis). Für die Blattsnitte Coburg, Pfarrweisach und Neustadt b. Coburg wurden Neukartierungen beauftragt. Unter Kapitel 8 erfolgt eine detaillierte Auflistung der verwendeten Kartengrundlagen.

3.1.2 Methodik

Grundwasseroberfläche

Die Konstruktion der Grundwassergleichenpläne erfolgte zunächst rechnergestützt mit dem Softwarepaket Surfer 7.0 (GOLDEN SOFTWARE 2002) und ArcGIS 9.1 (ESRI). Tabelle 3-1 gibt einen Überblick der verwendeten Daten zu den einzelnen Grundwasserleitern; zur räumlichen Verteilung siehe Blatt 2 Grundwasserhöhengleichen.

Tab. 3-1: Stützpunkte zur Konstruktion der Grundwasserhöhengleichen einzelner Grundwasserleiter (OFW: Oberflächengewässer)

Grundwasserleiter (-komplex)	Brunnen + GWM	Bohrung	Quelle	OFW	Hilfspunkt	Gesamt
Buntsandstein	153	9	1		15	178
Muschelkalk	33	45	1		7	86
Sandsteinkeuper	890	111	96		270	1367
Malm	31	10	64			105
Quartär	1209			365		1574

Da generell eine sehr ungünstige räumliche Verteilung der Stützpunkte vorlag, wurden die überwiegend mit Triangulations (TIN)- und Kriging-Verfahren erstellten Gleichenpläne händisch grundlegend überarbeitet und angepasst. Zur Erleichterung der halbautomatischen Vorgehensweise wurden in Bereichen mit geringer Datendichte oder an hydrographischen Grenzen (z.B. Vorfluter) zusätzlich Hilfspunkte gesetzt. Für Teilgebiete wurden entlang der postulierten Vorfluter auch Tiefenlinien nach dem Verfahren von JENSON & DOMINGUE (1988) aus dem Digitalen Höhenmodell automatisch extrahiert und als Extremwerte bei der Interpolation der Grundwassergleichen eingesetzt.

Die verwendeten Grundwasserhöhen der Festgesteinsaquifere beruhen im Wesentlichen auf Messungen von Mischpotentialen, zum Teil zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelt. Deshalb wurden unter Berücksichtigung eines typischen langjährigen Grundwassergangs entsprechende Toleranzen zugelassen und so die Grundwasseroberfläche geglättet. Diese stellt daher in einigen Fällen nur eine Annäherung dar.

Für das Quartär wurde eine Stichtagsmessung durchgeführt. Die Vorgehensweise ermöglichte echte, auf einen Tag bezogene Stichtagsmessungen für definierte Haupttalabschnitte (Kap. 3.2.8, Abb. 3-10). Am ersten Tag wurde das Regnitz- und Maintal gemessen, am zweiten das Obermaintal. Am dritten Tag erfolgten überwiegend Kontroll- und Ergänzungsmessungen. Um die Verbindung zwischen den Haupttälern zu gewährleisten, wurden die Werte im Bamberger Kessel an allen Tagen registriert. Ebenso im gesamten Zeitraum wurde an ausgewählten Stellen mehrfach gemessen, um eventuelle Schwankungen bei der anschließenden Modellierung berücksichtigen zu können. Gemessen wurden Grundwassermessstellen mit und ohne Sonde, öffentliche und private Schacht- und Bohrbrunnen sowie zahlreiche Oberflächengewässer (Flüsse, Bäche, Gräben und Seen). Die Messungen an Grundwassermessstellen und Brunnen ohne Sonden erfolgten mit dem Lichtlot. Die Wasserstände an den Oberflächengewässern wurden entweder direkt mit einem hochauflösenden GPS eingemessen oder über vorhandene Festpunkte an Brücken, Stegen oder ähnlichen gewässerspezifischen Bauwerken mit dem Lichtlot ermittelt. Alle Objekte ohne absolute Höhenlage wurden im Zuge der Vorbereitung, während der Stichtagsmessung, oder im Nachgang mit dem oben genannten GPS und ggf. auch einem Laser-Nivellement eingemessen. An den Grundwasserstandsmessungen waren neben hauseigenem Personal zahlreiche Dritte beteiligt.

Nach Zusammenführung und Prüfung aller Messwerte erfolgte die rechnergestützte Modellierung der Grundwasseroberfläche. Aufgrund der ungünstigen Aquifergeometrie erbrachten dabei abschnittsweise durchgeführte Interpolationen (Universal Kriging) und anschließende manuelle Überarbeitungen die besten Ergebnisse.

Hydraulische Kennwerte

Zur Charakterisierung der hydraulischen Kennwerte der hydrogeologischen Einheiten erfolgte an insgesamt 853 Objekten (hauptsächlich Brunnen und untergeordnet Grundwassermessstellen) die Auswertung von Pumpversuchsdaten unter quasistationären Strömungsverhältnissen. Die Auswertungen erfolgten unter Berücksichtigung gespannter oder ungespannter Grundwasserverhältnisse nach DUPUIT/THIEM (z.B. in LANGGUTH & VOIGT 2004). Bei mehrstufigen Pumpversuchen wurde für jede Laststufe ein k_f -Wert berechnet und daraus der Mittelwert für das Einzelobjekt ermittelt. Brunnen und Grundwassermessstellen waren vielfach unvollkommen ausgebaut, was die Interpretation und den Vergleich der Ergebnisse erschwert. Um den gesamten Zustrom zum Brunnen zu erfassen, wurde für die Mächtigkeit des Grundwasserleiters generell die gesamte Strecke des Filterkieses gewählt. Für den wirksamen Brunnenradius ging der Bohrdurchmesser in die Berechnungen ein. Die Häufigkeitsverteilungen der k_f -Werte-Bereiche sind in Diagrammen dargestellt.

Den quasistationären Berechnungen wurden zum Vergleich verfügbare k_f -Werte aus der Literatur (in der Regel Gutachten privater Fachbüros) gegenübergestellt. Sie entstammen meist einer Auswertung von Pumpversuchen unter instationären Strömungsverhältnissen, weshalb mit rein verfahrensbedingten Unterschieden zwischen den gegenübergestellten Werten zu rechnen ist.

Zusätzlich ist die spezifische Ergiebigkeit der hydrogeologischen Einheiten angegeben, die streng genommen nur für gespannte Grundwasserverhältnisse gilt. Bei freiem Grundwasser kann sie in Abhängigkeit von Fördermenge und Absenkung unterschiedliche Werte aufweisen. Trotz gewisser Einschränkungen liefert dieser Quotient eine brauchbare Grundlage für Vergleiche (HÖLTING & COLDEWEY 2005).

3.2 Hydrogeologische Einheiten

In der Planungsregion Oberfranken West wird ein vielschichtiger Grundwasserstockwerksbau angetroffen, der sich – vereinfacht – aus einer konkordanten sedimentären Abfolge permischer, triassischer und jurassischer Einheiten mit unterschiedlichen hydrogeologischen Eigenschaften ergibt. Diese Einheiten grenzen lokal diskordant oder tektonisch bedingt an quartäre und altpaläozoische Schichtfolgen an, die ebenso einen spezifischen hydrogeologischen Charakter aufweisen. In Abb. 3-1 ist der für die Planungsregion relevante Stockwerksbau anhand einer geologisch-hydrogeologisch klassifizierten Profilabfolge der hydrogeologischen Einheiten als Übersicht schematisch dargestellt. Auf einzelne Stockwerke bzw. Einheiten wird in den folgenden Unterkapiteln näher eingegangen. Sie werden in Abhängigkeit ihrer regionalen Verbreitung und Bedeutung sowie der Datenlage in unterschiedlicher Ausführlichkeit nach dem generellen Muster Vorkommen, Aufbau und Grundwasserführung, Grundwasseroberfläche, hydraulische Kennwerte und Quellen beschrieben. Die im Stockwerksbau als Geringleiter ausgewiesenen Einheiten werden hierbei nicht gesondert aufgeführt, sondern in ihren funktionellen Eigenschaften als Überdeckung bzw. Sohlschicht eines Grundwasserleiters an entsprechender Stelle erwähnt.

Die oberflächennahe Verbreitung und hydrogeologische Klassifizierung der wesentlichen Einheiten sind auf den Kartenbeilagen Blatt 1 und Blatt 3 dargestellt.

3.2.1 Paläozoikum

3.2.1.1 Älteres Paläozoikum

Die altpaläozoischen Gesteine treten im nördöstlichsten Teil der Planungsregion zu Tage. Sie bilden den Mittelgebirgszug des Frankenwaldes, der sich entlang der Fränkischen Linie landschaftlich vom westlich angrenzenden Bruchschollenland absetzt.

Hydrogeologischer Bau und Grundwasserführung

Lithologisch gesehen handelt es sich um die sogenannten Anchimetamorphite des Frankenwälder Paläozoikum. Sie bestehen im Wesentlichen aus einer Abfolge von schieferigen Tonsteinen, Grauwacken und Quarziten. Seltener sind auch Karbonate (z.B. Ockerkalke) eingeschaltet. Lokal ist diese Folge durchsetzt von basischen Vulkaniten und tertiären Ganggesteinen. Stratigraphisch reichen die sedimentären Schichten vom Ordoviz bis ins Unterkarbon.

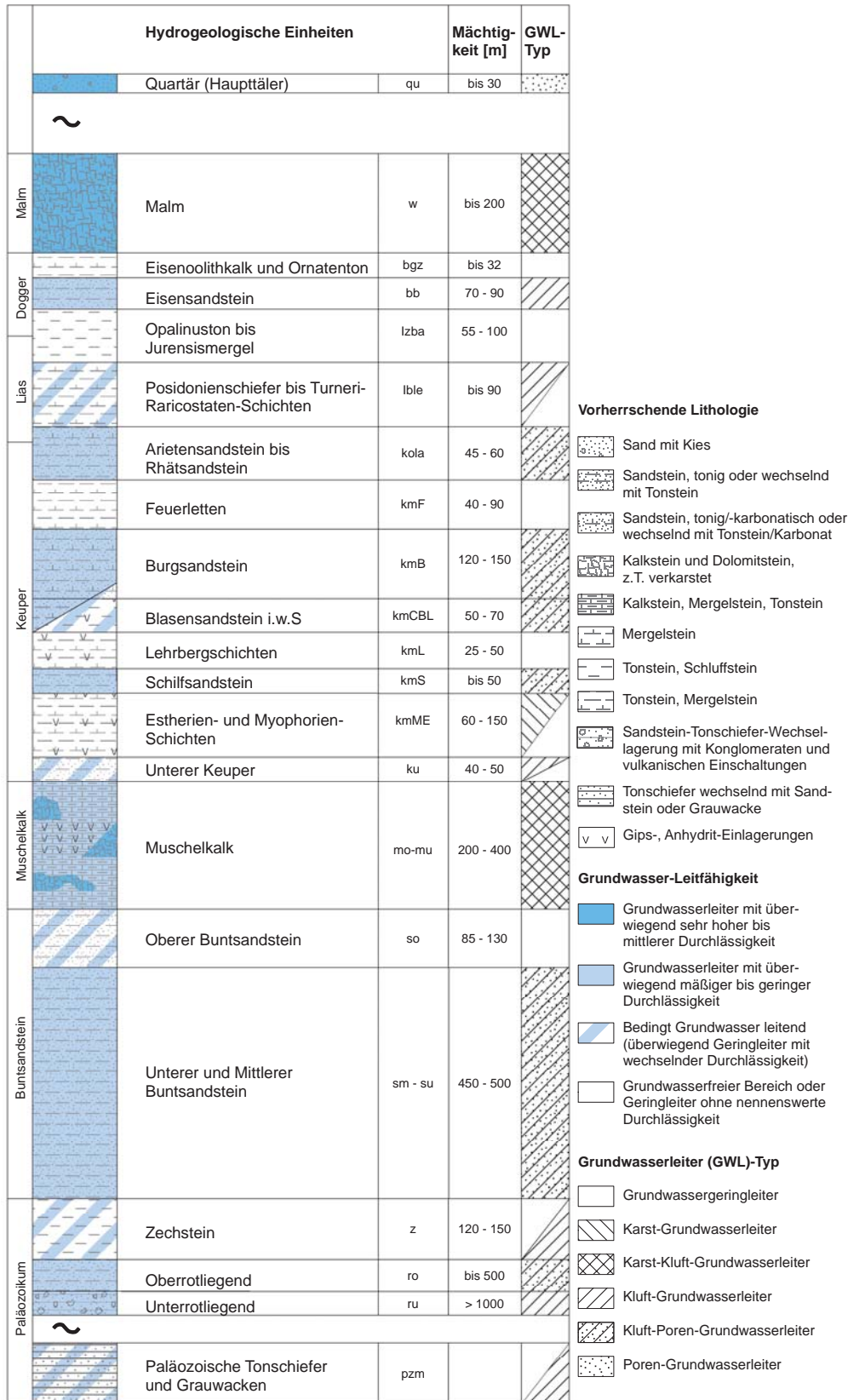


Abb. 3-1: Schematische Profilabfolge der hydrogeologischen Einheiten in der Planungsregion Oberfranken West.

Im unverwitterten Zustand sind die vorherrschenden Gesteine hydrogeologisch generell als dicht einzustufen. Abgesehen von lokal mächtigeren Verwitterungsdecken mit Staunässebildung und Quellaustritten sowie einzelnen Talfüllungen handelt es sich um einen ausgesprochenen Kluftgrundwasserleiter. Durch tektonische Beanspruchungen liegen bereichsweise starke Auflockerungen vor. Besonders im Gefolge von Verwerfungen scharen sich die Klüfte, von denen vermutlich ein großer Teil offen und damit wasserwegsam ist. Die häufig ganzjährig schüttenden Quellen deuten stellenweise auf weitreichende Hohlräumssysteme für Speicherung und Transport von Grundwasser hin. Da sich die Klüfte zur Tiefe hin zunehmend verengen und zum Teil auch verschließen, dürfte der Hauptwasserumsatz im Festgestein relativ oberflächennah oder in verwerfungsnahen Bereichen stattfinden. Ansonsten ist der paläozoische Gesteinsverband eher als Geringleiter zu betrachten. Dabei lässt sich in Abhängigkeit des Kluftgefüges eine Abstufung vornehmen. Am besten geklüftet sind die Kalkgesteine (z.B. Ockerkalke), gefolgt von den Grauwacken und Quarziten, deren Kluftgefüge in der Regel wasserwegsam ist als das der Tonschiefer, die in dieser Abstufung den Abschluss bilden (APEL 1982).

Hydraulische Kennwerte

Aus den Pumpversuchen der insgesamt 28 zwischen 10 m und 102 m tiefen Brunnen, die den paläozoischen Grundwasserleiter erschließen, berechnen sich Durchlässigkeiten von $1,6 \cdot 10^{-7}$ bis $6,0 \cdot 10^{-5}$ m/s, wovon etwa 80% zwischen $1 \cdot 10^{-5}$ und $4 \cdot 10^{-7}$ m/s liegen. Das Diagramm in Abbildung 3-2 zeigt eine bimodale Verteilung der k_f -Werte. Über weite Strecken durchschnittliche Durchkluftungsgrade des Gebirges ergeben geringere Werte. Bei den höheren Durchlässigkeiten zeigt sich hingegen stärker ein tektonischer Einfluss und in Einzelfällen auch die hydraulische Wirkung Wasser führender Deckschichten.

Eine Aufschlüsselung der Werte nach den unterschiedlichen Gesteinsarten ergibt keine signifikanten Unterschiede. Für die Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge errechnen sich Durchlässigkeiten zwischen $3,0 \cdot 10^{-7}$ bis $6,0 \cdot 10^{-5}$ m/s. In den Tonschiefer-Serien reichen sie von $1,6 \cdot 10^{-7}$ bis $1,5 \cdot 10^{-5}$ m/s. Im Ockerkalk, der Quarzit-Tonschiefer-Wechselfolge und der Kalkstein-Tonschiefer-Wechselfolge ergeben sich Werte von $4,0 \cdot 10^{-6}$ m/s bis $1,3 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Die ermittelten spezifischen Ergiebigkeiten erreichen Werte von 0,006 bis 0,69 l/(s·m).

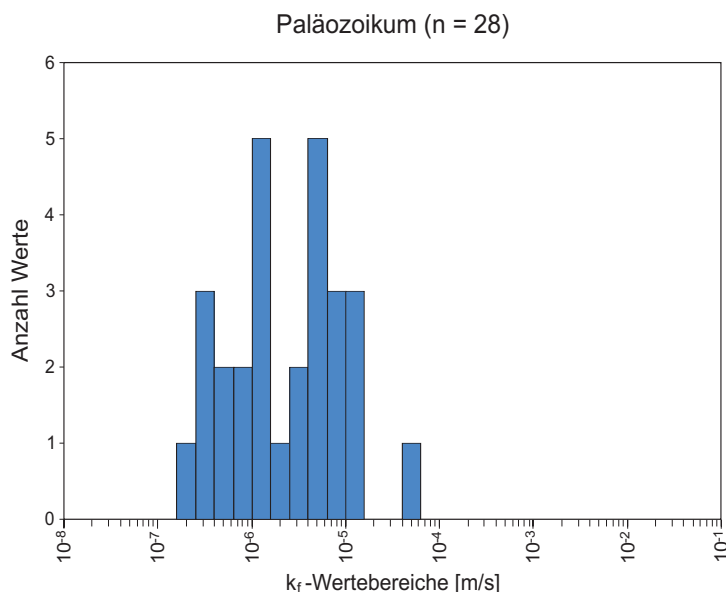


Abb. 3-2: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte altpaläozoischer Einheiten des Frankenwaldes.

Grundwasseroberfläche

Für die Konstruktion eines Grundwassergleichenplans wurden Grundwasserstände von etwa 800 Stützpunkten (Brunnen, Grundwassermessstellen, Erkundungsbohrungen und Quellen) herangezogen. Dazu zählen auch Höhenangaben von diversen Fließgewässern der TK25. In Kulminationsbereichen wurde nach Erfahrungswerten ein Flurabstand von etwa 30 m angenommen. Trotz der Vereinfachungen der Eingangsdaten ergab sich ein plausibles, gleichmäßiges, an den Vorflutern orientiertes Fließschema. Dabei wird auch die Hauptwasserscheide im Norden des Untersuchungsgebiets deutlich. Sie erstreckt sich am Rennsteig entlang der Staatsstraße 2209 NE Kleintettau über Steinbach a. Wald in Richtung des Eppenberges. Südlich dieser Scheide entwässert das System über Haßlach, Rodach und Kronach zum Main hin, nördlich davon über Saale und Nebenflüsse zur Elbe hin.

Die Grundwasseroberfläche ist aufgrund des Generalisierungsgrads und der Tatsache, dass kein über das gesamte Gebiet zusammenhängender Grundwasserkörper zu erwarten ist, nur als grobe Trendfläche zu sehen. Sie wurde deshalb explizit nicht auf Blatt 3 der Kartenbeilagen dargestellt, sondern nur zur Berechnung der Schutzfunktion (Kap. 6) eingesetzt.

Quellen

Das Altpaläozoikum hebt sich durch die sehr hohe Quellen- und Gewässernetzdichte deutlich von den anderen hydrogeologischen Einheiten ab. Der Grund hierfür liegt vor allem im oberflächennahen Grundwasserumsatz, der eine über weite Strecken zur Tiefe hin abnehmende Durchlässigkeit nahelegt. Mit 143 kartierten Quellen wurde im Rahmen dieser Bearbeitung nur ein Teil erfasst. Davon treten 40 im Ausbiss der Grauwacken, 51 im Bereich der Tonschiefererien und 31 im Ausbiss der Grauwacken-Tonschiefer-Wechselfolgen aus. Darüber hinaus wurden 21 Quellen kartiert, die aus Quarziten (9), Konglomeraten (4), Karbonatgesteinen (4), Vulkaniten (3) und Ganggesteinen (1) entspringen. Die durchschnittliche gemessene Schüttung aller ausgewerteten Quellen liegt bei 0,7 l/s, als Minimalwert ist 0,02 l/s zu verzeichnen und als Maximum 3,0 l/s. Die Quellen sind als Stau- oder Schichtquellen mit perennierender Schüttung anzusprechen, zum geringeren Teil als Verengungsquellen. An Störungen lassen sich ca. 45 Quellaustritte lokalisieren.

Etwa 35 Quellen wurden bzw. werden zur öffentlichen Wasserversorgung herangezogen. Dabei handelt es sich fast durchwegs um Wasseraustritte aus den Tonschiefererien mit durchschnittlichen Schüttungen von 0,5 l/s.

Die Größenordnungen der Schüttungen zeigen kaum Unterschiede zwischen den lithologischen Einheiten, wobei die Quellen aus den Tonschieferfolgen mit durchschnittlich 1 l/s tendenziell höhere Werte aufweisen. An drei Quellen im silurischen Ockerkalk wurden Schüttungen zwischen 1,0 und 1,8 l/s ermittelt.

3.2.1.2 Rotliegend

Zwischen den Orten Stockheim, Rothenkirchen und Posseck treten Gesteine des Rotliegend zu Tage. Tektonisch gesehen handelt es sich um zwei grabenartig eingesenkte Schollen, die von SSE-streichenden Verwerfungen begrenzt werden (v. HORSTIG 1979).

Hydrogeologischer Bau und Grundwasserführung

Die Rotliegend-Abfolge gliedert sich in Unterrotliegend und Oberrotliegend, wobei Erstere aus konglomerathaltigen Sandstein-Tonstein-Wechselfolgen mit vulkanischen Einschaltungen und dem Stockheimer Steinkohlenflöz nahe der Untergrenze besteht. Im Oberrotliegend überwiegen Rotsedimente, teils als tonhaltige Sandsteinablagerungen, teils als grobe Fanglomerate. Die Sedimentabfolge des Unterrotliegend kann deutlich über 1000 m mächtig werden, die des Oberrotliegend bis zu 500 m (FREUDENBERGER 1996).

Die beiden Rotliegend-Schollen entlang des Haßlachtales weisen im Vergleich zu den umgebenden Einheiten des älteren Paläozoikum günstigere Voraussetzungen für eine Grundwasserwegsamkeit und -speicherfähigkeit auf. Sie stellen in erster Linie einen Kluftgrundwasserleiter dar. Stellenweise wird der nutzbare Hohlraum durch mürbe und poröse Sandsteine ergänzt. Die Trennflächen bilden zusammen mit den Poren einen in seiner hydraulischen Wirksamkeit variierenden Hohlraum. Der Wasserdurchsatz ist dabei im Kluftraum wesentlich größer als im Porenraum. Über Klüfte entlang der Verwerfungszonen kommt es zu Entwässerungen der Wasser führenden paläozoischen Schichten, die die Rotliegend-Schollen umschließen. Vergleiche von Grundwasserspiegellagen lassen auf ein Gefälle vom Unterkarbon ins Rotliegend schließen, das selbst wiederum durch die Vorflut-Wirkung der Haßlach beeinflusst wird (APEL 1979).

Hydraulische Kennwerte

Aus den Pumpversuchen der 11 zwischen 10 m und 160 m tiefen Brunnen wurden unter Voraussetzung freier Grundwasserspiegel relativ geringe Durchlässigkeiten zwischen $5,4 \cdot 10^{-7}$ bis $2,4 \cdot 10^{-5}$ m/s berechnet. Die ebenfalls aus den Pumpversuchen ermittelten spezifischen Ergiebigkeiten liegen in einem Bereich von 0,12 bis 0,33 l/(s·m), wobei ein Extremwert mit 1,95 l/(s·m) zu verzeichnen ist. Dieser wurde an einem Brunnen im Haßlachtal festgestellt und weist auf einen hydraulischen Kontakt zur überlagernden quartären Talfüllung hin.

Quellen

Für das Rotliegend sind im Untersuchungsgebiet insgesamt 19 Quellen erfasst worden, wovon 2 im Ausbiss des Oberrotliegend, 16 im Unterrotliegend und eine im Bereich der porphyrischen Vulkanite austreten. Daneben existieren nach der TK25 zahlreiche weitere Grundwasseraustritte, die sich u. a. auch durch flächenhafte Vernässungen und Feuchtgebiete kennzeichnen. Die gemessenen Schüttungen reichen von 0,05 bis 1 l/s; im Durchschnitt liegen sie bei 0,2 l/s. Die Maximalwerte mit jeweils 1 l/s wurden bei zwei flächenhaft am Fuß des Rothen-Berges, östlich des Marktes Pressig, austretenden Quellen ermittelt. Überdurchschnittlich hohe Schüttungen (0,3 bis 0,5 l/s) treten an zwei weiteren Quellen entlang des Störungskontaktes zum Paläozoikum auf.

Die meisten Quellen wurden als Stauquellen mit perennierender Schüttung kartiert; zum Teil stellen sie auch Verengungsquellen dar. Nur zwei wurden als episodisch schüttend eingestuft. Vier der im Rotliegend erfassten Quellen wurden bzw. werden zur Wasserversorgung des Marktes Pressig herangezogen. Einige Quellen dienen auch zur Speisung von Fischteichen.

3.2.1.3 Zechstein

Der Zechstein streicht im NE der Planungsregion aus. Der Schichtstoß besteht überwiegend aus Schluffsteinen mit plattendolomitischer Zwischenschaltung. Sie werden von dolomitischem Kalkstein und schieferartigem Tonstein unterlagert. An der Basis liegt kupferhaltiger, dolomitischer Tonstein in schieferiger Ausprägung vor. Die beschriebene Abfolge befindet sich NW Kronach zwischen Burggrub und Haig und wurde dort bei NW–SE-Streichen und steilem Einfallen nach SW mit maximaler Ausbissbreite von ca. 190 m kartiert (KGL. BAYER. OBERBERGAMT 1892).

Im Geotopkataster des BayLfU ist ein Aufschluss von Zechstein-Tonsteinen an einer Straßenböschung in Burggrub verzeichnet (Geotopnummer: 476A003 BayLfU -Geotopkataster).

Im Zechstein sind weder Brunnen oder Bohrungen, noch Quellaustritte belegt, so dass er aus hydrogeologischer Sicht nur überschlägig als Mischtyp aus Kluftgrundwasserleiter und -geringleiter mit geringer Trennfugendurchlässigkeit beschrieben und eingestuft werden kann. Er bildet in der Region die Grundwassersohlschicht des Grundwasserstockwerks im hangenden Buntsandstein.

3.2.2 Buntsandstein

Die Schichten des Buntsandstein streichen im NE der Planungsregion Oberfranken West im NW–SE gerichteten oberfränkischen Bruchschollenland aus. Das Gebiet wird im E durch die Landesgrenze und im W über weite Strecken durch die Kulmbach-Eisfelder-Störungszone begrenzt. Großräumig fallen die Schichten nach SW ein. Sie erreichen innerhalb der Planungsregion Mächtigkeiten bis 600 m. Nach hydrogeologischen Gesichtspunkten lässt sich der Buntsandstein in zwei wesentliche Einheiten gliedern: in den Unteren und Mittleren sowie in den Oberen Buntsandstein.

Hydrogeologischer Bau und Grundwasserführung

In der Planungsregion sind die Schichten des ca. 200 m mächtigen Unteren Buntsandstein nur im nordwestlichen und südwestlichen Teil des Bruchschollenlandes innerhalb eines schmalen Streifens obertägig aufgeschlossen. Die Basis bilden Tonstein-Sandstein-Wechselfolgen. Darauf folgen grob- bis feinkörnige, tonig oder quarzitisches gebundene Sandsteine, die in Abhängigkeit des Verwitterungsgrads sowie der Ausprägung des Bindemittels in festen bis mürben Gesteinsverbänden auftreten.

Die Sedimentationsfolgen des bis über 200 m mächtigen Mittleren Buntsandstein streichen überwiegend im nordwestlichen und zentralen Teil des Bruchschollenlands obertägig aus. Allgemein besteht er aus fein- bis grobkörnigen, schlecht sortierten, feldspatreichen Sandsteinen, die toniges, karbonatisches, kieseliges bis eisenhaltiges Bindemittel aufweisen. Dazwischen sind zum Teil geringmächtige Tonsteinlagen eingeschaltet (FREUDENBERGER 1996).

Der sich im Hangenden anschließende ca. 100 m mächtige Obere Buntsandstein streicht flächenhaft im Bereich Kronach aus. Westlich der Itz tritt er in zwei schmalen Bändern an die Oberfläche. Ansonsten gibt es kleinere Vorkommen entlang der Kulmbach-Eisfelder-Störungszone. Er besteht überwiegend aus Tonsteinen (Untere und Obere Röttone) mit Gips-Ausscheidungen und vereinzelt Sandsteinlagen. In südöstliche Richtung nimmt der Sandanteil in den Oberen Röttonen zu. Der zwischen den beiden Tonsteinpaketen eingeschaltete Rötquarzit setzt sich überwiegend aus feinkörnigen kompakten Sandsteinbänken zusammen. Den Abschluss bilden die Myophorienschichten, die sich hauptsächlich aus grüngrauen, karbonathaltigen, schluffigen Tonsteinschichten aufbauen.

Dazwischen sind karbonatische Feinsandlagen und kalkig-dolomitische Lagen eingeschaltet, die bereits den Übergang zur Muschelkalkfazies anzeigen (EMMERT & v. HORSTIG 1972).

Der Buntsandstein ist ein typischer Kluft-Poren-Grundwasserleiter. Dabei findet die Grundwasserspeicherung und -bewegung vorzugsweise im Kluft-Hohlraum und untergeordnet im permeablen Porenraum der Sandsteine statt.

Im Unteren und Mittleren Buntsandstein sind die tonigen Zwischenlagen zwar prinzipiell Grundwasser gering leitend, aber nicht flächendeckend durchgängig entwickelt, so dass sich ein einheitliches zusammenhängendes wasserwirtschaftlich bedeutendes Grundwasserstockwerk ausbildet. Als Grundwassersohle fungieren die gering leitenden Schichten des Zechsteins. Die Unteren Röttone des Oberen Buntsandstein bilden die Grundwasserdeckschicht. In Gebieten, in denen der Grundwasserleiter ausstreicht, liegen überwiegend ungespannte, in Abhängigkeit aushaltender Tonsteinlagen auch vereinzelt teilgespannte, Grundwasserverhältnisse vor. Mit zunehmender Überdeckung und in hydraulischen Entlastungsbereichen gehen die ungespannten in gespannte Grundwasserverhältnisse über. In tief eingeschnittenen Tälern, wie z.B. im Kronachtal, sind dann lokal auch artesische Verhältnisse möglich.

Im Oberen Buntsandstein stellt der Röt Quarzit einen eigenständigen wasserwirtschaftlich genutzten Kluft(-Poren)-Grundwasserleiter dar. Dabei fungieren die Unteren Röttone als Grundwassersohlschicht die Oberen Röttone als Grundwasserdeckschicht. Das Grundwasser ist größtenteils gespannt.

Grundwasseroberfläche

Auf der Basis mittlerer Grundwasserspiegelhöhen von 95 Brunnen, 71 Grundwassermessstellen, 26 nicht ausgebauten Bohrungen, 6 Interimsbrunnen und einer Quelle wurde für das Grundwasserstockwerk Unterer und Mittlerer Buntsandstein ein Grundwassergleichenplan konstruiert (Blatt 3). Die Talstrecken der Rodach, Kronach und Haßlach im SE sowie Itz, Lauterbach und Röden im NW besitzen als Entlastungszonen eine drainierende Wirkung auf das Grundwasser. Zusätzlich trennen Grundwasserscheiden die auf die einzelnen Vorfluter ausgerichteten Strömungssysteme ab und ermöglichen eine Untergliederung in lokale Einzugsgebiete. Innerhalb dieser ist die Grundwasserfließrichtung auf die lokalen Entlastungszonen der Vorfluter ausgerichtet. Das Fließgefälle variiert zwischen 0,5 und 7% und liegt im Mittel bei ca. 1%.

Im Ausstrichgebiet des Grundwasserleiters liegen die Flurabstände vorwiegend zwischen 5 und 20 m. In Bereichen der orographischen Hochlagen können sie vereinzelt auf über 20 m bis max. 120 m ansteigen. Mit Annäherung an die hydraulischen Entlastungszonen verringern sich die Flurabstände auf unter 5 m. Entlang der Vorfluter Kronach und Rodach ergeben sich stellenweise negative Flurabstände. Die berechneten Druckhöhen variieren dabei um wenige Dezimeter über Geländeoberfläche.

Hydraulische Kennwerte

Innerhalb der Planungsregion liegen 95 Pumpversuche an 68 Brunnen im Buntsandstein vor. Davon erschließen 2 Brunnen den Unteren, 60 Brunnen den Mittleren und 6 Brunnen den Oberen Buntsandstein. Mittels der in Kapitel 3.1 erläuterten Methode wurden für den Unteren und Mittleren Buntsandstein Durchlässigkeiten von $8,1 \cdot 10^{-6}$ m/s im Median berechnet. Die Werte variieren dabei zwischen $2,4 \cdot 10^{-7}$ und $8,2 \cdot 10^{-5}$ m/s (Abb. 3-3). Ähnliche Größenordnungen der Durchlässigkeiten werden auch in angrenzenden Buntsandsteingebieten von Bayern, Hessen und Thüringen ange-

troffen (GEORGOTAS & UDLUFT 1978, MATTHESS 1972, RÖDIGER 2005). Tendenziell nehmen die Durchlässigkeiten mit zunehmender Erschließungstiefe ab.

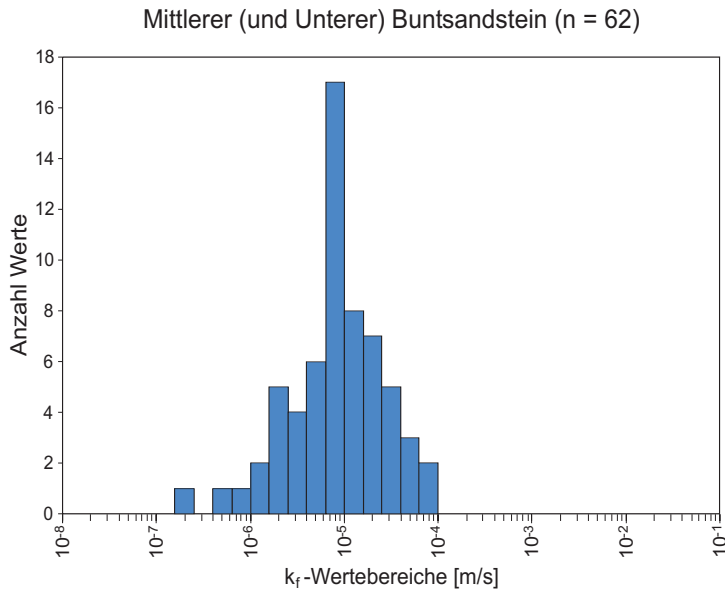


Abb. 3-3: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im Unteren und Mittleren Buntsandstein.

Für den Oberen Buntsandstein (Rötquarzit) berechnen sich aus den 6 Pumpversuchen Durchlässigkeiten von $2 \cdot 10^{-6}$ bis $2 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Die Variationsbreite der Durchlässigkeitsbeiwerte spiegelt sich in den spezifischen Ergiebigkeiten wider, die sich ebenso aus den Pumpversuchen berechnen lassen. Für den Unteren und Mittleren Buntsandstein ergeben sich danach Werte zwischen 0,03 bis 4,6 l/(s·m) (Median: 0,4 l/(s·m)), wobei etwa 90% der Werte zwischen 0,03 und 1,4 l/(s·m) liegen. Im Oberen Buntsandstein schwanken sie zwischen 0,05 und 0,8 l/(s·m).

Über den nutzbaren Hohlraumanteil im Buntsandstein der Region liegen keine direkten Angaben vor. Ansatzpunkte liefern die Arbeiten von EISSELE (1966), MATTHESS (1970), UDLUFT (1971), SCHUBUTH (1973), MÄRZ (1977), GEORGOTAS & UDLUFT (1978) und HUBER (1992), die sich mit Messmethoden zur direkten und indirekten Bestimmung von Gesteins- und Kluftporosität verschiedener Buntsandsteingebiete in Deutschland beschäftigten. Danach liegt die Schwankungsbreite des Kluftvolumens in den oberflächennahen Bereichen zwischen 0,1 und 5,2%, wobei die erhöhten Werte von etwa 5% an Auflockerungszonen gebunden sind. Mit zunehmender Tiefe verringert sich das Kluftvolumen auf < 1%. Für die Porosität der Sandsteine geben die Autoren eine Größenordnung von 2,2 bis ca. 19% an.

Quellen

Im Buntsandstein wurden 90 Quellen kartiert; hiervon können 44 als Schichtquellen, 29 als Verengungsquellen, 3 als Stauquellen und eine als Überlaufquelle angesprochen werden. Die Quellschüttungen reichen von 0,01 bis 1,8 l/s. Über 50% der gemessenen Schüttungen liegen unter 0,1 l/s, bei weiteren 10% wurden Schüttungen zwischen 0,2 und 0,5 l/s gemessen. Der überwiegende Teil der Schichtquellen tritt im Mittleren Buntsandstein auf. Weitere Schichtquellen werden im Oberen Buntsandstein beobachtet. Entlang der tief eingeschnittenen Täler der Vorfluter Lauterbach und Itz im Nordwesten finden sich bevorzugt Verengungsquellen.

3.2.3 Muschelkalk

Das Vorkommen des Muschelkalk ist auf das Bruchschollengebiet beschränkt und streicht in einem schmalen Band parallel zur Kulmbach-Eisfelder-Störungszone im NW und parallel zur Fränkischen Linie im SE aus. In der Region Oberfranken West erreicht die Einheit Mächtigkeiten von etwa 200 bis 250 m. Die typische Dreigliederung in Unteren, Mittleren und Oberen Muschelkalk ist auch aus hydrogeologischer Sicht relevant.

Hydrogeologischer Bau und Grundwasserführung

Der Untere und Obere Muschelkalk besteht überwiegend aus Kalksteinen bzw. Kalkstein-Tonstein-Wechselfolgen. Im Mittleren Muschelkalk hingegen treten neben tonig-karbonatischen Wechsel-schichten auch Gips-, Anhydrit- und zum Teil Salzlager auf.

Allgemein stellt der Muschelkalk einen mäßigen bis guten Kluft- und/oder Karstgrundwasserleiter dar, der je nach Verkarstung ein bedeutendes Hohlraumvolumen aufweisen kann. In Abhängigkeit von Lithologie, Klüftung und Verkarstung bildet sich bisweilen ein mehrfacher Grundwasserstockwerksbau aus. Die Stockwerksgliederung wurde u.a. sehr detailliert in BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1993) beschrieben. Im Wesentlichen handelt es sich um drei Stockwerke, die sich weitestgehend an der stratigraphischen Dreigliederung (s.o.) orientieren.

Als Grundwasser leitend sind im Einzelnen der Untere Muschelkalk mit den Schaumkalkbänken und bei Verkarstung auch den Wellenkalkfolgen, der Mittlere Muschelkalk mit den Zellenkalken, Styrolithenkalken und dem Gipskarst sowie der Obere Muschelkalk mit klüftigen Kalksteinbänken zu nennen. Infolge der Sulfatlaugung bricht häufig das Deckgebirge nach, was mit der einhergehenden Verkarstung dort zu erhöhten Ergiebigkeiten führen kann. Dies betrifft insbesondere den Styrolithenkalk und z.T. auch kompetente Kalkbänke im Oberen Muschelkalk.

In den Muschelkalkarealen der Region ist der Stockwerksbau aufgrund fehlender Grundwasseraufschlüsse nicht nachzuweisen, wenngleich auch Grundwasserstandsmessungen im Bereich Drossenhausen auf derartige Verhältnisse hindeuten (Abschnitt Grundwasseroberfläche). Im Gebiet der „Langen Berge“ wurde bei zwei tieferen Gipserkundungsbohrungen kein nennenswertes Grundwasservorkommen angetroffen, was zumindest bereichsweise auf hydraulisch dichte Abschnitte im Muschelkalk hinweist.

Im Muschelkalkausstrich ist über weite Strecken kaum ein Gewässernetz entwickelt, was insgesamt auf ein durchlässiges Gebirge schließen lässt. Die weitgehend fehlenden Quellabflüsse sprechen für ein zusammenhängendes Grundwasservorkommen, welches vornehmlich im Bereich der tief eingeschnittenen Täler und entlang von tektonischen Strukturen entwässert. Letztere sowie die generelle Schichtlagerung sind in diesem Zusammenhang vermutlich auch die wesentlichen Faktoren, die den Stockwerksbau im Muschelkalk großräumig auflösen. Die Schichten des Unteren Keuper (Lettenkeuper) bilden dabei die Grundwasserdeckschicht, die des Oberen Buntsandstein (Myophorienschichten und Röttone) die Grundwassersohlschicht des Leiterkomplexes.

In Abhängigkeit der Gesteinsausbildung und Verkarstung können die Durchlässigkeiten im gesamten Muschelkalk eine große Streubreite von $< 10^{-7}$ bis 10^{-3} m/s aufweisen, wie sie auch in den angrenzenden Gebieten „Sinn-Saale-Gebiet“ und „Mittelmain“ festgestellt wurden (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT 1993). Innerhalb der Region liegen 4 Pumpversuche vor, aus denen sich Durchlässigkeiten zwischen $5 \cdot 10^{-7}$ und $4 \cdot 10^{-5}$ m/s ergaben.

In verschiedenen Gutachten werden für den Muschelkalk Durchlässigkeiten von $9 \cdot 10^{-6}$ bis $4,9 \cdot 10^{-3}$ m/s angegeben.

Grundwasseroberfläche

Für zwei größere Komplexe des im Bruchschollengebiet allgemein stark zergliederten Muschelkalk-Vorkommens wurde versucht, die Grundwasserfließverhältnisse mittels Isolinienplänen darzustellen.

Im nördlichen der beiden bearbeiteten Teilbereiche bildet sich zwischen Rottenbach und Drossenhausen nach Auswertung einiger Baugrundbohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen sowie weniger Quellaustritte eine Grundwasserscheide aus. Von dieser aus entwässert der Muschelkalk mit relativ hohem Gefälle ($> 2\%$) in östliche bzw. südöstliche Richtungen zu den drainierenden Einschnitten von Weißbach und Lauterbach. In die Gegenrichtung, nach SW, fließt das Grundwasser relativ steil ($> 3\%$) in Richtung des Ortes Meeder und weiter nördlich davon etwas flacher (2%) in Richtung Ahlstadt ab. Der Grundwasserabfluss in die westlichen Richtungen folgt dem großräumigen Schichteinfallen. Im Unterlauf der Muschelkalktäler scheinen die Gewässer ganzjährig Wasser zu führen, was auf, wenn auch diffuse, Grundwasseraustritte schließen lässt. Oberhalb davon dürften die meisten Gerinne allenfalls episodisch einen Grundwasseranschluss besitzen. Im Bereich um Drossenhausen fällt in der Grundwasseroberfläche eine Abstufung mit Ausbildung einer Verebnung auf, was auf unterschiedliche Grundwasserpotenziale hindeutet.

Der südliche Muschelkalk-Komplex zieht sich von der Anhöhe Maiersreuth, oberhalb von Gössersdorf, in nordwestliche Richtung auf die Vorfluter Rodach und Kronach hin. Für die Darstellung der Grundwasserfließverhältnisse standen hier noch weniger Stützpunkte zur Verfügung, so dass die Aussagekraft der Grundwassergleichen sehr eingeschränkt ist. Aus dem Grundwasserstand einer Gipserkundungsbohrung bei Maiersreuth resultiert hier ein kuppenartiges Hochgebiet, von dem aus das Grundwasser mit einem Gefälle von etwa 3% der Rodach zuströmt. Das Muschelkalk-Grundwasser im Zwickel von Kronach und Rodach strömt, ausgehend von einem Grundwasserneubildungsgebiet im Bereich Hohe Wart oberhalb Unterrodachs, den beiden oben genannten Vorflutern zu.

Quellen

Die Ausstrichsgebiete des Muschelkalk werden hauptsächlich von Schicht- und Stau- bzw. Verengungsquellen geprägt. Erstere entspringen meist im Bereich der Muschelkalk-Röt-Grenze. Nicht selten werden sie von anstehendem Hangschutt überdeckt und treten erst im Bereich des Hangschuttfußes aus. Die gemessenen Schüttungen schwanken zwischen < 1 bis 12 l/s. Einige dieser Quellen werden von der Wasserversorgung Rödental genutzt. Die Stau- bzw. Verengungsquellen treten überwiegend im Talniveau zutage und weisen zum Teil beachtliche Schüttungen von > 100 l/s wie z.B. eine Quelle im Lautertal N Oberlauter auf.

3.2.4 Keuper und Rhätolias

Die Schichten des Keuper und Rhätolias streichen im N zwischen Bruchschollenland und Fränkischer Alb sowie im westlichen Teil der Planungsregion im Fränkischen Keuper-Lias-Land aus. Das gesamte Schichtpaket ist durch einen mehrfachen, komplexen Grundwasserstockwerksbau gekennzeichnet. Aus hydrogeologischer Sicht lassen sich Unterer Keuper, Gips- und Sandsteinkeuper sowie Rhätolias unterscheiden.

3.2.4.1 Unterer Keuper

Die Schichten des Unteren Keuper sind in einem breiten Band am Nordwestrand der Region und vereinzelt auch entlang der Fränkischen Linie aufgeschlossen. Allgemein besteht er aus grau- bis schwarzgrünen Tonstein-Sandstein-Wechselfolgen mit grauen bis gelben, kalkig-dolomitischen Zwischenlagen. Er kann hier in die Untere und Obere Tonstein-Gelbkalkfolge mit dem dazwischen liegenden Werksandstein-Bereich gegliedert werden. Den Abschluss des Unteren Keuper bildet der Grenzdolomit. Die insgesamt 40 bis 50 m mächtige Abfolge weist neben dem raschen vertikalen Gesteinswechsel eine intensive fazielle Verzahnung auf (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT 1993), was insbesondere zu isolierten Grundwasservorkommen führt.

Der Untere Keuper stellt infolge der überwiegend tonigen Ausbildung und der geringen flächigen Verbreitung keinen regional bedeutenden Grundwasserleiter dar. Nur der Werksandstein und der Grenzdolomit werden örtlich wasserwirtschaftlich genutzt. So existieren z.B. entlang der Fränkischen Linie Einzelvorkommen im Bereich des Grenzdolomits, die zwischen Großvichtach und Seibelsdorf durch Quelfassungen erschlossen werden. Weitere Quellen, die meist dem Werksandstein zuzuordnen sind, wurden in der NW Coburg ausstreichenden hydrogeologischen Einheit kartiert. In der Regel handelt es sich um Schichtquellen mit perennierender Wasserführung.

Auf Grund der untergeordneten Stellung des Unteren Keuper und der räumlich eng begrenzten Einzelgrundwasservorkommen wurde kein Grundwassergleichenplan angefertigt. Das Grundwasser bewegt sich vor allem auf Kluft- und Schichtfugen der Sand- und Karbonatlagen (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT 1993). Nach Auswertung der verfügbaren Pumpversuche berechnen sich für die wasserwirtschaftlich genutzten Horizonte Durchlässigkeiten zwischen $5 \cdot 10^{-5}$ und $5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Die spezifischen Ergiebigkeiten variieren von 0,05 bis ca. 1,5 l/(s·m). Für die Abschätzung durchschnittlicher Kluftvolumina bieten sich die Untersuchungen von GEORGOTAS & UDLUFT (1978) für das Einzugsgebiet der Sinn und Fränkischen Saale an. Demnach liegt das nutzbare Hohlraumvolumen im Bereich der Sandsteine zwischen 0,1 und 1,2% (meist um 0,5%). Im Umfeld von Störungszonen kann es auch bis auf ca. 3% ansteigen (SCHMITT 1982).

3.2.4.2 Gipskeuper

Der Gipskeuper ist überwiegend im NW der Planungsregion N Coburg aufgeschlossen. Weitere Vorkommen befinden sich S Coburg in einem östlichen Seitental der Itz. Ferner streicht er oberflächlich in den tief eingeschnittenen Tälern der Rauhen Ebrach, Mittelebrach, Reichen Ebrach, Aisch und des Mains im SW der Planungsregion aus.

Die ca. 200 m mächtige Abfolge des Gipskeuper untergliedert sich in Myophorienschichten, Estherienschichten, Schilfsandstein und Lehrbergschichten. Mit Ausnahme des Schilfsandstein bestehen die Schichtglieder hauptsächlich aus grauen bis roten Ton- und Tonmergelsteinen mit Zwischenlagen aus Gips und Steinmergelbänken (FREUDENBERGER 1996). Im Gegensatz zu den tonigen Abschnitten baut sich der Schilfsandstein aus einem grünlichgelben Fein- bis Mittelsandstein auf. Streckenweise finden sich Tonstein-Sandstein-Wechselfolgen, die dem Sandstein zwischengelagert sind und diesen stellenweise sogar ablösen (SCHRÖDER 1978). Die Lehrbergschichten heben sich von den unteren Partien des Gipskeuper durch eine intensivere und lebhaftere Farbgebung der Ton- und Tonmergelsteine ab. Nicht selten treten Gipsresiduen in Form von Linsen, Faser- und Knollengips auf. Im Aischtal westlich der Region 4 werden die Lehrbergschichten bereits in sandiger Fazies angetroffen und dort auch von Trinkwasserbrunnen mit erschlossen.

Durch die überwiegend tonige Ausbildung ist der Gipskeuper als Grundwassergeringleiter einzuordnen. Die Grundwasserführung beschränkt sich meist auf den Schilfsandstein und vereinzelt auf eingeschaltete Dolomitsteinbänke und verkarstete Sulfatlager. Der Schilfsandstein ist auf Grund seiner Lagerung zwischen mächtigen, gering durchlässigen Ton- und Tonmergelschichten in seiner Speicherfunktion und Ergiebigkeit stark eingeschränkt. Oberflächennah bildet er häufig Plateauflächen und besitzt dann ein verhältnismäßig geringes Retentionsvermögen (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT 1993). Im SW der Planungsregion erlangen die Grundwasservorkommen im Schilfsandstein allerdings eine für die öffentliche Trinkwassergewinnung lokale Bedeutung. Im Raum Coburg werden Grundwasservorkommen im Schilfsandstein und den Estherienschiefern vereinzelt durch private Brunnen erschlossen und genutzt.

Aufgrund der geringen Verbreitung des Gipskeuper in der Region wurden nur wenige Quellen kartiert. In der Regel handelt es sich um Schicht- und Verengungsquellen, die meist den Schilfsandstein, seltener Wasser führende Dolomitsteinbänke oder stellenweise auch den Gipskarst, entwässern. Die gemessenen Schüttungen variieren zwischen 0,05 und 3 l/s, wobei Schüttungen über 1 l/s, wie z.B. bei den Quellfassungen zur Wasserversorgung in Aschbach und Kleingressingen, eher die Ausnahme darstellen. Letztere sind auch von lokaler Tektonik beeinflusst.

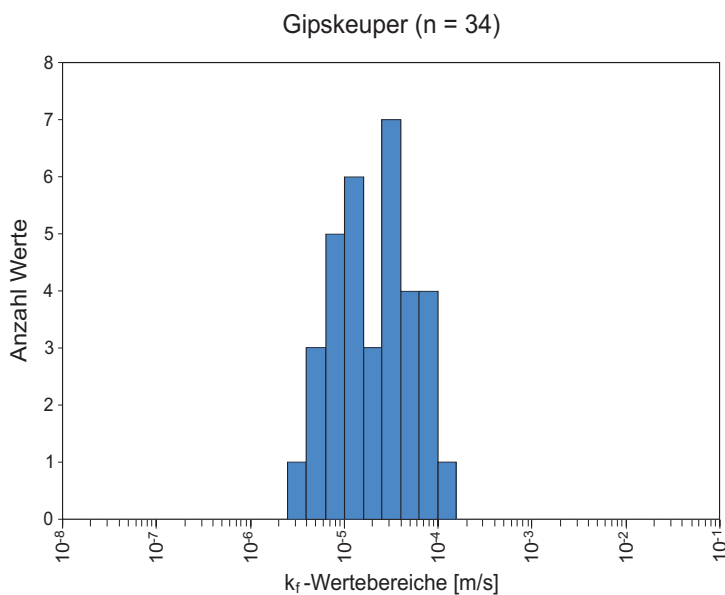


Abb. 3-4: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im Gipskeuper.

Die aus 57 Pumpstufen an 34 Brunnen berechneten Durchlässigkeitsbeiwerte für den Bereich des Schilfsandstein und untergeordnet auch der Estherien- und Lehrbergschichten reichen von $3 \cdot 10^{-6}$ bis $1 \cdot 10^{-4}$ m/s (Medianwert $1,8 \cdot 10^{-5}$ m/s), wobei Häufungen im Bereich von $1 \cdot 10^{-5}$ und $1 \cdot 10^{-4}$ m/s auftreten (Abb. 3-4). Die spezifischen Ergiebigkeiten betragen zwischen 0,03 und 2 l/(s·m), wobei jene < 1 l/(s·m) überwiegen. Die Brunnen liegen mit einer Ausnahme alle im SW der Planungsregion. Messungen von GEORGOTAS & UDLUFT (1978) geben für das Kluftvolumen des Schilfsandstein in Abhängigkeit der Tektonik zwischen 0,35 und 1% an.

3.2.4.3 Sandsteinkeuper

Der Sandsteinkeuper streicht in der Planungsregion Oberfranken West weitflächig aus. Das Hauptverbreitungsgebiet befindet sich nördlich und westlich des Obermains und westlich der Regnitz im Keuper-Bergland. Aufgrund der überwiegend sandigen Ausbildung und seiner Verbreitung bildet er für die Planungsregion einen regional bedeutenden Grundwasserleiterkomplex.

Hydrogeologischer Bau und Grundwasserführung

Die Gesteine des Sandsteinkeuper bestehen aus schlecht sortierten, ungleichmäßig geschichteten, feldspathaltigen Sandsteinen, in denen untergeordnet mehr oder weniger mächtige Tonsteine eingeschaltet sind. Die Gesamtmächtigkeit liegt zwischen 120 und 250 m (FREUDENBERGER 1996). Im Schichtkomplex treten mit dem Coburger Sandstein und Blasensandstein sowie dem Burgsandstein zwei wesentliche hydrogeologische Einheiten auf.

Die etwa 40 bis 60 m mächtige Schichtenfolge des Coburger Sandstein und Blasensandstein streicht überwiegend im NW und SW der Planungsregion obertägig aus. Im Coburg-Kulmbacher-Raum ist die Abfolge durch mergelige Tonsteine mit Gipseinschaltungen und untergeordneten Sandsteinbänken geprägt. Ansonsten besteht der Blasensandstein im nördlichen Teil der Region an der Basis aus Mergel auf die Sandsteinbänke mit zum Teil Toneinschaltungen folgen; den Abschluss bilden meist Lettenablagerungen. Im Hangenden schließt sich der Coburger Sandstein an, der im Norden überwiegend aus feinkörnigen Sandsteinen besteht. Nach Süden zu kommt es zur Ausbildung der typischen Wechselfolgen aus fein- bis grobkörnigen Sandsteinen mit einzelnen Tonsteinlagen, die eine unregelmäßige Sedimentation aufweisen (FREUDENBERGER 1996).

Der Burgsandstein wird traditionell durch Ton-Schluffsteinhorizonte in Unteren, Mittleren und Oberen Burgsandstein unterteilt. Innerhalb der Planungsregion kann der 60–80 m mächtige Untere Burgsandstein in die Heldburg- und Nürnberger Fazies gegliedert werden. Die Heldburgfazies ist überwiegend im NW der Region ausgebildet und verzahnt sich etwa entlang der Linie Kulmbach-Lichtenfels-Bamberg-Eltmann allmählich mit der sandigen Nürnberger Fazies (Abb. 4-13). Letztere beginnt mit einem charakteristischen Karbonathorizont, auf den mittel- bis grobkörnige Sandsteine folgen. Dagegen besteht die Heldburgfazies aus einer Gips und Dolomit führenden, tonig-mergligen und nach oben hin auch sandigen Schichtfolge. Hydrogeologisch bedeutsam sind insbesondere die 20–25 m mächtigen, tonig-dolomitischen Unteren Heldburgschichten, da sie den Coburger Sandstein und Blasensandstein in der Regel hydraulisch wirksam vom Burgsandstein abtrennen.

Der Mittlere Burgsandstein zeigt ebenfalls zwischen südlichem und nördlichem Franken unterschiedliche fazielle Ausbildungen. Innerhalb der Planungsregion erfolgt die fazielle Trennung etwa in Höhe von Forchheim. S Forchheim sind die hellen Sandsteine des Mittleren Burgsandstein dolomitfrei. Nördlich davon sind schlecht sortierte, grobkörnige, feldspatreiche, dolomitische Sandsteine ausgebildet. Dort treten „Dolomitische Arkosen“ auf; als typischer Vertreter ist der Coburger Festungssandstein zu nennen. Im Übergangsbereich der beiden Faziestypen sind mächtige Krustenkarbonate im Wechsel mit Chalcedonlagen bzw. -knollen entwickelt (FREUDENBERGER 1996). Die Mächtigkeit des Mittleren Burgsandstein liegt bei ca. 30 m.

Der Obere Burgsandstein besteht aus fein- bis mittelkörnigen, basal auch grobkörnigen Dolomitsandsteinen bzw. dolomitischen Arkosen, in denen sich knollige Dolomitsteinlagen mit Tonsteinzwischenmitteln abwechseln. Die Mächtigkeit steigt von ca. 15 m im N auf über 30 m im S an (FREUDENBERGER 1996).

Der gesamte Leiterkomplex setzt sich weitgehend aus ineinander verzahnenden Ton- und Sandsteinpaketen zusammen. Darin wirken die Tonsteinschichten überwiegend Grundwasser hemmend. Im Bereich der Sandsteine bilden die Trennflächen zusammen mit den Poren einen in seiner hydraulischen Wirksamkeit variierenden Hohlraum. Der Wasserdurchsatz ist dabei im Kluftraum wesentlich größer als im Porenraum. Ein erhöhter Grundwasserabfluss wird häufig im Bereich dickbankiger, dolomitischer Sandsteine und massiger Dolomitsteine im Mittleren Burgsandstein beobachtet (Abb. 3-5).

Der Gipskeuper bildet mit den gering durchlässigen, vornehmlich tonig-mergeligen, bis zu 30 m mächtigen Lehrbergschichten die Grundwassersohlschicht des Grundwasserleiterkomplexes, der gering leitende, tonig-schluffige bis mergelige, 40 bis 90 m mächtige Feuerletten die Grundwasserdeckschicht.



Abb. 3-5: Quellstollen im Bereich des dolomitischen Mittleren Burgsandstein (Hohenmühle, Viereth).

Generell entstehen infolge des regen Wechsels von Leitern und Geringleitern häufig komplizierte hydraulische Verhältnisse im Abflussgeschehen. Mit der ausgeprägten Quellen- und Gewässernetzdichte zeigt sich ein besonderer Effekt des Abflussverhaltens im Sandsteinkeuper. Großräumig dürften die meisten Grundwasser führenden Sandstein- und Dolomitbänke hydraulisch miteinander kommunizieren, da die Tonstein- und Lettenhorizonte aufgrund ihrer bereichsweisen Klüftung und lokalen Verbreitung in der Regel nur kleinräumig die Zirkulation des Grundwassers behindern. Dies führt zur Bildung eines größeren einheitlichen Grundwasserkörpers und dann grundsätzlich zum Ausgleich der unterschiedlichen hydraulischen Potenziale. Davon ausgenommen bleiben isolierte

hangende Grundwasservorkommen, die meist über Quellen im saisonalen Gang entwässert werden.

Im Verbreitungsgebiet der Heldburgfazies sind Coburger Sandstein sowie Blasensandstein in der Regel vom hangenden Burgsandstein hydraulisch getrennt. In der Umgebung von Coburg unterscheiden sich die hydraulischen Potenziale der beiden Grundwasserstockwerke z.T. sehr deutlich. In einigen Brunnen und Bohrungen treten dort Potenzialunterschiede zwischen wenigen Metern und einigen Zehnermetern auf. Die Stockwerkstrennung war auch in den vom ehemaligen Bayerischen Geologischen Landesamt durchgeführten Forschungsbohrungen S Marbach und am Semberg NE Oberhaid hydraulisch festzustellen.

Im unbedeckten Sandsteinkeuper herrschen vorwiegend ungespannte Grundwasserverhältnisse vor. Lokal sind durch den Einschub tonig-mergeliger Lagen auch teilgespannte Verhältnisse zu erwarten. Vor allem in Richtung der Entlastungszonen werden bei Überdeckung durch Feuerletten oder bindige Talfüllungen gespannte Verhältnisse angetroffen, die insbesondere in den Nebentälern, wie z.B. im Aurachtal, stellenweise zu artesischem Überdruck führen können. Im Verbreitungsgebiet bindiger Verwitterungsdecken und bei Grundwasserhochständen können bisweilen auch Überdruckverhältnisse an den Talflanken auftreten.

Grundwasseroberfläche

Die Grundwassergleichen zum Sandsteinkeuper sind in den Kartenbeilagen auf Blatt 3 im Maßstab 1:100 000 dargestellt. Auf Grund der faziellen Ausbildung und nachgewiesener Potenzialunterschiede innerhalb des Leiterkomplexes wurden die Gleichenpläne für die Grundwasserstockwerke des Coburger Sandstein und Blasensandstein sowie des Burgsandstein im nordwestlichen Teil der Region getrennt voneinander entwickelt. Für die südlich und östlich anschließenden Gebiete beziehen sich die konstruierten Grundwasserhöhengleichen auf den gesamten Sandsteinkeuper. Generell erschwerend auf die Konstruktion der Gleichenpläne wirkt sich die bereits erwähnte vertikale und horizontale Verzahnung von gering leitenden und Wasser führenden Horizonten aus, was im Zusammenspiel mit der Geländemorphologie zu lokal separierten unabhängigen Grundwasservorkommen mit unterschiedlichen hydraulischen Potenzialen führen kann. Für das allgemeine Verständnis der Hydrodynamik und großräumigen Zusammenhänge wurden die Grundwassergleichenpläne jedoch unter der Annahme eines einheitlichen Grundwasserleiterkomplexes konstruiert, mit der Folge, dass aus oben genannten Gründen nur eine Annäherung an die natürlichen Gegebenheiten möglich ist. Die Pläne beruhen auf Messungen durchschnittlicher Grundwasserspiegelhöhen an 645 Brunnen, 264 Grundwassermessstellen, 141 nicht ausgebauten Bohrungen, 83 Quellen und 271 Hilfspunkten (wie z.B. Gewässerröhre).

Im gesamten Verbreitungsgebiet des Sandsteinkeuper liegen die Flurabstände vorwiegend zwischen 2 und 30 m. Flurabstände von über 30 m sind an orographische Hochlagen und an die Bereiche des überdeckten Sandsteinkeuper gebunden. Mit Annäherung an die Entlastungszonen der lokalen Vorfluter kann es bei Anwesenheit gering durchlässiger Deckschichten stellenweise auch zu Überdruckverhältnissen kommen. Die realen Druckspiegel reichen aber nur wenige Dezimeter über die Geländeoberfläche.

Coburger Sandstein und Blasensandstein

Im Coburger Sandstein und Blasensandstein im Coburger Raum folgt die Grundwasserfließrichtung in den Ausstrichgebieten weitgehend dem Verlauf der Geländemorphologie. Westlich, zwischen Weitramsdorf und Coburg, dürfte etwa entlang der orographischen Hochlage und einer vermuteten, SE-streichenden Aufwölbung des Gebirges eine Grundwasserscheide ausgebildet sein, die den

Grundwasserabfluss in eine westliche und nordöstliche bis östliche Richtung lenkt. Dabei dränieren der Fohlbach im W und das Itztal im E das Grundwasservorkommen. Die tonige Ausbildung des Blasensandsteins und das nach SSW einfallende Gebirge sind die möglichen Ursachen der fehlenden Oberflächenabflüsse und Quellen am nördlichen Ausstrich der hydrogeologischen Einheit. Am Sportplatz in Neuses und Wüstenahorn wurden Potenzialunterschiede von etwa 35 m zum Grundwasser im Burgsandstein gemessen.

Östlich, zwischen Coburg und Waldsachsen, führt eine Sattelstruktur, die im Bereich der orographischen Hochlagen südöstlich streicht, ebenso zur Ausbildung einer Grundwasserscheide, infolge dessen vorwiegend ein südwestlicher bis westlicher und nordöstlicher Grundwasserabstrom erfolgt. Westlich dieser Scheide dränieren von N her Ketschen-, Ram-, Kleien-, Weißenbrunner Bach und zum Teil auch der Füllbach den Grundwasserkörper; hydraulische Hauptentlastungszone ist das Itztal. Östlich davon fungiert der Krebsbach als lokale Vorflut. Im Umfeld von Niederfüllbach tritt mit dem Gipskeuper bereits die Grundwassersohle des Stockwerks zu Tage, was sich z.B. am Rennberg durch Quellaustritte bemerkbar macht. Unter Überdeckung ist im Bereich der orographischen Hochlagen und der Seitmannsdorfer Mulde (HAHN 1974) mit Potenzialunterschieden von bis zu 30 m zum hangenden Stockwerk des Burgsandstein zu rechnen. Insbesondere nach NE in Richtung Waldsachsen verliert sich dieser Unterschied allmählich. Grundwasserplateaus und damit potenzielle Neubildungsgebiete befinden sich N Rößen sowie im Bereich des Blauen Hügels SE Niederfüllbach. Letzteres folgt einer Sattelstruktur nach HAHN (1974). Die Fließgefälle des Grundwassers liegen überwiegend zwischen 1 und 5%.

Burgsandstein

Im Burgsandstein findet der großräumige Grundwasserabstrom in Richtung des Maintals statt, welches die Hauptentlastungszone für das Grundwasserstockwerks darstellt. Darüber hinaus wirken Itz, Rodach (West), Baunach, Lauter und Rodach (Ost) als lokale Vorfluter und sind zusammen mit einem Teil ihrer Zuflüsse für die Ausbildung groß- und kleinräumiger Grundwasserscheiden verantwortlich. Einige Verengungsquellen entlang der Talzüge dokumentieren diesen hydraulischen Zusammenhang. Im Allgemeinen passt sich das Fließgeschehen an die Geländemorphologie und die mehr oder weniger ausgeprägte Schichtlagerung an. Stellenweise, wie z.B. E Coburg, modifizieren Sattel- und Muldenstrukturen das Fließschema. Dort findet aufgrund des generellen Schichteinfallens nach E bis SSE kein bedeutender Grundwasserabfluss nach NW bis N statt. Die orographischen Hochlagen bilden häufig Grundwasserplateaus (z.B. in der östlichen Verlängerung des Coburger Festungsbergs), wobei das Grundwasser großräumig dem Bereich der Muldenstrukturen (z.B. Sonnfelder und Frohnlacher Mulde, nach HAHN 1974) zuströmt.

Im unbedeckten Burgsandstein wird an tiefer eingeschnittenen Tälern der Grundwasserkörper teilweise über Gerinne oder Quellen entwässert. Lokal führt dies zu kleinräumigen Veränderungen in der Grundwasserfließrichtung. Beispiele sind entlang des Gieß- bzw. Tambachs bei Weitramsdorf, des Schneybachs zwischen Schney und Frohnlach oder des Biberbachs zwischen Michelau und Waidhaus zu beobachten. Zwischen Weitramsdorf und Coburg folgt der Grundwasserabfluß der von LORETZ (1885) beschriebenen Schichtneigung nach SSW, wobei die orographischen Hochlagen als Neubildungsgebiete fungieren. Auffällig ist in diesem Zusammenhang auch die zum Teil fehlende Entwässerung an den nördlichen und östlichen Talflanken entlang des Burgsandsteinausstriches.

Im überdeckten Burgsandstein entsprechen die dargestellten Grundwasserhöhengleichen nur einem Trendlinienplan. Tendenziell deutet sich aufgrund der weitläufig gespannten Verhältnisse und fehlenden Anbindungen an Oberflächengewässer eine wesentlich gleichmäßigere Grundwas-

seroberfläche an. Wegen einer reduzierten, jedoch über die Fläche ausgeglichenen, häufig über Leakage gesteuerten Grundwasserneubildung sind relativ geringe Fließgefälle ausgebildet. Sie bewegen sich zwischen 0,1 und 1%. In den unbedeckten Bereichen liegen sie meist zwischen 1 und 5%, wobei zwischen Neubildungsgebieten und den Entlastungszonen auf kürzerer Distanz auch Gefälle von bis zu 10% erreicht werden können. Diese extremeren Gefällesituationen sind hier, wie im übrigen Sandsteinkeuper, nur unter der Annahme mäßig bis geringer hydraulischer Leitfähigkeiten und bei Auftreten gering leitender Zwischenlagen realistisch.

Die hydraulische Wirksamkeit bekannter Störungen kann aufgrund der lückenhaften Datenlage zu- meist nur vermutet werden. Bei der Kulmbach-Eisfelder-Störungszone dürfte sich zwischen Burgsandstein und Unterem und Mittlerem Buntsandstein eine hydraulisch aktive Barriere ausbilden, so dass sich die hydraulischen Potenziale weitgehend ausgleichen können. An der SE-streichenden Verwerfung SW Neuensorg grenzen Feuerletten und Burgsandstein versatzbedingt aneinander, was zu einer Verengung des Grundwasserleiterquerschnittes in Fließrichtung und damit zur Behinderung des Grundwasserabflusses führt. Dies verursacht eine lokale Anhebung des Grundwassers mit einigen Quellaustritten. In der nordwestlichen Verlängerung der Staffelsteiner Störungszone, W Gemünda, kommt es durch die Heraushebung der westlichen Scholle zu einem hydraulischen Kurzschluss zwischen Coburger Sandstein, Blasensandstein und Burgsandstein. Der Kurzschluss dürfte sich allerdings nur bei einer weitgehend sandigen Ausbildung und entsprechenden Grundwasserführung des Blasensandsteins hydraulisch auswirken.

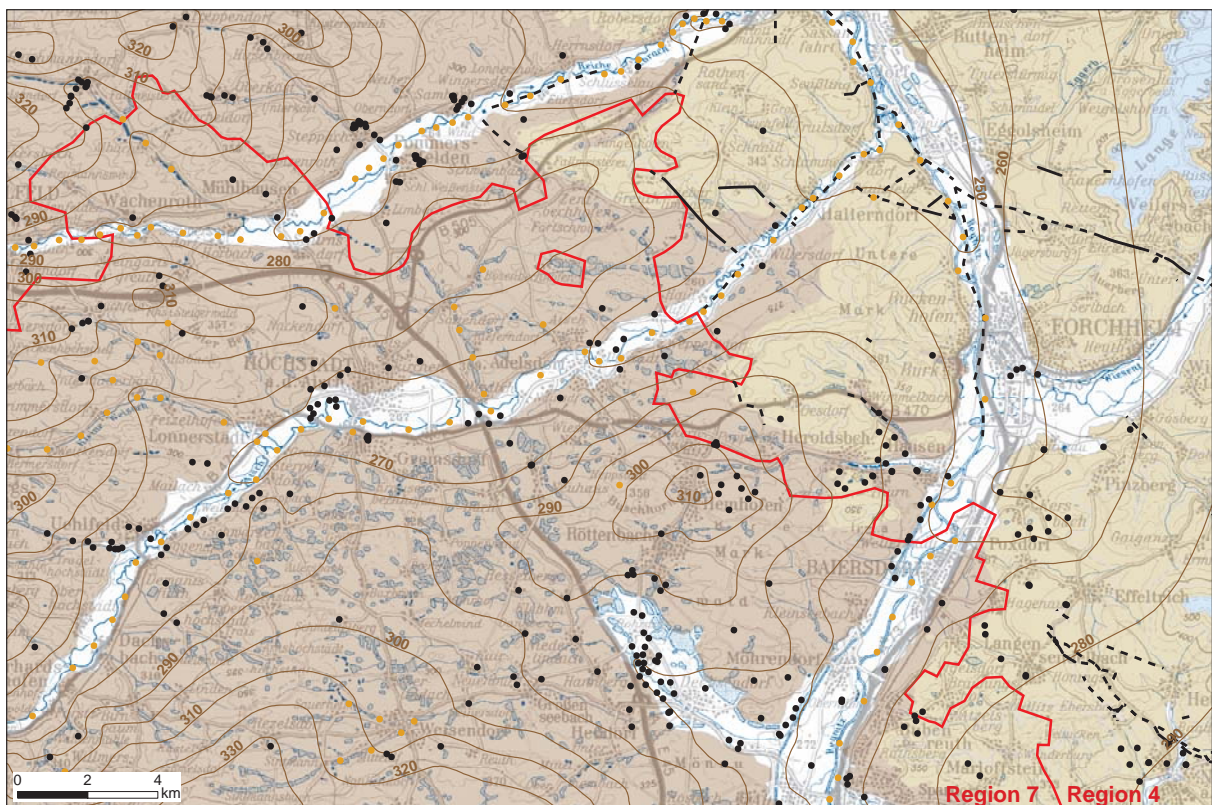


Abb. 3-6: Grundwassergleichen des Sandsteinkeuper im Grenzbereich der Regionen 4 und 7 (schwarze Punkte: Belegpunkte wie z.B. Brunnen, Quellen etc.; orange Punkte: Hilfspunkte wie z.B. Gewässerhöhe).

Sandsteinkeuper ohne flächenhafte Überdeckung

In den auf Blatt 3 als „Sandsteinkeuper ungegliedert“ zusammengefassten Bereichen erfolgt der großräumige Grundwasserabstrom in Richtung Main- und Regnitztal. Sie fungieren als hydraulische Hauptentlastungszonen des Leiterkomplexes. In den südwestlichen und westlichen Ausstrichgebieten wird die Grundwasserfließrichtung durch die lokalen Vorfluter Aisch, Reiche Ebrach, Mittlerebrach, Rauhe Ebrach und Aurach bestimmt. Der Grundwasserleiterkomplex wird zusätzlich von zahlreichen Nebentälern angeschnitten und meist in Verbindung mit Quellaustritten über die dort fließenden Gerinne, wie z.B. Rambach, Schrappach, Allbach, Stöckleinsbach oder kleine Weisach, dräniert. Infolge des saisonalen Grundwassergangs kann es in kleineren und kürzeren Tälern, die den Grundwasserkörper anschnitten, zur örtlichen Verlagerung der Grundwasserzutritte kommen.

Im Bereich der orographischen Hochlagen liegen in der Regel die potenziellen Grundwasserneubildungsgebiete, von denen aus eine wesentliche Einspeisung von Grundwasser in das System erfolgt. Stellenweise sind regelrechte Grundwasserplateaus ausgebildet. Beispiele geben die Anhöhen um Schlüsselfeld (Steinachsberg, Sommerrankenberg und Eckersbacher Höhe) oder die Keuperabdachung zwischen Hemhofen und Röttenbach (Abb. 3-6). Bei ersteren verschiebt sich die Grundwasserscheide von der orographischen Hochlage in Richtung des südöstlichen Schicht-einfallens. Bei letzterer dürfte das Grundwasserplateau insbesondere durch eine aufgelockerte sandige Deckschicht begünstigt werden, die einen Großteil der Niederschläge aufnimmt, speichert und aufgrund des geringen Reliefs vorwiegend in das Stockwerk des Sandsteinkeuper einspeist.

Ungefähr westlich der Linie Schönbrunn–Mönchsambach–Schlüsselfeld streicht in den Tälern bereits die Sohlschicht (Gipskeuper) des Leiterkomplexes aus, zu der das Grundwasser aus dem Sandsteinkeuper meist diffus zuströmt und damit selten eine klare Richtung aufweist. Von da an und weiter in westlicher Richtung wird das zusammenhängende Grundwasservorkommen reliefbedingt und durch die über die Talränder hinaus ausstreichende Sohlschicht sowie vereinzelt auch durch Verwerfungen zerschnitten, was letztendlich zu einem kleinräumigen Wechsel in der Grundwasserdynamik führt. Die Fließverhältnisse in Blatt 3 sind für diese Bereiche idealisiert dargestellt, meist nach dem Gewässernetz und der Geländegestalt ausgerichtet und nur an einzelnen Stellen durch Grundwasseraufschlüsse (Brunnen, Quellaustritte oder Vernässungszonen) belegt. Generell ist hier, wie auch im gesamten Sandsteinkeuper, von Abschnitten auszugehen, die struktur- und faziesbedingt eine geringe Durchlässigkeit und eingeschränkte Grundwasserführung aufweisen, so dass an den Grenzflächen vielerorts keine auffällige Entwässerung stattfindet.

Das Fließgefälle verflacht sich im Trend von NW nach SE, was einerseits mit der weniger ausgeprägten Morphologie und Schichtneigung in südöstlicher Richtung, andererseits mit der nach dort hin zunehmend sandigeren Ausbildung des Grundwasserleiters zusammenhängt. Entlang der Grundwasserscheiden und Vorfluter sowie im südlichen, außerhalb der Region liegenden Gebiet werden überwiegend Fließgefälle zwischen 0,1 und 2% beobachtet. An den Talhängen reichen die Werte meist bis 5% und insbesondere an den der nördlichen Regnitzzuflüsse und des Mains auch darüber.

Sandsteinkeuper mit flächenhafter Überdeckung

Östlich der im letzten Abschnitt beschriebenen Gebiete schließt sich der Sandsteinkeuper mit flächenhafter Überdeckung an, der etwa von der Feuerletten- bis zur Liasüberdeckung auch wasserwirtschaftlich erschlossen wird. Darüber hinaus fehlen entsprechende Aufschlussdaten, so dass zur Abschätzung der Grundwasseroberfläche auch auf Daten außerhalb der Region 4, östlich der Juraüberdeckung, zurückgegriffen wurde. Einen ersten Eindruck und ein mögliches

Szenario liefert die Grundwassergleichenkarte 1:500 000 von Bayern (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 1985).

In der Kartenbeilage auf Blatt 3 zeigt der Grundwassergleichenplan am nördlichen bzw. nordöstlichen Randbereich der Fränkischen Alb, im Übergangsbereich zwischen Keuper- und Jura-Schichten, eine Grundwasserscheide, die sich vermutlich entlang der Frankenjura-Muldenstruktur in südöstlicher Richtung fortsetzt. Im Bereich der Mulde erreicht der Sandsteinkeuper seine maximale Tiefenlage in der Region. Die hydraulischen Bedingungen sind dort weitgehend unbekannt. Es kann jedoch angenommen werden, dass sich für den bedeckten Sandsteinkeuper nur westlich bzw. östlich des Albraufs und somit an den Rändern der Mulde wirksame Entlastungszonen anbieten, da er hier oberflächennah ausstreicht. Sofern im tieferen Sandsteinkeuper hydraulisch wirksame Hohlräume existieren, dürfte sich dort nach dem „leaky“-Aquifer-Prinzip ein Grundwasserüberdruck aufbauen, der oben genannte Grundwasserscheide im Bereich der Mulde bedingt. GEYH et al. (1986) schätzen nach diesem Prinzip für den Sandsteinkeuper unter vergleichbaren Randbedingungen eine Grundwasserneubildung in der Größenordnung von $0,1 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$. Im vorliegenden Fall stellt dies aufgrund der Einzugsgebietsgröße eine nicht unerhebliche Menge an neu gebildetem Grundwasser dar. Unter Berücksichtigung solcher hydraulischer Verhältnisse erscheint der auf Blatt 3 für den bedeckten tieferen Sandsteinkeuper dargestellte, nahezu senkrecht auf die Entlastungszonen des Main- und Regnitztals gerichtete Grundwasserabstrom somit plausibel.

Auf die Fließverhältnisse wirken sich lokal vor allem die Grundwasserentnahmen im Bereich Gundelsheim–Memmelsdorf, Strullendorf–Hirschaid und Poxdorf mit Grundwasserabsenkungen deutlich aus, was u.a. auf die mäßigen bis geringen Durchlässigkeiten im Grundwasserleiter und die eingeschränkte Regenerierung der Ressource zurückgeführt werden kann. Bei Übernutzung tritt durch die Druckentlastung bzw. die fehlende Regenerierung stellenweise sogar eine spürbare Versalzung infolge aufsteigender Tiefenwässer oder einer Stagnation im Grundwasseraustausch ein, wie es am Beispiel der aufgelassenen oder rückgebauten Wasserversorgungsbrunnen in Hallstadt, Breitengüßbach und Kemmern zu beobachten war. Das Grundwasserfließgefälle erreicht unter den gegebenen hydraulischen Bedingungen relativ geringe Werte und liegt meist zwischen 0,1 und 0,5%. Im Bereich der oben genannten Grundwasserentnahmen oder bei geringerer Überdeckung (z.B. westlich der Regnitz) werden auch Gefälle zwischen 0,5 und 1% beobachtet.

Ein tektonischer Einfluss auf die Grundwasserdynamik deutet sich im überdeckten Sandsteinkeuper nur an wenigen Stellen an. So wirken wahrscheinlich die Ausläufer der SE-streichenden Lichtenfelder Störungszone dränierend auf den Grundwasserkörper. Im Bereich der Wassergewinnung in Erlach (Markt Hirschaid) kreuzen sich vermutlich zwei kleinräumige Störungen, die das Gebirge lokal auflockern. Es kommt dort zu erhöhten Durchlässigkeiten entlang des SE-streichenden Störungssastes, was die unterirdische Entwässerung in diese Richtung begünstigt. Im Umgriff der vermuteten Störung entlang des Strullendorfer Baches (Ziegenbachtal) sind die lokalen Differenzen im Grundwasserspiegel wahrscheinlich auf eine erhöhte Einspeisung von Grundwasser aus dem Quartär bei gleichzeitiger Grundwasserentnahme an mehreren Tiefbrunnen zurückzuführen.

Hydraulische Kennwerte

Zur Auswertung der Durchlässigkeiten im Sandsteinkeuper standen 578 Pumpversuche an insgesamt 323 Brunnen zur Verfügung. Für den gesamten Grundwasserleiterkomplex berechnen sich k_f -Werte zwischen $8\cdot 10^{-8}$ und $1\cdot 10^{-3}$ m/s, wovon etwa 80% im Bereich zwischen $1\cdot 10^{-6}$ und $6\cdot 10^{-5}$ m/s liegen (Abb. 3-7). Die relativ große Schwankungsbreite ist vor allem durch die fazielle Ausbildung des Sandsteinkeuper und dessen variierenden Durchklüftungsgrad begründet. Höhere Werte sind dabei an Kluftsysteme gebunden, die entsprechende, meist auf mechanische

Beanspruchung zurückzuführende Kluftweiten aufweisen. Dies ist wahrscheinlich im Wirkungsfeld der Weismain-Hochstadter Störungszone der Fall, wo im Burgsandstein an mehreren Stellen mit $1 \cdot 10^{-4}$ bis $5 \cdot 10^{-4}$ m/s überdurchschnittlich hohe hydraulische Leitfähigkeiten angetroffen wurden. Dort wurde für einen Brunnen die maximale Durchlässigkeit von $1,1 \cdot 10^{-3}$ m/s berechnet. Eine hydraulische Anbindung an Wasser führende Quartärschotter ist hierbei allerdings nicht ganz auszuschließen. Nahezu alle Brunnen mit Durchlässigkeiten von $1 \cdot 10^{-4}$ m/s und höher befinden sich an den Talrändern und weisen eine relativ flachgründige Erschließung auf.

Im Trend zeigt sich für die Gesamtheit aller Brunnen eine Abnahme der Durchlässigkeiten mit der Erschließungstiefe.

Zum Vergleich wurden 146 Durchlässigkeitsbeiwerte aus verschiedenen Gutachten herangezogen. Dabei fällt mit Werten zwischen $2 \cdot 10^{-8}$ bis $7 \cdot 10^{-4}$ m/s eine ähnlich breite Streuung wie bei obigen Berechnungen auf. Etwa 80% der Werte variieren im Bereich von $1,5 \cdot 10^{-6}$ bis $1,3 \cdot 10^{-4}$ m/s. Insgesamt zeichnen sich mit diesen Werten etwas höhere Durchlässigkeiten im Sandsteinkeuper ab.

Bei der Betrachtung aller Durchlässigkeiten ist zu berücksichtigen, dass der Grundwasserleiterkomplex über die Brunnen und Messstellen häufig unvollkommen erschlossen wird, was im Allgemeinen die Vergleichbarkeit der Werte einschränkt. Hinzu kommt noch die Tatsache, dass in der Regel Daten nur über die grundwasserhöffigeren Bereiche im Sandsteinkeuper vorliegen. Wie aus einzelnen Grundwassererkundungen und den Forschungsbohrungen punktuell bekannt, treten neben den hydraulisch begünstigten Zonen auch größere Abschnitte mit geringeren Durchlässig- und Ergiebigkeiten auf. Den Untersuchungen zufolge liegen die Durchlässigkeiten dort überschlägig zwischen $5 \cdot 10^{-7}$ bis $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Die hydraulischen Tests an der Bohrung im Daschendorfer Forst, am Semberg NE Oberhaid sowie E Seesbühl erbrachten Durchlässigkeiten von $2 \cdot 10^{-7}$ bis $2,5 \cdot 10^{-8}$ m/s.

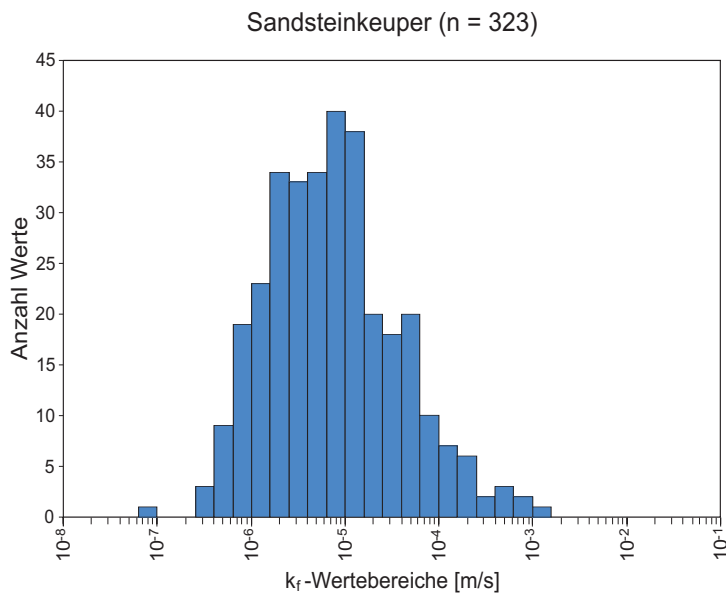


Abb. 3-7: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im Sandsteinkeuper.

Die über Pumpversuche ermittelten spezifischen Ergiebigkeiten der Grundwasseraufschlüsse reichen von 0,01 bis 10 l/(s·m), wobei sich in den höheren Werten teilweise auch der Einfluss angekoppelter quartärer Porengrundwasserleiter zeigt. Mehrheitlich (80%) streuen die Ergiebigkeiten in einer Spannweite von 0,07 und 1,36 l/(s·m). Auffällig hohe Werte (2,5 bis 7 l/(s·m)) werden z.B. entlang der Linie Albersdorf-Untereppach-Ebern angetroffen. Verantwortlich dafür sind offensichtlich die gut geklüfteten Sand- und Dolomitsteine im Abschnitt des Mittleren Burgsandstein. Tendenziell häufen sich die Ergiebigkeiten mit Werten über 1 l/(s·m) nach S, da dort der Anteil speicherfähiger Sandsteine faziell bedingt zunimmt.

Für den Sandsteinkeuper existieren im Regnitzgebiet und in anderen Regionen des Freistaats Bayern indirekte Messungen für das Kluft- und Porenvolumen. Nach Untersuchungen von Kluftkörpern und Bohrkernen ermitteln KRAUSPE (1970), MÜLLER (1970) und DOBNER (1975) ein Gesamtporenvolumen von 8 bis 39%, wobei der nutzbare Hohlraumanteil unter 7% bleibt.

Quellen

Im Sandsteinkeuper wurden etwa 300 Quellen kartiert, die allerdings nur einen Teil der in den Topografischen Karten verzeichneten Quellen darstellen. Die auffällig hohe Quelledichte begründet sich, wie bereits in obigen Abschnitten erläutert, vor allem in der faziellen Ausbildung des Sandsteinkeuper, in der häufig gering leitende und Wasser führende Schichten wechseln. Es handelt sich um Schicht- und Verengungsquellen, seltener um Stauquellen. Die gemessenen Quellschüttungen variieren von 0,01 bis etwa 20 l/s. Über 80% liegen unter 1 l/s und etwa die Hälfte unter 0,1 l/s.

Die Schichtquellen weisen generell geringere Schüttungen auf. Sie sind oft direkt oder stärker von den saisonalen Niederschlägen geprägt, was bei einigen Quellen zu episodischer Wasserführung führt. Die Schichtquellen befinden sich meist entlang der Talhänge in einigem Abstand zu den Talsohlen und entwässern häufig schwebende oder abgetrennte Grundwasservorkommen. Meist sind sie von Hangschutt verschleiert. Je nach räumlicher Ausdehnung der stauenden Schicht und ihrer hydrogeologischen Position können diese Vorkommen auch das „Hauptgrundwasser“ anzapfen. Dies ist wahrscheinlich bei der Quelle an der Hohenmühle in Viereth-Trunstadt der Fall, wo aus den spaltenartigen Öffnungen der dolomitischen Sandsteine des Mittleren Burgsandstein ein beachtlicher Grundwasseraustritt (5–20 l/s) erfolgt und über einen kleinen Stollen gefasst wird (Abb. 3-5). Vermutlich existieren im Umfeld auch hydraulisch wirksame tektonische Strukturen, die bislang aber nicht im Detail kartiert wurden. Neben gefassten Quellen zeigen sich oft schichtorientierte, linienhafte oder flächige, zum Teil sumpftartige Austritte, die örtlich als Quellmulden ausgebildet sind. Lokal tritt auch Grundwasser unter Baumwurzeln zu Tage. Das Quellwasser wird bisweilen in kleinen künstlich angelegten Tümpeln zur Wildtränke (z.B. Hahnrotbrunnen am Hirschberg) oder zur Speisung von Fischteichen (Quelle in Tütschengereuth) gefasst. Aufgrund der geringen Schüttungen und der eingeschränkten Schützbarkeit spielen die Schichtquellen mit wenigen Ausnahmen wasserwirtschaftlich keine Rolle.

Innerhalb tief eingeschnittener Täler wird häufig der Grundwasserkörper über Verengungsquellen drainiert, die in der Vergangenheit und vereinzelt auch noch heute zur Trinkwasserversorgung herangezogen werden. Sie befinden sich überwiegend am Hangfuß, meist im Übergang zur Talfüllung und bilden vereinzelt sehr prägnante Quellmulden aus (z.B. Quelle im Ebenholz N Unterhaid). Aufgrund ihrer Position können sie auch in Verbindung mit einer stauenden Schicht (z.B. Talaue) als Stauquellen definiert werden. In der Regel handelt es sich um Quellen mit perennierendem Grundwasserabfluss. Die Schüttungen erreichen mit bis zu 12 l/s relativ hohe Werte. Typische Vertreter dieses Typs sind die Quellfassungen in Edelbrunn, Schönbrunn, Neubrunn und Unterhaid sowie

die Lauterquelle in Kirchlauter und die Kesselbrunnenquelle in Stettfeld im südlichen Teil der Hassberge oder die Quelle Vahlenbrunn im südlichen Steigerwald (Region 7).

SW Waidhausen dürften die Grundwasseraustritte (z.B. Bruchsbrunnen, Bildbaubrunnen) infolge einer tektonischen Querschnittsverjüngung des Grundwasserleiters zu Tage treten und sind deshalb als Stauquellen zu bezeichnen.

3.2.4.4 Rhätolias

Regionales Vorkommen

In der Planungsregion Oberfranken West umsäumt das Rhät die Fränkische Alb und schließt den Keuper zum Hangenden hin ab. Gegen die sich im Hangenden anschließenden, teils sandig-tonigen Schichten des Lias sind die Rhätbildungen zum Teil nicht eindeutig abtrennbar; beide werden deshalb als Rhätolias-Übergangsschichten zusammengefasst (FREUDENBERGER 1996). Die gesamte Abfolge erreicht nur Mächtigkeiten zwischen 30 und 45 m, aufgrund dessen sie selten großflächig an der Oberfläche ausstreicht. Westlich des Obermain- und Regnitztals bildet sie zusammen mit weiteren Liasschichten häufig den Abschluss markanter inselartiger Höhenzüge, wie z.B. den Luß- und Semberg in den südlichen Hassbergen oder den Distel- und Mainberg in den östlichen Ausläufern des Steigerwalds. Östlich der genannten Talzüge, im Vorland der Fränkischen Alb, streicht der Rhätolias meist als schmales Band aus. Im Bereich der Sandsteinbänke sind dann häufig Verebnungen oder Geländestufen ausgebildet. Im Zusammenspiel mit dem unterlagernden Feuerletten treten insbesondere im Verbreitungsgebiet Grundwasser führender Rhätsandsteine nicht selten Hangrutschungen und Fließerden mit typisch verkippten Gesteinsblöcken in Erscheinung.

Hydrogeologischer Bau und Grundwasserführung

Das 20–30 m mächtige Rhät baut sich aus wechsellagernden Sand- und Tonsteinen auf. Dazwischen sind zum Teil mächtigere helle Sandsteinpakete eingeschaltet. In der Umgebung von Coburg finden sich zahlreiche Steinbrüche, in denen der mittel bis grobkörnige, kaolinhaltige Sandstein als Bausandstein und die Rhättonne zum Teil als hochfeuerfestes Material abgebaut wurden (FREUDENBERGER 1996). Daran schließen die etwa 5 bis 15 m mächtigen Pylonoten- und Angulaten-schichten des Lias an, die ebenso einen Wechsel aus Sand- und Tonsteinen aufzeigen. Den Abschluss bildet der 1 bis 4 m mächtige karbonatisch gebundene grobkörnige Arietensandstein. Der Feuerletten fungiert als Sohle, die tonig-mergeligen Serien des Lias als Überdeckung des Grundwasserleiterkomplexes.

Aufgrund der geringen Mächtigkeit und der orographischen Hochlage wird der Rhätolias insbesondere westlich des Obermains und der Regnitz erosiv zerschnitten, so dass sich häufig voneinander isolierte schwebende Grundwasservorkommen ausbilden. Östlich der Haupttäler taucht der Grundwasserleiterkomplex über weite Strecken rasch unter einer mächtigen Juraüberdeckung nach E bis SE ab und dürfte gebietsweise ein größeres zusammenhängendes Grundwasservorkommen führen, wenngleich die Einheitlichkeit nach POLL (1978) durch vielfache Zwischenschaltung von Tonsteinserien vermutlich einschränkt bleibt. Dort, wo der Rhätolias ausstreicht, sowie im Bereich der schwebenden Grundwasservorkommen ist im Allgemeinen mit ungespannten und in einigen Fällen auch mit teilgespannten Grundwasserverhältnissen zu rechnen. Im Albvorland und im Obermaintal bilden sich unter einer gering leitenden Juraüberdeckung gespannte und im letzteren Fall sogar artesische Verhältnisse aus.

Die Grundwasserführung beschränkt sich im Wesentlichen auf die Sandsteinbänke und dort vorwiegend auf die Klüfte. Die Porosität der Sandsteine dürfte sich nur untergeordnet auf den direkten Wasserumsatz auswirken, obwohl von einem gewissen Speichereffekt ausgegangen werden kann. Grundwasser führend sind vor allem der Bereich der Rhätsandsteine und des Arientensandstein. Zwischen den beiden liegt nach bisherigen Erkenntnissen eine deutliche hydraulische Trennung vor (Kap. 4.3.5.4).

Die isolierten schwebenden Grundwasservorkommen werden in der Regel über zahlreiche Grundwasseraustritte entlang interner Grenzflächen oder der Grenze zum Feuerletten dräniert. Bei einigen Vorkommen sind anhand der Anordnung der Grundwasseraustritte bevorzugte Fließrichtungen zu beobachten (z.B. am Lußberg in nördlich bis östlicher Richtung), andere wiederum zeigen eher diffuse Verhältnisse (z.B. am Semberg). Im Obermaintal N Oberbrunn wurden artesische Verhältnisse angetroffen. Dort taucht der Leiterkomplex von W her unter den quartären Talaquifer ab. Dabei strömt das auf der westlichen Talseite im Festgestein neugebildete Grundwasser dem Schicht-einfallen folgend nach E ab und erzeugt im Talbereich einen Überdruck. Die Druckdifferenz zum quartären Grundwasser beträgt dabei etwa 3–4 m. Aufgrund der Lage der Neubildungsgebiete erscheint die Druckdifferenz als zu niedrig; somit findet wahrscheinlich im Bereich des Talaquifers bereits eine Teilentlastung des gespannten Grundwassers statt. Ähnliche Bedingungen werden bei den zusammenhängenden Vorkommen östlich der Regnitz angetroffen; dort erfolgt eine partielle Entwässerung des Rhätolias an den Stellen, an denen er eine Anbindung an das Regnitz- bzw. Obermaintalquartär besitzt. Dementsprechend bildet sich eine daraufhin ausgerichtete Fließbewegung im Grundwasser aus, die z.B. im Umgriff der Grundwasserentnahmen in Eggolsheim mit einer Fließrichtung nahezu senkrecht auf das Regnitztal – in diesem Fall allerdings entgegen der Schichtlagerung – zu beobachten ist. Vergleichbare Verhältnisse sind E Seigendorf anzutreffen. Nach Messungen des BGu (2003) strömt dort das Grundwasser in südwestlicher Richtung auf das Regnitztal zu. Der Antrieb liegt vermutlich in der flächenhaften, zum Teil über Leakage kontrollierten Grundwasserneubildung im tieferen Rhätolias der Fränkischen Alb und Vorland. Dagegen setzt sich in Bereichen, in denen der Grundwasserleiter oberflächennah vorkommt und keine hydraulische Anbindung an das Quartär besitzt, ein an die Schichtlagerung orientiertes Fließschema durch. Dies zeigen z.B. die von DAFNER (1996) an den Wasserfassungen W Seigendorf durchgeführten Stichtagsmessungen. Generell lässt sich folgern, dass die Druckverhältnisse im Leiterkomplex über die Grundwasserneubildung sowohl im unbedeckten, oberflächennahen als auch im bedeckten, tieferen Rhätolias gesteuert werden.

Da die Potenzialhöhen über weite Strecken und insbesondere in Gebieten mit mächtigerer Juraüberdeckung nur ansatzweise bekannt sind, wurde kein Grundwassergleichenplan für den Grundwasserleiterkomplex des Rhätolias erstellt.

Hydraulische Kennwerte

Zur Auswertung der Durchlässigkeiten im Rhätolias standen 107 Pumpversuche an insgesamt 42 Brunnen zur Verfügung. Für den gesamten Grundwasserleiterkomplex berechnen sich k_f -Werte zwischen $1 \cdot 10^{-7}$ und $8 \cdot 10^{-4}$ m/s, wovon etwa 80% im Bereich zwischen $9 \cdot 10^{-7}$ und $9 \cdot 10^{-5}$ m/s streuen (Abb. 3-8). Höhere Werte treten meist an den Talflanken der Regnitz und in einem Einzelfall an der Rodach auf. Neben der Auflockerung des Gebirges durch Talzusub ist dort auch noch die lokale Tektonik als Einflussfaktor auf die erhöhten Durchlässigkeiten in Betracht zu ziehen.

In verschiedenen Gutachten werden für den Rhätolias an insgesamt 34 Pumpversuchen Durchlässigkeiten von $2 \cdot 10^{-7}$ bis $7 \cdot 10^{-4}$ m/s ermittelt. Etwa 80% davon liegen zwischen $5,2 \cdot 10^{-6}$ und $2,3 \cdot 10^{-4}$ m/s.

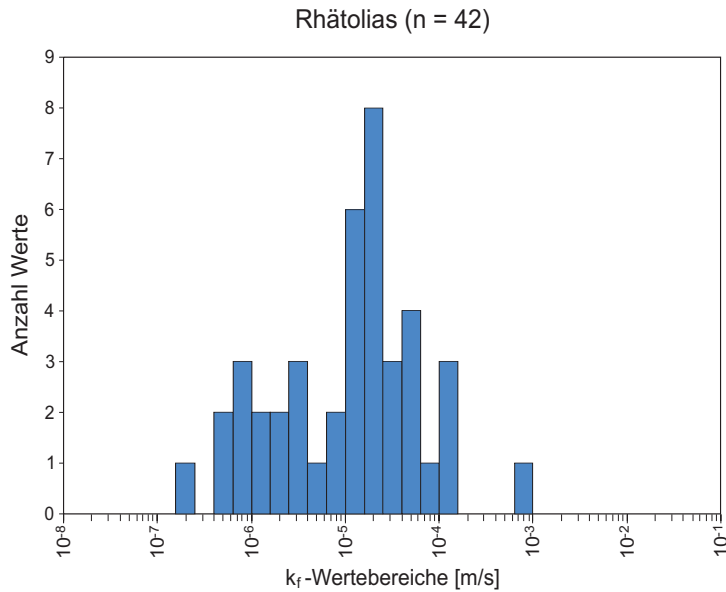


Abb. 3-8: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im Rhätolias.

Die spezifischen Ergiebigkeiten der Brunnen reichen von 0,004 bis 15 l/(s·m), wobei 80% zwischen 0,05 und 2,25 l/(s·m) streuen. LEITZ (1995) geht dabei von einem nutzbaren Hohlraumvolumen von etwa 2% aus. Bezüglich der regionalen Verteilung zeigen sich ähnliche Muster wie bei den Durchlässigkeiten.

Quellen

Für den Rhätolias wurden etwa 90 Quellen in der Region und im näheren Umgriff kartiert. Schichtquellen sind dabei der häufigste Quelltyp. Sie treten meist im Bereich der Rhätsandsteine am Übergang zum Feuerletten oder an den sonstigen Sand-Tonstein-Grenzflächen, vielfach durch Hangschuttmaterial verschleiert, auf. Quellen, die sich eindeutig den Sandsteinen und untergeordnet auch Karbonatgesteinen des Unteren Lias zuordnen lassen, finden sich entlang der westlichen Rahmenhöhen des Regnitztalzuges zwischen Sassanfahrt und Heroldsbach (z.B. Falz- und Angerbrunnen E Großbuchfeld) und belegen lokal mit den darunter liegenden Quellhorizonten im Bereich des Rhät den mehrfachen Stockwerksbau im Rhätolias. Dem Lias entspringen auch die Quellen der ehemaligen Wasserversorgung in Sassanfahrt. Zahlreiche Quellen sind zu touristischen oder privaten Zwecken gefasst, wie z.B. der Melmbrunnen im östlichen Steigerwald oder Einsiedler- und Kammerforstbrunnen in den südlichen Hassbergen. Darüber hinaus erfolgt der Grundwasseraustritt nicht selten, meist im Umfeld der Sohlfläche des Grundwasserstockwerks, linien- oder flächenhaft mit Ausbildung kleinerer Quellmulden oder sumpftartiger Flächen (z.B. Quellbereich am Hohlen Stein und Quellbereich Leistenbrunnen im Lußberger Forst). Besonders auffällige Beispiele hierzu bieten die flächenhaften diffusen Austritte im Forst W Buckenhofen.

Aufgrund der geringeren Grundwassermächtigkeiten kommen im Rhätolias nur vereinzelt Verengungsquellen vor. Dazu dürften die Quellen entlang des Kreuzgrabens bei Kirchsletten oder die Asbachquelle E Oberberndorf gehören. Erstere entspringen auch deutlich einer Vertikalkluft. Als tektonisch bedingte Stauquelle wurde z.B. der Lochbrunnen S Schlammersdorf kartiert.

Die gemessenen Schüttungen der Rhätolias-Quellen liegen zwischen 0,01 und 2 l/s. Sie erreichen einen durchschnittlichen Wert von etwa 0,4 l/s. Trotz der vielfach kleinräumigen Einzugsgebiete schütten unter normalen, lokal typischen Klimaverhältnissen 80% der Quellen ganzjährig, was für eine effektive Grundwasserspeicherung im Leiter spricht. Die oberflächennahen Vorkommen dürf-

ten dabei einen deutlich saisonalen Gang im Grundwasserabfluss aufweisen. Mit 1–2 l/s dokumentieren vor allem die Quellen der zum Teil aufgelassenen Wasserversorgungen Untermerzbach, Sassenfahrt, Klosterlangheim und Reutersbrunn höhere Ergiebigkeiten.

3.2.5 Lias

Die bis zu 100 m mächtigen Ablagerungen des Lias streichen im Untersuchungsgebiet entlang der Jura-Landstufe aus und unterlagern den Dogger und Malm. Dabei besteht die Basis (Lias Alpha) aus Sandstein und Sandstein-Tonstein-Wechselfolgen mit bis zu 40 m Mächtigkeit. Die Abfolge wird bis zum Arietensandstein wegen ihrer Ähnlichkeit zum darunter liegenden Rhät als hydrogeologische Einheit des Rhätolias zusammengefasst. Dieser Grundwasserleiterkomplex wurde im vorherigen Kapitel ausgiebig erläutert. Daran schließen sich bis zu 90 m mächtige Tonsteinfolgen an, die lokal karbonatische Einschaltungen aufweisen. Die bedeutendste Folge ist der Amaltheenton (Lias Delta).

Die Grundwasserführung beschränkt sich auf die Mergel- und Kalksteinbänke des Lias-Gamma und Lias-Epsilon, aus denen örtlich Kluftwasser austritt. Die Grundwasseraustritte können ausnahmslos als Schichtquellen bezeichnet werden. Diese Vorkommen bilden aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit und eingeschränkten horizontalen Ausdehnung keinen größeren zusammenhängenden Grundwasserkörper und sind deshalb wasserwirtschaftlich unbedeutend. Wegen der überwiegend geringen bis sehr geringen Durchlässigkeiten bildet der gesamte Schichtstoß die Grundwasserüberdeckung des Rhätolias-Stockwerks und zusammen mit dem Dogger Alpha die Grundwassersohle des hangenden Dogger-Stockwerks.

3.2.6 Dogger

Der Dogger streicht im Untersuchungsgebiet als schmales Band entlang der Jura-Steilstufe aus und unterlagert den Malm. Die 125–165 m mächtigen Gesteine (MEYER & SCHMIDT-KALER 1981b) des mittleren Jura weisen eine klare Dreigliederung in Opalinuston (Dogger Alpha), Eisensandstein (Dogger Beta) und Eisenoolithkalk bis Ornatenton (Dogger Gamma bis Zeta) auf.

Hydrogeologischer Bau und Grundwasserführung

Der Opalinuston (Dogger Alpha) bildet an der Basis zusammen mit dem Lias Zeta eine Verebnungsfläche. In der relativ einheitlichen Abfolge herrschen pyrithaltige, schwach kalkige Tonsteine vor. Infolge der sehr geringen hydraulischen Leitfähigkeiten fungiert sie als Grundwassersohlschicht des hangenden Grundwasserleiters.

Der 50 bis 70 m mächtige Eisensandstein (Dogger Beta) tritt im Landschaftsbild meist als markanter Sockel hervor. Er baut sich im Wesentlichen aus fein- bis mittelkörnigen Sandsteinen mit Einschaltungen von oft sandig-schluffigen, unterschiedlich mächtigen Tonpaketen und harten Kalksandsteinbänken auf. Der tonig bis karbonatisch gebundene Sandstein verhält sich trotz seiner festen bis mürben bzw. lockeren Lagerung wie ein Kluftgrundwasserleiter. Da der geringe Bindemittelanteil allerdings zu erhöhter Porosität und Permeabilität der feinkörnigen Sandsteine führt, stellt der Porenraum bisweilen einen beträchtlichen Teil des nutzbaren Hohlraumvolumens dar. Dennoch ist für das Wasserleitvermögen die Anordnung und Ausbildung der Klüfte und Schichtfugen bedeutender (APEL 1972). In Bereichen, in denen der Eisensandstein an der Oberfläche ausstreicht, ist vornehmlich mit einem freien Grundwasserspiegel zu rechnen. In östliche Richtung ist mit der zunehmenden Überdeckung eine gespannte Grundwasserdruckfläche ausgebildet. Dies

kann z.B. in Laibarös an den Förderbrunnen der Poxdorfer Gruppe beobachtet werden. Auf die Konstruktion eines Grundwassergleichenplans wurde aufgrund der lückenhaften und zum Teil unsicheren Datenlage verzichtet.

Die bis zu 32 m mächtige Schichtenfolge des Eisenoolithkalk und des Ornatenton (Dogger Gamma bis Zeta) besteht überwiegend aus Karbonaten und mergeligen Tonsteinen, wobei insbesondere letztere zusammen mit den Kalkmergelsteinen des Malm (Malm Alpha) die Deckschicht des Grundwasservorkommens im Eisensandstein bilden. Bereichsweise kommt es bei schwach durchlässigen Trennschichten zu Grundwasserübertritten aus dem darüber liegenden Malm-Aquifer.

Hydraulische Kennwerte

Von den insgesamt 11 Brunnen, die ausschließlich den Doggereisensandstein erschließen, liegen für das Untersuchungsgebiet lediglich fünf Auswertungen von Pumpversuchen vor. Pumpstufen, die dabei offensichtlich die Leistungsfähigkeit eines Brunnens überstiegen, blieben unberücksichtigt.

Die ermittelten Durchlässigkeiten des Doggereisensandstein liegen demnach zwischen $1 \cdot 10^{-5}$ und $4,5 \cdot 10^{-6}$ m/s, bei einem Mittelwert von $7,5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Eine ähnliche Größenordnung zeigen die Durchlässigkeiten, die im Rahmen verschiedener Gutachten ermittelt wurden. Hier erreichen die Werte $1 \cdot 10^{-5}$ bis $5,3 \cdot 10^{-5}$ m/s. Diese eher mäßig bis geringen Werte spiegeln sich in den geringen spezifischen Ergiebigkeiten von 0,01 bis 0,46 l/(s·m) wider.

Quellen

Im Ausstrich des Dogger treten 197 der insgesamt 213 kartierten Quellen als Schichtquellen zutage. Davon schütten 131 perennierend und sind mehrheitlich für die Wasserversorgung gefasst. Hauptquellhorizont ist die Grenze Opalinuston/Doggereisensandstein. Die Quellaustritte täuschen nicht selten den Opalinuston als Grundwasser leitende Schicht vor. Tatsächlich liegen die Schichtquellen häufig unter dem Schuttmantel, der den eigentlichen Quellhorizont verschleiert und treten dann in den Hangschuttfächern über dem Opalinuston aus. Weitere Schichtquellhorizonte existieren über den schluffig-tonigen Zwischenlagen der Sandsteinfoolge. Die meist intermittierenden Quellen kennzeichnen dort ein schwebendes Grundwasserstockwerk. Darüber hinaus wurden insgesamt 8 Stauquellen kartiert, die ebenfalls als Hangschuttquellen zutage treten.

Generell sind die Schüttungen der Quellen im Dogger gering. Sie liegen zwischen 0,1 und 7 l/s. Die Schüttungsmengen sind meist gleichmäßig und weisen keine großen Schwankungen auf. Sie sind also nicht unmittelbar durch Niederschläge beeinflusst. Stark schüttende Quellen, die aus Spalten des Doggersandsteins entspringen (z.B. Steigerquellen, N Ützing), stammen größtenteils von der Dogger/Malm-Grenze. Sie fließen über die Ornatenton-Verebnung hinweg, versickern im zerklüfteten Sandstein, und treten schließlich aus. Ebenso infiltriert oft aus dem Malm stammendes Wasser vom Hangschutt in den Doggersandstein und tritt später als Mischwasser wieder aus.

3.2.7 Malm

Die gut geklüfteten und zum Teil stark verkarsteten karbonatischen Gesteine des Malm streichen im E des Untersuchungsgebiets großflächig aus und sind die Stufenbildner der Jura-Landstufe. Sie formen die flachwellige Hochfläche der Nördlichen Frankenalb. Karstformen (Dolinen, Ponore, Karren, Trockentäler, Poljen) und gelegentlich tief in die Malmtafel eingeschnittene tektonisch vorgezeichnete Kasten- und Kerbtäler gestalten die Oberfläche und bilden das typische Landschaftsbild der Malmhochfläche.

Hydrogeologischer Bau und Grundwasserführung

In der Planungsregion erreicht der Malm eine Mächtigkeit von etwa 150 bis 200 m. Im Bereich der Hollfelder und Veldensteiner Mulde werden dabei die maximalen Mächtigkeiten angetroffen. Die Schichten fallen im Westen flach um ca. 1° in Richtung der Frankalb-Mulde ein (E/NE), im E mit geringeren Beträgen nach SW in Richtung der Hollfelder Störung und im N in südliche Richtung.

An der Basis der Einheit dominieren mergelbetonte Karbonate, die nach MEYER (1972a) nördlich der Wiesent-Riffschranke (Linie Hollfeld-Forchheim) einen Mergelanteil von etwa 40%, südlich davon von etwa 20%, aufweisen. Zum Hangenden hin nimmt der Anteil karbonatischer Gesteine zu. Dabei unterscheiden sich bankige Ausbildungen der Schichtfazies von massigen Kalk- bzw. Dolomitgesteinen der Rifffazies.

Der untere Malm Alpha bildet vor allem nördlich der Wiesent-Riffschranke zusammen mit dem Ornatenton (Oberer Dogger) die Grundwassersohlschicht des Malm-Grundwasserstockwerks. Südlich der Wiesent-Riffschranke und in Bereichen, in denen der Malm Alpha in Rifffazies ausgebildet ist, wirkt allein der Ornatenton Grundwasser hemmend. Die darüber folgenden Ablagerungen (Malm Beta bis Zeta) sind mit Ausnahme der Malm Gamma Schichtfazies (*Platynota-Schichten und Crusoliensismergel*) Grundwasser leitend. Dieser Schichtkomplex lässt sich als Kluft-Karst-Grundwasserleiter definieren. Die Hauptkluftrichtung ist NW–SE bis WNW–ESE mit einem relativ steilen Einfallen von 80–90° (APEL & BÜTTNER 1995).

Im Rahmen der Verkarstungsprozesse werden Trennfugen zum Teil zu Gerinnen und Höhlen erweitert, wodurch der Grundwasserdurchsatz beträchtlich zunehmen kann. Dies betrifft meist den Malm in massiger Fazies. In der Schichtfazies erfolgt die Grundwasserbewegung und -speicherung jedoch vermehrt entlang schmaler Fugen und Klüfte. Die Malm Gamma Schichtfazies wird weniger dicht von wasserwegsamem Klüften und Bankfugen durchzogen als die umgebenden Kalk- und Dolomitgesteine und fungiert deshalb als lokaler Grundwasserhemmer.

Das Karst-Grundwasserstockwerk im Malm wird in Seichten und Tiefen Karst gegliedert. Beim Seichten Karst liegt die Grundwassersohlschicht – also vereinfacht die Dogger/Malm-Grenze – über dem Niveau des lokalen Vorfluters. Im Bereich des Tiefen Karst taucht die Grundwassersohlschicht – im Idealfall weit – unter dieses Niveau ab. Da die Tiefenlage der Grundwassersohlschicht im Untersuchungsgebiet eng mit den großräumigen Verbiegungen verbunden ist, gehört der zentrale Bereich der Frankenalb-Mulde zum Tiefen Karst. Die Randbereiche, vor allem der Albwestrand, zählt größtenteils zum Seichten Karst. Die Grenze zwischen Tiefem Karst und Seichtem Karst ist naturgemäß unscharf. Innerhalb der Region verläuft sie nach APEL & BÜTTNER (1995) parallel zum Rand der Jura Landstufe (Albtrauf), wobei ihr Abstand albeinwärts von diesem zwischen 2 und 7 km, im Mittel um 4 km beträgt.

Im Seichten Karst bleibt die Karstwasserspeicherkapazität im Gegensatz zum Tiefen Karst gering. Bei Ersterem werden insbesondere Schüttung, Temperatur und Trübung von Quellen in unterschiedlichem Maß von Oberflächeneinflüssen, insbesondere durch die Witterung, beeinflusst.

Hydraulische Kennwerte

Für die Ermittlung der Durchlässigkeitsbeiwerte im Malm wurden insgesamt 66 Pumpversuche von 31 Brunnen ausgewertet. Davon erschließen 7 den Seichten Karst, die übrigen den Tiefen Karst. Die Durchlässigkeitsbeiwerte liegen zwischen $6 \cdot 10^{-7}$ und $5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Bei einem Medianwert von $5 \cdot 10^{-5}$ m/s entspricht dies einer mäßigen Trennfugendurchlässigkeit. Die große Streubreite der Werte hängt in erster Linie mit der unterschiedlichen Verkarstung des Gebirges zusammen.

Die geringe Datendichte lässt jedoch keine eindeutige Regionalisierung zu. Tendenziell sind die Durchlässigkeiten im Seichten Karst sowie nördlich der Wiesent-Riffschranke geringer.

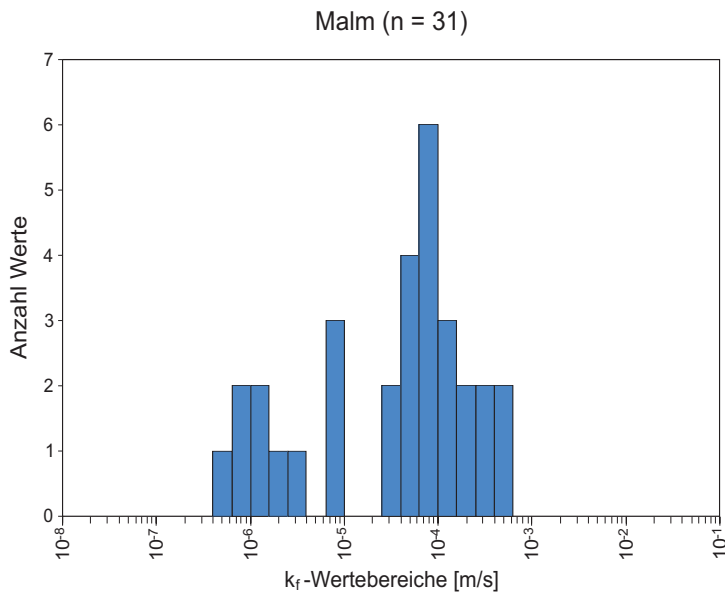


Abb. 3-9. Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte des Malm.

Die spezifischen Ergiebigkeiten der Brunnen streuen zwischen 0,1 und 34,1 l/(s·m). Der Mittelwert beträgt 6,5 l/(s·m), der Median 2,2 l/(s·m). Die relativ große Bandbreite der Ergiebigkeiten dürfte in erster Linie mit einer unterschiedlich guten Anbindung der Brunnen an die grundwasserhöffigen Zonen im Aquifer zusammenhängen. So sind die spezifischen Ergiebigkeiten im Seichten Karst geringer, im Tiefen deutlich höher.

Grundwasseroberfläche

Für die Erstellung des Grundwassergleichenplans auf Blatt 3 der Kartenbeilagen wurden als Grundlage die Grundwassergleichen des Projektes „Hydrogeologie der Nördlichen Frankenalb“ (APEL & BÜTTNER 1995) übernommen und anhand neuer Bohrdaten überarbeitet. Darüber hinaus wurde die Malmbasis angepasst. Die Durchlässigkeit ist wegen der Klüfte und Gerinne sehr inhomogen, weshalb die Karstwasserbewegung nicht immer senkrecht zu den Grundwassergleichen erfolgt, sondern sich auch an der Ausrichtung des Trennflächenmusters orientiert.

In der Planungsregion liegt die Grundwasseroberfläche meist unterhalb der Malmoberfläche (freies Grundwasser). Stellenweise sind die Grundwasser führenden Schichten von Kreidesedimenten, tertiären Ablehmen und/oder quartären Schichten bedeckt. Auch hier liegt die Grundwasseroberfläche unterhalb der jeweiligen Bedeckung.

Die Vorfluter verlaufen vorwiegend in Richtung der Hauptklüfte (NW-SE) und erlauben deshalb eine Untergliederung in Teil-Einzugsgebiete:

Das Regnitz-Einzugsgebiet wird vom Main-Einzugsgebiet durch eine übergeordnete Grundwasserscheide getrennt. Dabei entwässern die Einzugsgebiete der Aufseß, der Leinleiter, der Trubach über die Wiesent in die Regnitz, die bei Bamberg in den Main mündet. Die nördlichen bzw. nordwestlichen Einzugsgebiete entwässern direkt in den Main.

Im W trennt eine parallel zum Albrand verlaufende Grundwasserscheide den zum Albrand bzw. zum Leinleitertal gerichteten Grundwasserstrom von dem zur Aufseß bzw. zur Wiesent. Im N begrenzt sie die unterirdischen Einzugsgebiete von Wiesent und Weismain bzw. Krassach und im NW die Einzugsgebiete des Lauterbachs vom Ellernbach und der Wiesent.

Weitere Grundwasserscheiden trennen die Einzugsgebiete von Wiesent und Aufseß sowie Wiesent und Trubach.

Am Albrand, vor allem im Seichten Karst, ist der Grundwasserleiter morphologisch bedingt stark gegliedert. Die Grundwasserisohypsen sind dort engständig; die Einzugsgebiete der Bäche sind voneinander abgegrenzt. Das Grundwassergefälle im Seichten Karst beträgt im N zwischen 1,5 und 2%, am westlichen Albrand zum Leinleitertal 2% und am südwestlichen Albrand zwischen 2 und 4%.

In Richtung der Muldenachsen, nahe der Wiesentquelle, in der Hollfelder Mulde, im Bereich der Aufseß und im SW in der Gräfenberger Mulde, im Tiefen Karst, sind die Grundwassergleichen weitständiger mit einem durchschnittlichen Gefälle von 0,5 bis 1%.

Quellen

Im Vergleich zu anderen hydrogeologischen Einheiten in der Planungsregion ist die Quelledichte im Malm auffallend gering. Dies ist typisch für den Karst, da in weiten Bereichen hohe Gebirgsdurchlässigkeiten vorliegen und Grundwasser hemmende Schichten, die zur Ausbildung schwebender Grundwasservorkommen führen, größtenteils fehlen.

Im Seichten Karst treten hauptsächlich Schicht- oder Überlaufquellen aus. Die Austrittsstellen liegen an der Grenze Dogger/Malm, seltener im oder über dem Malm Alpha. Diese Quellen sind stark von der Witterung beeinflusst. Sie reagieren auf heftige Regenfälle oder Schneeschmelze mit starken Schüttungsschwankungen, was zudem Schwankungen im Jahresgang der physikalischen und chemischen Parameter der Grundwässer bedingt. Die geringe Karstwasserspeicherkapazität wird nach solchen Ereignissen durch eine Eintrübung des Quellwassers sichtbar. Die mittlere Schüttung der Quellen ist mit 10 l/s relativ gering für den Malm, was mitunter am schwachen Einfallen der Schichten nach Osten liegt, da das Wasser sich hier gegen das allgemeine Einfallen der Juraschichten bewegen muss. Häufig sind die Schichtquellen auch von mächtigen Schuttschürzen überdeckt, wodurch sich die Quellaustritte talwärts verlagern. Vereinzelt infiltriert Wasser in den oberflächennah aufgelockerten Doggersandstein und tritt an der Oberkante des Opalinuston als Mischwasser vermengt mit Doggerwasser aus (HEGENBERGER & SCHIRMER 1967).

Am Albrand kommen stärker schüttende Quellen bzw. Quellgruppen im Seichten Karst vor. Sie entspringen in einem Bereich, in dem die Karstbasis tektonisch bedingt bereits rasch unter die Vorfluter abtaucht. Es handelt sich um Mischformen von Schicht-, Stau-, Überlauf- oder Verengungsquellen, die mit Mindestschüttungen zwischen 50 l/s und ca. 100 l/s ein ähnliches Schüttungsverhalten wie die Quellen des Tiefen Karst aufweisen, z.B. die Thosmühlquelle NW Wolkenstein, die Quelle bei Schwabthal und Serkendorf und die Quellgruppe NE Rossdach (bruchtektonisch abgesenkte Scholle).

Hangende Grundwasservorkommen werden v.a. an Ton-Mergelhorizonten des Malm Gamma beobachtet. Diese meist intermittierenden Quellen haben eine geringe Schüttung.

Im Schwankungsbereich der Grundwasseroberfläche werden sogenannte Hungerbrunnen aktiv, wenn infolge langer Niederschläge der Karstwasserstand steigt, z.B. der Große und Kleine Tumbler im Leinleitertal, SW Hohenplöz sowie zwei weitere im Klingental, dem Trockental oberhalb der Aufseßquelle.

Die Quellen des Tiefen Karst sind vorwiegend Stauquellen. Sie treten häufig in Quelltöpfen oder Quellweihern zu Tage (z.B. Wiesenthauptquelle und Aufseßquelle). Sie besitzen häufig hohe Schüttungsraten und zeigen im Vergleich zu den Quellen des Seichten Karst ein relativ ausgeglichenes Schüttungsverhalten. Die meisten Quellen schütten zwischen 10 und 50 l/s, einige erreichen bis zu 100 l/s oder sogar deutlich darüber, z.B. die Stempfermühlquelle mit etwa 400–600 l/s. Schüttungsextrema treten zeitlich verzögert zu Trocken- und Nasswetterperioden auf. Jahreszeitliche Schwankungen sind von geringer Bedeutung.

3.2.8 Quartär

In der Planungsregion und ihrem Umgriff werden hydrogeologisch bedeutsame quartäre Ablagerungen im Bereich der Talräume von Main und Regnitz sowie untergeordnet auch der Nebentäler angetroffen. Die Anlage des Talsystems geht auf mehrere, zeitlich aufeinander folgende Erosions- und Akkumulationsphasen während des Pleistozän und Holozän zurück. Von alt nach jung und von oben nach unten lassen sich vor allem im Main- und Regnitztal Ablagerungen von Haupt-, Mittel-, Nieder- und Vorterrassen sowie der Talauie unterscheiden. Diese Terrassenabfolge ist teilweise auch in den Nebentälern entwickelt bzw. nachgewiesen. Erläuterungen zur räumlich-zeitlichen Entwicklung des Talsystems finden sich in KÖRBER (1962), SCHIRMER (1978), POLL (1978) und EBERLEIN (1987).

Hydrogeologisch sind die Sand- und Kiesablagerungen (Flussschotter) vorwiegend im Bereich der Talauie sowie der Vor- und Niederterrasse von Bedeutung. Sie definieren zumeist auch die Begrenzung des zusammenhängenden Grundwassers im quartären Grundwasserkörper. Generell handelt es sich um Porengrundwasserleiter mit zum Teil hohen Ergiebigkeiten. Gleichzeitig stellt die Talfüllung auch häufig die hydraulische Entlastungszone für die sie umgebenden Grundwasservorkommen im Festgestein dar. Die Talräume lassen sich aufgrund genetischer und hydrogeologischer Aspekte sowie unterschiedlicher geologischer Einzugsgebiete vereinfacht in folgende Bereiche gliedern (Abb. 3-10):

Haupttäler

- Main
- Regnitz
- Obermain
- Bamberger Kessel

Nebentäler (geologische Einzugsgebiete)

- Aurach bis Aisch (überwiegend Sandsteinkeuper bis Rhätholias)
- Leitenbach bis Wiesent (überwiegend Feuerletten bis Malm)
- Baunach bis Itz (überwiegend Sandsteinkeuper bis Lias)
- Rodach (überwiegend Buntsandstein bis Paläozoikum)

Der Schwerpunkt folgender Ausführungen liegt in der Beschreibung der Haupttäler, für die neben zahlreichen Bohr- und Grundwasseraufschlüssen auch eine modellierte Grundwasseroberfläche und Quartärbasis vorliegen.

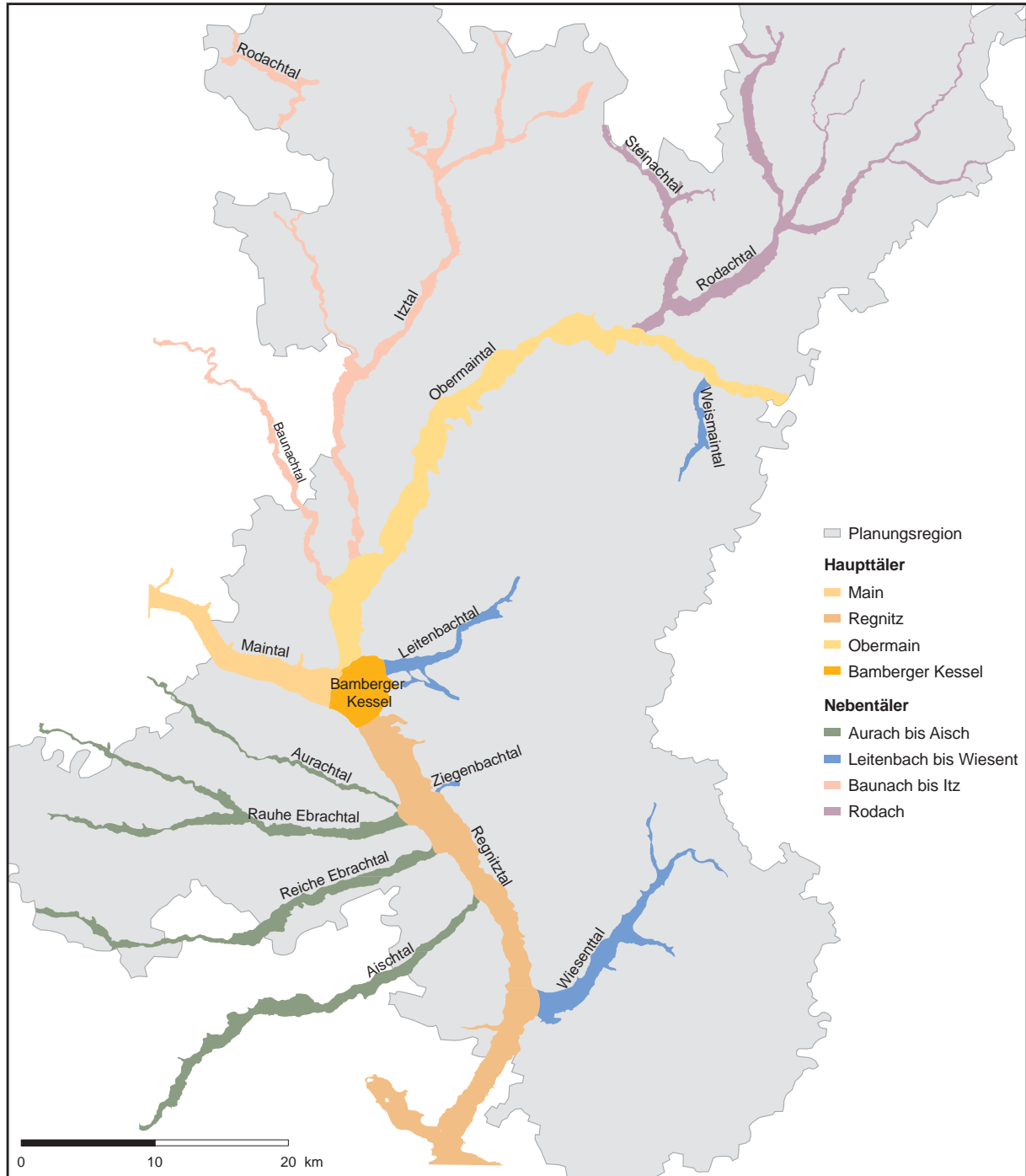


Abb. 3-10: Untersuchte Haupt- und Nebentäler in der Region 4 und angrenzenden Regionen.

3.2.8.1 Haupttäler

Main, Regnitz und Obermain bilden in der Region Oberfranken West die Haupttäler; sie vereinen sich im Bereich des Bamberger Kessels.

Das Maintal zwischen Eitmann und Bamberg ist über weite Strecken durch eine markante morphologische Abgrenzung zwischen dem Festgesteinsrahmen aus Sandstein- und Gipskeuper und der Talaue gekennzeichnet. Terrassen finden sich in nennenswerter Ausdehnung nur auf der nördlichen Talseite zwischen Dörfleins und Stettfeld. In seiner Längsachse erreicht das Tal für diesen Abschnitt eine Ausdehnung von etwa 17 km mit einer von W (1,1 km) nach E (3 km) kontinuierlich zunehmenden Breite. Das Gelände fällt entlang der Talsohle von etwa 233 m ü. NN im Bereich des Bamberger Kessels auf etwa 225 m ü. NN bei Ebelsbach/Eitmann, was einem mittleren Gefälle von 0,5‰ entspricht.

Das Obermaintal zeigt vom Bamberger Kessel bis etwa Lichtenfels eine auffällig asymmetrische Talform. Während sich die rechtsmainische Talflanke relativ steil aus der Talaue emporhebt, weist der linksmainische Talrand einen flachen Anstieg mit größeren Terrassenflächen auf. Von Lichtenfels mainaufwärts wird dieser Saum altpleistozäner Terrassen schmaler und das Tal mit Ausnahmen bei Michelau und Trieb zunehmend enger. Der geologische Rahmen des Obermaintals reicht stratigraphisch vom Burgsandstein über Feuerletten und Rhätolias bis zum Lias. Die breitesten Stellen des Grundwasser erfüllten Talraums werden mit 2 bis 2,5 km am Unterlauf zwischen Bamberger Kessel und Itzmündung angetroffen. Ansonsten wird bis auf wenige Engstellen eine Breite zwischen 1,2 und 2 km gemessen, ab Höchststadt mainaufwärts im Durchschnitt nur noch 850 m. Das Gelände der Talaue fällt auf der hier untersuchten etwa 50 km langen Talstrecke von 285 m ü. NN bei Mainleus bis auf 234 m ü. NN bei Hallstadt, was einem durchschnittlichen Gefälle von 0,8‰ entspricht.

Der hier bearbeitete Abschnitt des Regnitztals zeichnet sich in weiten Teilen ebenso durch eine asymmetrische Talform aus. Vor allem zwischen Bamberger Kessel und Forchheim ragt die westliche Talflanke steil hervor, während die östliche Talseite deutlich flacher und durch aufeinander folgende Terrassen stufenartig ansteigt. Im Bereich von Alterlangen sind die Verhältnisse genau umgekehrt. Nach LANG (1970) hängt die Asymmetrie mit jungen Schollenverkipplungen entlang des Talrandbruches und mit der unterschiedlichen Sedimentfracht der westlichen und östlichen Regnitztributäre zusammen. Den geologischen Rahmen bilden Schichtglieder vom Sandsteinkeuper über Feuerletten und Rhätolias bis hin zum untersten Lias. Zwischen Erlangen und Hirschaid erreicht der Grundwasser erfüllte Talbereich Breiten zwischen 1,2 und 1,8 km, weiter stromabwärts bis zum Bamberger Kessel im Mittel 2,3 km. Die Geländeoberfläche entlang der Talsohle fällt auf der etwa 37 km langen Strecke zwischen Erlangen und Bamberg von 270 auf 237 m ü. NN, was einem durchschnittlichen Gefälle von 0,9‰ entspricht.

Der Bamberger Kessel umfasst eine Fläche von etwa 14 km² im Bereich der Mündungen von Obermain, Regnitz und Leitenbach. Nach FREYBERG (1955) beruht der Kessel in erster Linie auf tektonischen und geologischen Gegebenheiten. Als Grenze wurde eine Linie angesetzt, die östlich an der Einmündung des Leitenbachtals, westlich und nördlich entlang der Maintal-Obermaintalrinne und südlich quer zur ersten Verengung im Regnitztal verläuft.

Quartärbasis und Mächtigkeiten

In der Beilage 1 ist die Quartärbasis der Haupttäler sowie der Unterläufe von Wiesent und Rodach dargestellt. Sie wurde zunächst rechnergestützt unter Verwendung von verschiedenen Interpolationsansätzen (TIN, Kriging, Inverse Distanzen etc.) modelliert und in einem zweiten Schritt manuell nach geologischen Vorstellungen grundlegend überarbeitet. Im Hinblick auf die sehr lang gestreckten, vergleichsweise schmalen Talkörper ergaben sich meist sehr ungünstige Verteilungsdichten der immerhin 3 262 Bohrungen, so dass der manuellen Überarbeitung eine größere Bedeutung zukam. Neben den 338 Bohrungen, die das Festgestein nicht erreichten, konnten so auch aus den Arbeiten von DOBNER (1980), KOSCHEL (1970), LANG (1970) und EBERLEIN (1987) stammende Interpretationen zur Quartärbasis direkt bei der Erstellung berücksichtigt werden. Darüber hinaus war es möglich, einzelne Bohrungen während der Modellierung zu überprüfen und ggf. bezüglich ihrer Koordinaten (in der Regel Geländehöhe) und Quartärbasis zu korrigieren. Insgesamt wurden 258 Bohrungen auf diese Weise nachträglich modifiziert. Es wurden zusätzlich komplexe Rinnenstrukturen angenommen, deren Längsachsen anhand konstruierter Tiefenlinien als Orientierung bei der Modellierung Berücksichtigung fanden. Die Tiefenlinien ihrerseits wurden halbautomatisch entlang von maximalen Tiefenwerten der Quartärbasis einzelner Bohrungen konstruiert. So wurden einige „abflusslose“ Hohlformen, die sich aufgrund kleinräumig stark variabler Tiefenlagen zwangsläufig ergeben hätten, vermieden.

Insgesamt zeigt sich ein lebhaftes Relief mit partiell ausgeprägten Rinnenstrukturen, was neben der ständig variierenden Intensität von Erosions- und Akkumulationsereignissen sicherlich auf den regen Wechsel unterschiedlich widerstandsfähiger Gesteine im Untergrund zurückgeführt werden kann. Jüngere tektonische Senkungen und Hebungen sind zumindest lokal ebenso in Betracht zu ziehen, beispielsweise in Alterlangen, Eggolsheim und Staffelstein. Der präquartäre Untergrund bildet ausnahmslos die Sohlfläche. Vorherrschend sind dabei Gesteine des Sandsteinkeuper und Feuerletten. Zwischen Eltmann und Staffelbach werden sie von den Ton-, Mergel-, Dolomit- und Sandsteinen des Gipskeuper abgelöst. Im Obermaintal zwischen Ebensfeld und Lichtenfels und vereinzelt im Regnitztal um Eggolsheim werden an der Quartärbasis auch Sand- und Tonsteine des Rhätolias und Lias angetroffen.

Das Maintal ist als relativ gleichmäßiges Sohlental mit einer weniger stark ausgeprägten Tiefenrinne ausgebildet, die nur an wenigen Stellen größere Reliefunterschiede erkennen lässt. Demzufolge sind die Mächtigkeitsunterschiede nicht so deutlich. Entlang der Tiefenrinne erreichen die Talfüllungen Mächtigkeiten zwischen 8 und 12 m, in seltenen Fällen wie z.B. in Ebelsbach und Viereth liegen sie auch geringfügig darüber. Daran schließt ein relativ breiter Saum mit Mächtigkeiten zwischen 5 und 7 m an. Er reicht in vielen Fällen bis nahe an die Talbegrenzung. Aufragungen des präquartären Untergrundes sorgen vor allem im nördlichen Talbereich um Dörfleins und Staffelbach für geringere Mächtigkeiten; sie liegen dann zwischen 1 und 5 m.

Im Obermaintal zeigt sich am Unterlauf ein ähnliches Bild wie im Maintal; ab Ebensfeld bis Marktzeuln treten stellenweise deutlichere Reliefunterschiede auf, die durch schmale Tiefenrinnen dokumentiert werden. Weiter mainaufwärts ist ein ruhigeres Relief mit einer verhältnismäßig gleichförmigen Wanne ausgebildet. Insgesamt werden im Vergleich zum Maintal über weite Strecken geringere Mächtigkeiten angetroffen; größtenteils liegen sie zwischen 5 und 7 m. Im Unterlauf und im Bereich der Tiefenrinne bei Staffelstein und Michelau sind auch größere Mächtigkeiten mit stellenweise bis zu 12 m verbreitet. Sehr große Mächtigkeiten, die zwischen 12 und 20 m erreichen können, werden vereinzelt nur im Umfeld älterer Terrassen und im Einmündungsgebiet der Nebentäler festgestellt.

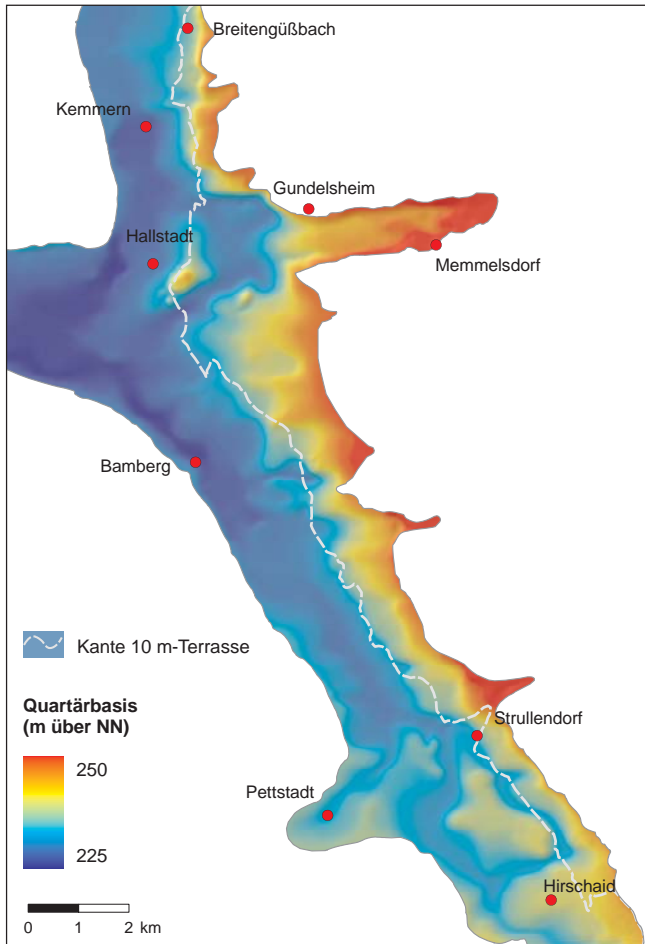


Abb. 3-11: Höhenlage der Quartärbasis im Bamberger Kessel und nördlichen Regnitztal (Relief 5-fach überhöht).

Im Regnitztal ist die Quartärbasis nahezu im gesamten Verlauf durch eine stark eingetiefte Rinnenstruktur gekennzeichnet. Eintiefung und seitliche Ausdehnung der Struktur sind jedoch nicht überall gleich stark ausgeprägt. Während im Bereich um Alterlangen/Möhrendorf sowie zwischen Forchheim und Strullendorf eine schmale zum Teil verzweigte Eintiefung deutlich hervortritt (Abb. 3-11), setzt sich in den übrigen Abschnitten S Forchheim und im Unterlauf eine wesentlich breitere und weniger markante Tiefenstruktur durch. Im Umfeld der Rinnen liegen die Mächtigkeiten zwischen Alterlangen und Strullendorf sehr häufig in einer Spannweite von 10 bis 16 m, mancherorts auch deutlich darüber. In Alterlangen werden nicht selten Mächtigkeiten über 20 m angetroffen; sie dokumentieren mit bis zu 33 m auch die Extremwerte des gesamten Untersuchungsgebietes.

Im Bamberger Kessel dominieren im Ostteil tief eingeschnittene Rinnen und vereinzelt sogar bis an die Oberfläche ragende Festgesteinsrücken, während nach W ein weniger reliefiertes Becken anschließt (Abb. 3-11). Die Anlage des östlichen Reliefs geht vermutlich auf ein älteres, vom Obermain in das Regnitztal übergehendes, verfülltes Rinnensystem zurück, welches in nachfolgenden Erosionsphasen vom Leitenbachtal her erneut ausgeräumt und partiell tiefer gelegt wurde. Es fällt auf, dass die tieferen Strukturen vor allem im oder nahe des Feuerlettenausstrichs zu finden sind. Im Bereich der Rinnen sind mit bis zu 18 m beachtliche Mächtigkeiten nachgewiesen. In der Fortsetzung der Regnitztalstruktur am westlichen Kesselrand werden 8 bis 12 m ermittelt, ansonsten liegen sie überwiegend in einer Spannweite von 4 bis 8 m, auf den Festgesteinsrücken auch darunter.

Hydrogeologischer Bau und Grundwasserführung

Nach SCHIRMER (1978), DOBNER (1984) und LAGALLY (1984) folgen die Talfüllungen (Terrassen) im vertikalen Aufbau von unten nach oben im Allgemeinen nachstehendem Schema: basale grobkies- und blockreiche Schotter – kiesreiche Schotter mit wechselndem Sandgehalt – Sande mit nach oben abnehmendem Kiesgehalt – bindige Auensedimente. Häufig überlagern sich mehrere dieser Abfolgen diskordant oder sie sind aufgrund unvollständiger Ausräumung ineinander geschachtelt, so dass räumlich recht komplexe Sedimentkörper vorkommen. Bindige Sedimente treten im Normalfall in den Hintergrund und werden entweder als Matrixanteil oder geringer mächtige Linsen bzw. Bänder angetroffen. Im Obermaintal zwischen Unterzettlitz-Staffelstein und Michelau-Trieb sind durchhaltende bindige Horizonte zu vermuten, da dort schwebende Grundwasservorkommen nachgewiesen sind. Mächtigere feinkörnige Auffüllungen finden sich in der Regel oberflächennah im Bereich jüngerer Aueablagerungen und in Verzahnung mit Schutt und Schwemmfächern am Talrand sowie im Einmündungsgebiet von Seitentälern und darüber hinaus in verfüllten, verlandeten Flussschlingen. Letztere greifen in Form von mehrere Meter mächtigen Rinnen in den sandig-kiesigen Untergrund ein und können daher die ansonsten guten Wasserwegsamkeiten im Quartär stellenweise erheblich beeinträchtigen.

In den zusammenfassenden Untersuchungen von SCHIRMER (1978) ist im Talabschnitt des Obermains der Kieskorn-Anteil in der Talfüllung generell am stärksten vertreten, während die Sand- und Feinfraktionen deutlich zurücktreten. Im Maintal nimmt der Sandanteil zu Lasten der Kiesfraktion zu. Auffällig ist die Dominanz des Sandkorns im Regnitztal, was durch die Beschreibungen von EBERLEIN (1987) und LAGALLY (1984) weitestgehend bestätigt wird.

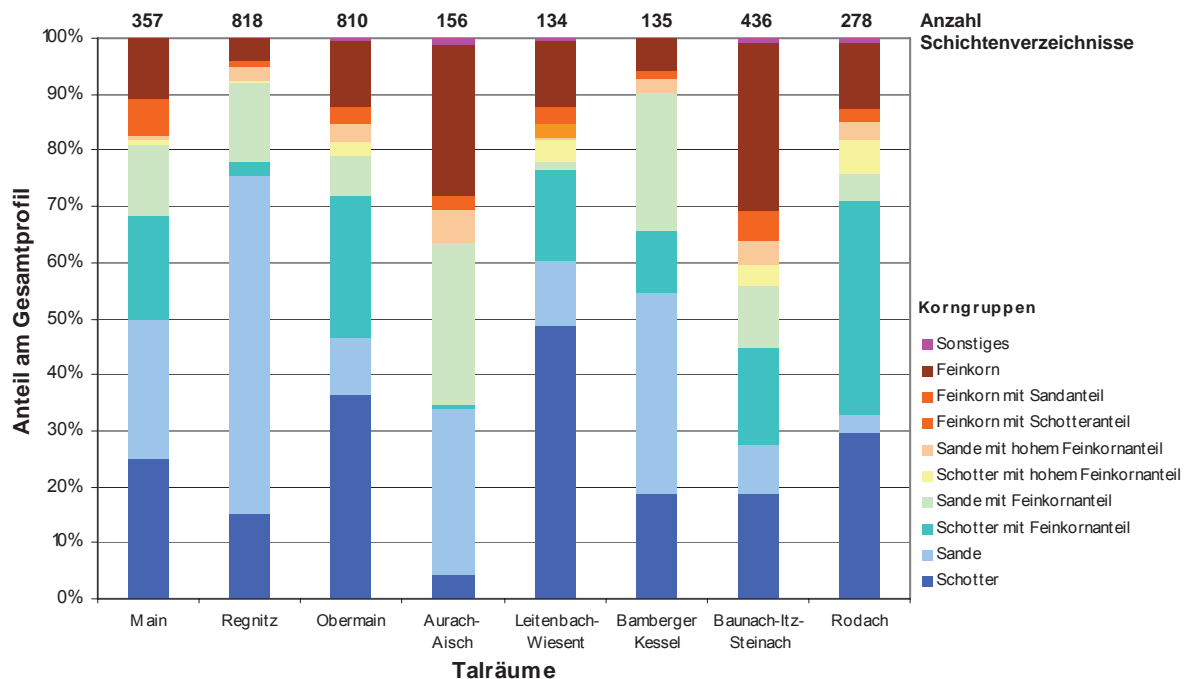


Abb. 3-12: Prozentualer Anteil hydraulisch relevanter Korngruppen am grundwassererfüllten Gesamtprofil der Haupt- und Nebentäler.

Durch eigene Untersuchungen wurden im Grundwasser erfüllten Bereich der Talfüllung in den Haupttälern insgesamt 2 120 Schichtenverzeichnisse von Bohrungen statistisch ausgewertet. Sie bestätigen weitgehend die Literaturangaben. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse zeigt die Abb. 3-12. Die als schluffig bis tonig eingestuften Schichten erreichen dabei im Main- und Obermaintal mit etwa 10% und im Bamberger Kessel und Regnitztal mit etwa 5% einen vergleichsweise geringen Anteil am Gesamtprofil. Schotter und Sande mit erkennbarem Feinkorn in der Matrix stellen bereits mit 30 bis 40% einen bedeutenden Anteil, was sich zumindest lokal nachteilig auf die Wasserwegsamkeiten auswirken dürfte. Davon weicht lediglich die Regnitztaffüllung ab, bei der diese Kornfraktionen anteilig nur 15% erreichen. Wasserwirtschaftlich von Bedeutung sind die in allen Haupttälern vorherrschenden Sand- und Schotteranteile. Während im Obermaintal die Kiesfraktion am häufigsten vorkommt, beherrschen die sandigen Schichten das Regnitztal und weniger ausgeprägt auch den Bamberger Kessel. Das Maintal zeigt eine vergleichsweise ausgeglichene Verteilung dieser Kornfraktionen.

Hinsichtlich der Grundwasserführung sind die holozänen Talfüllungen im Bereich der Aue und die daran anschließenden pleistozänen (Unter)-, Nieder-, Vor- und 10 m-Terrassen wesentlich. Gemeinsam bilden sie das quartäre Grundwasserstockwerk und beherbergen in der Regel ein zusammenhängendes Grundwasservorkommen. Höhere Terrassen können je nach hydrogeologischer Position und Tiefenlage ihrer Schottersohlen ebenso als wichtiger funktioneller Teil dieses Stockwerks gesehen werden. Sie führen nicht selten hydraulisch eigenständige einzeln betrachtet jedoch unbedeutende Grundwasservorkommen, die über Terrassenstufen in das quartäre Grundwasserstockwerk einspeisen. Lokal kann die Basis dieser Terrassen bis in das zusammenhängende Grundwasser reichen, wie nach SCHIRMER (1978) die Basis der 15- und 30 m-Terrasse im Obermaintal. Ähnliche Verhältnisse sind am östlichen Rand des Regnitztalzuges, vor allem zwischen Bamberg und Hirschaid, vereinzelt auch weiter südlich, zu vermuten. Als lokale Besonderheit des Obermaintals sind die bereits erwähnten hangenden Grundwasservorkommen in den Terrassen, die den quartären Hauptaquifer überlagern, zu nennen; sie werden sogar mit Privatbrunnen genutzt. Den hydraulischen Nachweis erbrachten Beobachtungen an Privatbrunnen während umfangreicher Kanalbauarbeiten in Unterzettlitz und Nassauskiesungen in Trieb.

Grundwasseroberfläche und -mächtigkeiten

In der Kartenbeilage auf Blatt 2 ist die Oberfläche des zusammenhängenden Quartärgrundwasserstockwerks in den Haupttälern dargestellt. In der folgenden Beschreibung finden darüber hinaus ebenso Talbereiche außerhalb der Region Berücksichtigung (siehe Abb. 3-13 und Abb. 3-14). Als Konstruktionsgrundlage dienen die überprüften Werte der Stichtagsmessung vom September 2004, welche innerhalb von drei aufeinander folgenden Tagen gewonnen wurden.

Im Vergleich mit langjährigen Aufzeichnungen einzelner Grundwassermessstellen ist die hier konstruierte Grundwasseroberfläche mit einer durchschnittlichen Niedrigwassersituation vergleichbar, wengleich auch einzelne Messwerte davon abweichen können. Generell ist zu berücksichtigen, dass die Grundwasseroberfläche auch in ihren langjährigen Mittelwerten keinen statischen Zustand repräsentiert. Gleiches gilt für die Oberflächengewässer, deren hydraulische Beziehungen zum Grundwasser sich häufig einem saisonalen Gang anpassen. Gerade die quartären Grundwasserleiter unterliegen aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Flurabstände sowohl klein- (Baumaßnahmen, Wasserhaltungen, Baggerseen, Bewässerung und Brunnenfelder) als auch großräumig laufend Änderungen, was sich an aktuellen Beispielen nachweisen lässt. Infolge des morphologisch und geologisch vielfach komplex aufgebauten Grundwasserleiters und seines Rahmens ergeben sich lokal recht komplizierte Wechselwirkungen zwischen eigentlichem Aquifer, hydraulisch unabhängigen Terrassenkörpern sowie den Zuflüssen aus dem Festgesteinsrahmen. Aufgrund der teil-

weise geringen Datendichte können diese nicht immer befriedigend erfasst und beschrieben werden.

Maintal

Im Maintal wirken die aufgestaute Vorflut und zahlreiche Baggerseen ausgleichend auf das Fließgeschehen im Grundwasser. Das Fließgefälle liegt über weite Strecken unter 1‰ und nur im Umfeld von den Stauhaltungen Viereth/Trunstadt und Limbach und zu den Rändern hin darüber. Aufgrund dieser besonderen Gefälleverhältnisse ist für den gesamten Abschnitt kein einheitlicher Trend in der Fließrichtung erkennbar. Nur die Stauhaltungen sorgen lokal für eine deutliche Richtung und ein zunehmendes Gefälle im Grundwasserabstrom. Dabei wird das Grundwasser durch Aufstau im Oberwasser zur Umströmung des Bauwerkes (Umläufigkeit) gezwungen. Es fließt infolge der abrupten Potenzialdifferenz mit einem entsprechend höheren Gefälle dem Unterwasser in einem Bogen zu. Am Oberwasser wird dieser Effekt durch die bis etwa zur Stauwurzel reichenden influenten Fließverhältnisse verstärkt. Infolgedessen übernehmen der rechtsmainisch gelegene Altwasserarm bei Ebelsbach bzw. der Auegraben bei Oberhaid eine (Teil-)Vorflutfunktion.

Mit 4 bis 20‰ werden insbesondere am nördlichen Talrand zwischen Dörfleins und Staffelbach sowie am südlichen zwischen Gaustadt und Trunstadt höhere Fließgefälle erreicht, die allerdings nur durch sehr wenige Daten belegt sind. Für diese Gefälle sind wahrscheinlich Potenzialunterschiede zwischen dem Grundwasser im Hauptaquifer und den eigenständigen Grundwasservorkommen in höher gelegenen Terrassen verantwortlich.

Die meisten Baggerseen sind an das Grundwasser angebunden und von diesem durchströmt. Durch die Einspiegelung der Seewasserfläche kommt es im Oberstrom zu einer Absenkung und im Abstrom zu einer Anhebung der Grundwasseroberfläche. Dieser Effekt reicht allenfalls wenige hundert Meter in die Umgebung der Kiesentnahmen und bewegt sich im Zentimeter- bis zu wenigen Dezimeter-Bereich (WROBEL 1980). Mit der Alterung der Seen und zunehmender Abdichtung der Seeböden und subaquatischen Böschungen lässt die Durchströmung nach und der Effekt verliert sich.

Im Maintal konnten bei Berücksichtigung der Messtoleranzen keine größeren Differenzen zwischen Baggersee- und Grundwasseroberfläche festgestellt werden, so dass bei den älteren Seen allenfalls von einer Teilkolmation ausgegangen werden kann.

Einen zum Teil deutlichen Einfluss auf die Grundwasseroberfläche zeigen die Grundwasserentnahmen in Ebelsbach und Eltmann. Während auf der Ebelsbacher Seite die Absenkungen weniger deutlich erscheinen, zeigt sich im Bereich der Eltmanner Wasserversorgung ein großflächiger, wengleich auch schwach ausgeprägter Absenktrichter um die Förderanlagen herum (Abb. 3-13). Vermutlich hat er sich über den langfristigen Förderturnus der Brunnen hinweg entwickelt und stabilisiert, so dass er auch bei Förderruhe noch messbar ist.

Im Bereich der Rinne betragen die Grundwassermächtigkeiten 4 bis 6 m und steigen dort bisweilen auf 8 m an. In Ebelsbach und Eltmann werden sogar bis nahezu 11 m gemessen. Zum Rand hin nehmen sie deutlich ab, liegen aber meist noch über 2 m, auf den Terrassen auch gelegentlich darunter. Die Flurabstände streuen über weite Strecken in einer Spannweite von 1 bis 4 m, im Abschnitt zwischen Viereth und Staffelbach häufig auch von 3 bis 6 m.

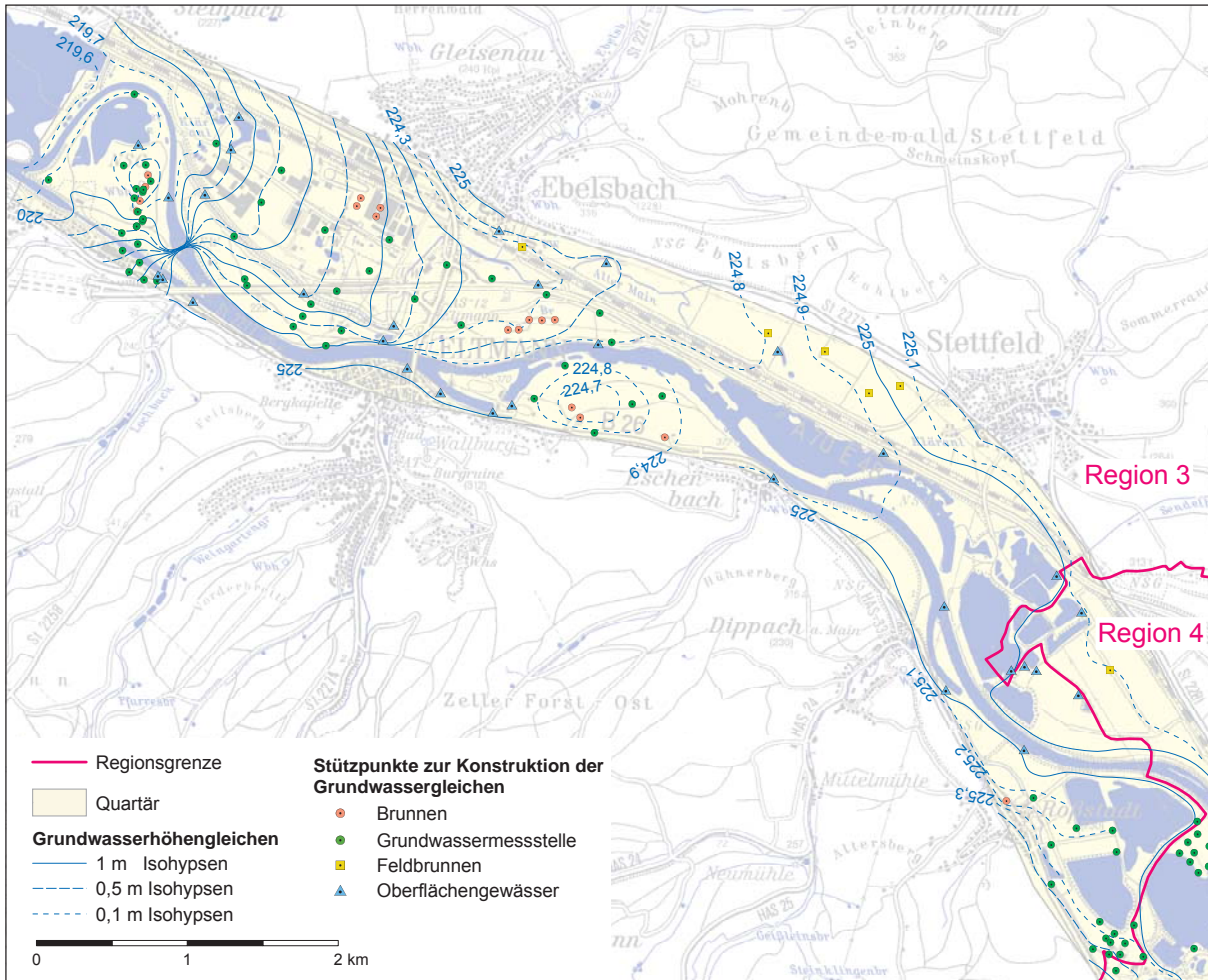


Abb. 3-13: Grundwassergleichen im Maintalquartär nach der Stichtagsmessung vom 21.09. bis 22.09.2004; Topographie aus der TK 50 des Bayerischen Landesamtes für Vermessung.

Obermaintal

Im Obermaintal zeigt sich aufgrund des teilweise in weiten Schlingen ausgreifenden, mit einem höheren Fließgefälle ausgestatteten Vorfluters Main ein verändertes Bild. Aufgrund der Randzuflüsse ist die generelle Grundwasserfließrichtung schräg bis senkrecht auf den Vorfluter gerichtet. Zahlreiche Baggerseen, Altwässer und einmündende Nebenflüsse sowie Wehranlagen modifizieren bisweilen erheblich das Fließgeschehen.

In ihrer hydraulischen Funktion wirken die Wehranlagen ähnlich den Stauhaltungen im Maintal. Sie treten zwischen Mainleus und an den Unterläufen von Itz, Baunach und Rodach auf und sorgen dort für kleinräumige typische Veränderungen im Strömungsbild.

Die genannten Nebenflüsse fungieren auch als Teilvorflut, so dass sich im Mündungsgebiet zwischen ihnen und der Hauptvorflut Grundwasserscheiden ausbilden. Weitere Gewässer, die innerhalb des Haupttals fließen und nach den hier erfolgten Wasserspiegelmessungen einen Grundwasseranschluss besitzen, sind der Weismain in Altenkunstadt, Mühl- und Biberbach in Michelau, der Mühlbach in Lichtenfels und der Lauterbach in Staffelstein. Am Oberlauf verlieren die genannten Mühlbäche allerdings durch ihre meist technische Abdichtung und die Umläufigkeiten an den

jeweiligen Stauwehren die Bindung zum Grundwasser. Für alle anderen Fließgewässer und Gräben können hinsichtlich ihrer hydraulischen Beziehung zum Grundwasser aufgrund fehlender Messungen keine Aussagen getroffen werden.

Die größeren Baggerseeflächen wirken sich, wie bereits im Maintal, ausgleichend auf die Grundwasser Oberfläche aus, was im Umfeld geringe, meist unter 1‰ liegende Fließgefälle bedingt. Für die anderen Bereiche liegen sie in der Mehrzahl zwischen 1 und 5‰ und an Wehranlagen und zum Talrand hin auch deutlich darüber. Die hohen Gefälle am Talrand entstehen vorwiegend durch die Kopplung mit hydraulisch eigenständigen Vorkommen höherer Terrassen und markieren, wie bei UDLUFT et al. (1997) numerisch nachgestellt, potenzielle Randzuflüsse. Beispiele hierfür finden sich linksmainisch zwischen Ebensfeld und Schönbrunn.

Grundwasserentnahmen zeigen vor allem SW Kösten und W Michelau erkennbare Absenkbereiche. Der Absenktrichter in Kösten dürfte vor dem Hintergrund der Förderoutine des Horizontalfilterbrunnens des Zweckverbandes Banzer Gruppe dauerhaft bestehen.

Die Grundwassermächtigkeiten liegen über weite Strecken zwischen 2 und 6 m; stellenweise wie z.B. in Staffelstein, Michelau und am Unterlauf der Itz reichen sie im Bereich der Rinne bis zu 8 m. Im Einmündungsgebiet des Lauterbaches werden auch bis zu 12 m gemessen. Die Flurabstände liegen größtenteils zwischen 1 und 5 m. Werte kleiner 1 m wurden im Umgriff von Wehranlagen und Baggerseen ermittelt. Höhere Flurabstände finden sich generell an den Talrändern und dort meist inner- und oberhalb der 10 m-Terrasse.

Regnitztal

Im Regnitztal sind die natürlichen hydraulischen Gegebenheiten im Bereich des quartären Grundwasserleiters sehr stark von Wasserbaumaßnahmen und Grundwasserentnahmen überprägt. Insbesondere der Rhein-Main-Donau-Kanal (RMD) führte zu Absenkungen und Anhebungen des Grundwassers. Mit den hydrogeologischen Konsequenzen dieser und weiterer Baumaßnahmen hat sich KLUMP (1982) detailliert auseinandergesetzt und lieferte damit einen umfassenden Überblick der Grundwasserverhältnisse im Umfeld des Kanals. Aus seinen und eigenen Untersuchungen ist festzuhalten, dass der Kanal zwischen dem Wehr Neuses und der Schleuse Hausen sowie in Bamberg die Vorflutfunktion der Regnitz für das quartäre Grundwasser übernimmt. Die Stauhaltungen von Bamberg, Buckenhofen und Hausen (Abb. 3-14) fallen dabei mit deutlich influenten Verhältnissen im Oberwasser auf. Die Grundwassersituation in Bamberg wird allerdings merklich von den intensiven Entnahmen an den Grundwassererwinnungsanlagen Gereuth und Luisenhain der Stadtwerke Bamberg beeinflusst. Etwas anders zeigen sich die Bedingungen am Neuseser Wehr, an dem trotz der hohen Potenzialdifferenz von nahezu 6 m zwischen Ober- und Unterwasser kaum eine Gefälleumkehr zu erkennen ist. Die Ursache liegt vermutlich in der oberstromigen Absenkung der etwas weiter flussabwärts großflächig betriebenen Nassauskiesungen.

Die westlichen Nebenflüsse haben alle Vorflutwirkung, infolgedessen sich im Mündungsbereich zwischen ihnen und der Regnitz bzw. dem Kanal kleinräumige Grundwasserscheiden ausbilden. Weitere Fließgewässer, die das Haupttal durchlaufen, wurden hinsichtlich ihrer hydraulischen Beziehung zum Grundwasser nicht eingehend untersucht. Aus den Abflussmessungen des BGU (2003) lässt sich zumindest für den Strullendorfer Bach und Sendelbach folgern, dass im Bereich der 15 m-Terrasse und darüber hinaus ein Grundwasseranschluss existiert; weiter in Richtung Hauptvorfluter verliert sich diese Bindung allerdings recht schnell, so dass die Gewässer teilweise in das Quartär infiltrieren. Im Unterlauf der Trubach (Wiesental) deutet sich aufgrund der hier durchgeführten Wasserspiegelmessungen und den Abflussmessungen von BAUR CONSULT (2000) eine Grundwasseranbindung an, die abschnittsweise sowohl influente als auch effluente Verhält-

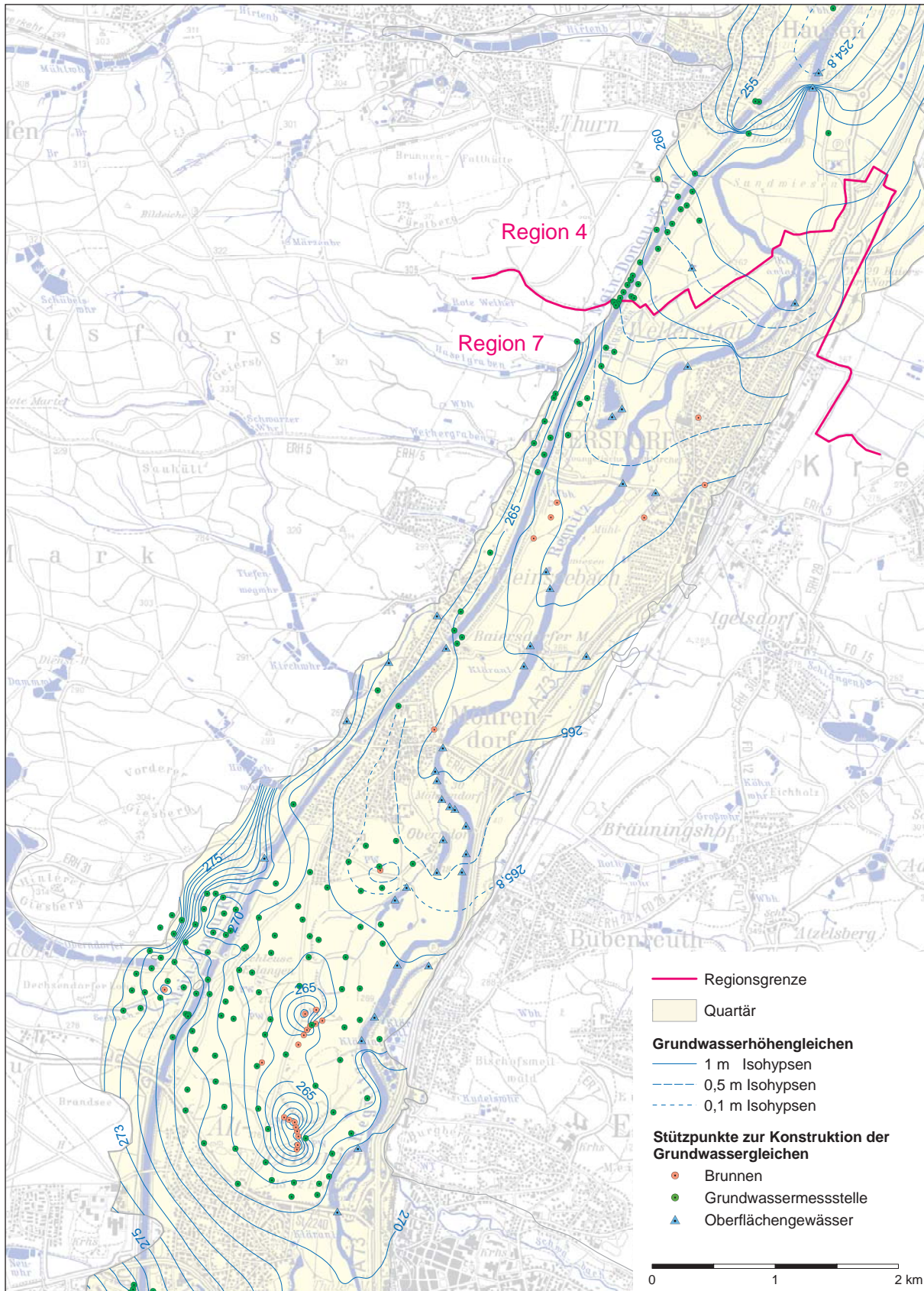


Abb. 3-14: Grundwassergleichen im Regnitztalquartär nach der Stichtagsmessung vom 21.09. bis 22.09.2004; Topographie aus der TK 50 des Bayerischen Landesamtes für Vermessung.

nisse vorweist. Die Wiesent hingegen ist im Unterlauf über weite Strecken abgedichtet, so dass keine wesentliche Grundwasseranbindung zu erwarten ist. Für das dichte Netz der die Regnitz begleitenden Gewässer zwischen Erlangen und Neuses kann aufgrund der geringen Flurabstände und der Ergebnisse der durchgeführten Wasserspiegelmessungen zumindest saisonal von einem Grundwasseranschluss ausgegangen werden.

Die zwischen der Stadtgrenze Bamberg und Hirschaid gelegenen Grundwassergewinnungsanlagen der Stadtwerke Bamberg wirken sich nicht so augenfällig auf die Grundwasseroberfläche aus. Es hat sich ein von der langfristigen und verhältnismäßig großräumigen Entnahme abhängiger Einfluss auf die Grundwassersituation eingestellt, der sich jedoch vor dem Hintergrund der allgemein hohen Ergiebigkeiten und räumlichen Anordnung der Fassungen nicht so markant auszuprägen scheint. Einige Brunnengalerien der Stadtwerke Erlangen und Möhrendorf hingegen zeigen u.a. wegen ihrer konzentrierten Anordnung teilweise deutlichere Grundwasser-Absenkungen (Abb. 3-14).

Im südöstlichen Stadtgebiet von Bamberg (Bosch-Werke) sind Aufragungen des Sandsteinkeuper nachgewiesen; dort verzahnen sich die Grundwässer aus Quartär und Sandsteinkeuper, was zu kleinräumig differenzierten Potenzialverhältnissen führt.

Kontrolliert durch den Randzufluss ist die Grundwasserfließrichtung senkrecht und bisweilen auch schräg, seltener parallel zum Vorfluter ausgerichtet. Die hydraulische Funktion der bereits unter den Abschnitten Main- und Obermaintal erläuterten höheren Terrassen kann auch im Regnitztal vor allem zwischen Bamberg und Hirschaid, N Forchheim und zwischen Alterlangen und Möhrendorf angenommen werden. Im erstgenannten Abschnitt dürften ebenso flächenhaft verbreitete Flugsanddecken als hydraulische Zwischenspeicher für das quartäre Grundwasserstockwerk fungieren. Zum Rand hin fällt generell der Beginn einer merklichen Gefälleverteilung im Grundwasserabstrom in etwa mit der Kante der 15 m-Terrasse zusammen.

Die Regulierung des Vorfluters über Wehr- und Stauanlagen wirkt sich meist sehr nachhaltig auf die Gefällesituation im Grundwasserabstrom aus. So werden insbesondere im Oberwasser der Stauhaltungen Bamberg, Buckenhofen und Hausen sowie an einigen weiteren Abschnitten entlang der Regnitz Grundwassergefälle unter 1‰ beobachtet. Ansonsten liegen sie zwischen 1 und 5‰; Werte darüber werden nur seitlich der Stauhaltungen und Wehre, im Umgriff einiger Brunnengalerien und randlich im Bereich höherer Terrassen erreicht.

Die Grundwassermächtigkeiten liegen auf der Talstrecke Bamberg–Buttenheim häufig zwischen 4 und 8 m und steigen innerhalb der Rinnen bis auf 10 m, in Einzelfällen (zwischen Hirschaid und Strullendorf) auch darüber. Ab Buttenheim flussaufwärts gewinnt entlang der Rinne der Bereich mit Mächtigkeiten 10 m und größer deutlich an Breite. Mit bis nahezu 20 m werden um Alterlangen herum die größten Mächtigkeiten angetroffen. Innerhalb der höher gelegenen Terrassen und bei Aufragungen des Untergrundes (z.B. im südöstlichen Stadtgebiet von Bamberg) gehen die Grundwassermächtigkeiten im Allgemeinen deutlich zurück und liegen zum Teil sogar unter 2 m.

Die Flurabstände reichen in der Regel von 2 bis 5 m und steigen insbesondere zwischen Strullendorf und Forchheim im Ausstrich der 10 m-Terrasse auf durchschnittlich 7 m an. Innerhalb der 15 m-Terrasse gehen sie sogar bis auf 10 m und mehr. Auffällig sind die Bereiche mit Flurabständen unter 1 m zwischen Erlangen und Hausen, was u.a. auf die regulierende Wirkung der an zahlreichen Wehranlagen aufgestauten Regnitz zurückgeführt werden kann. Ähnliche Effekte zeigen sich auch an sämtlichen anderen Stauhaltungen im Bereich des Oberwassers.

Bamberger Kessel

Im Bamberger Kessel ist die Grundwasserfließrichtung nahezu senkrecht auf die Vorfluter Main und Regnitz gerichtet. Zwischen der Autobahn A 70 und Hallstadt ist eine mehr oder weniger augenfällige Grundwasserscheide ausgebildet, die sich nach E verliert. Sie markiert in etwa die Grenze der unterirdischen Einzugsgebiete beider Vorfluter.

Die bereits unter dem Abschnitt Quartärbasis beschriebenen Rinnen haben einen gewissen Vorfluteffekt für das quartäre Grundwasser, wenngleich im Bereich der südlichen Rinne die Beeinflussung durch intensive industrielle Grundwasserab- und -einleitungen dominiert. Zwischen 10 m- und 15 m-Terrasse versteilt sich das Grundwassergefälle, was wahrscheinlich mit einer präquartären Geländestufe zusammenhängt. Im Modell zur Quartärbasis kann diese Stufe weitestgehend nachvollzogen werden (Abb. 3-11). Anschließend verflacht sich die Grundwasseroberfläche wieder und deutet damit auf einen zumindest teilweise hydraulisch eigenständigen Grundwasserkörper hin. Innerhalb der 15 m-Terrasse, zwischen der Autobahnausfahrt Bamberg Nord und den US-Kasernen, wiederholt sich dieser Effekt entlang einer weiteren präquartären Geländestufe (Beilage 1). Grundwasserentnahmen und bis in das Grundwasser reichende Bauwerke führen hier in Form von Absenkungen und Aufstauungen allerdings zu merklichen Veränderungen im Fließgeschehen. Damit existieren neben dem quartären Hauptgrundwasser insgesamt zwei hydraulisch eigenständige Grundwasserkörper in der 10 m- und 15 m-Terrasse.

Die aus östlicher Richtung zufließenden Gerinne Stöckigtbach und Gründleinsbach zeigen nach den Wasserspiegelmessungen keinen direkten Anschluss an das Grundwasser, dürften aber in gewissen Maßen Wasser an das Quartär abgeben, wohingegen der Seebach und seine zum Teil kanalisierten Zuflüsse im Übergangsbereich zwischen 10 m- und 15 m-Terrasse offensichtlich Grundwasser abführen. Der Leitenbach hat im Unterlauf ebenso Grundwasseranschluss, wobei sowohl in- als auch effluente Verhältnisse herrschen. Die Wasserspiegelmessungen während der Stichtagsmessung bestätigen dies für den Bereich der 15 m-Terrasse. Unterhalb der Terrasse bis zur Einmündung in den Main dürften jedoch die influenten Verhältnisse überwiegen.

Über weite Bereiche werden Grundwassergefälle von 1 bis 5‰ beobachtet; höhere Werte werden vor allem entlang der Terrassenübergänge berechnet. Gefälle unter 1‰ treten nur am Zusammenfluss von Main und Regnitz und im Zuge der speziellen, oben beschriebenen Verhältnisse auch innerhalb der Terrassen auf.

Die Grundwassermächtigkeiten liegen zumeist zwischen 3 und 6 m, erreichen aber im Umfeld der Rinnen auch Werte bis über 10 m. Mächtigkeiten unter 2 m treten nur am östlichen Talrand und bei Auftragungen des Festgesteins auf.

Hydraulische Kennwerte

Zur Ermittlung der Durchlässig- und Ergiebigkeiten wurden Daten aus 233 Pumpversuchen nach den in Kapitel 3.1 beschriebenen Methoden ausgewertet. Zusätzliche Berücksichtigung bei der folgenden Interpretation fanden auch nach verschiedenen Verfahrenen berechnete k_f -Werte (152 Pumpversuche) aus diversen Gutachten.

Nach einer Gesamtauswertung aller Pumpversuche ergibt sich für die Haupttäler ein mittlerer k_f -Wert von etwa $9,5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Davon streuen 80% der Werte zwischen $7,8 \cdot 10^{-5}$ und $2,2 \cdot 10^{-3}$ m/s, was auf wechselnde Anteile der Feinkornfraktionen zurückgeführt werden kann. Abb. 3-15 zeigt die Verteilung der Häufigkeiten; die meisten Werte streuen zwischen $4 \cdot 10^{-4}$ und $2,5 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Die mittleren k_f -Werte aus den Gutachten liegen mit etwa $1,4 \cdot 10^{-3}$ m/s geringfügig über den hier ermittelten Werten. Dieser Trend zeigt sich auch für die 80%-Spanne dieser Werte, die mit $1,6 \cdot 10^{-4}$ bis $3 \cdot 10^{-3}$ m/s geringfügig höhere Durchlässigkeiten aufweist.

Für die mittlere spezifische Ergiebigkeit berechnet sich ein Wert von etwa 5 l/(s·m); Etwa 80% der Werte liegen zwischen 0,3 und 11 l/(s·m) und zeigen ebenso wie bei den k_f -Werten eine breite Streuung. Bei Differenzierung der Haupttalabschnitte ergibt sich bei den durchschnittlichen Ergiebigkeiten absteigend folgende Rangfolge in [l/(s·m)]: Regnitz (5,6), Maintal (4,7), Obermaintal (4,2), Bamberger Kessel (2,8).

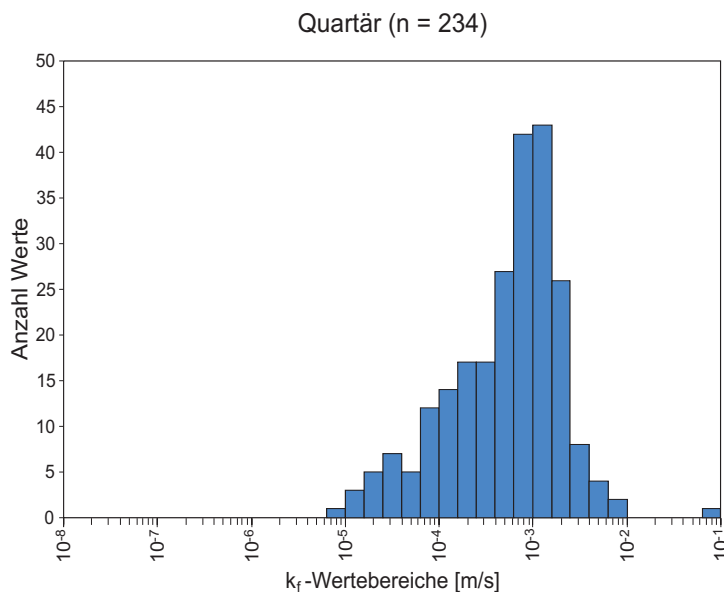


Abb. 3-15: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im Quartär der Haupttäler.

Regional lässt sich zunächst festhalten, dass im Bereich der Nieder- oder 10 m-Terrasse und/oder der Rinnen die höheren Durchlässigkeiten festgestellt werden. Dies gilt generell für alle Haupttalabschnitte. Da sich die Daten jedoch sehr ungleichmäßig über die Talräume verteilen, sind die nachfolgenden Regionalisierungen nur als Trend zu verstehen. Eine etwas höhere Datendichte liegt nur für den nördlichen Abschnitt des Regnitztales vor. Die k_f -Werte aus den eigenen Berechnungen zeigen mit absteigenden Mittelwerten in [m/s] nachstehende Rangfolge: Regnitztal ($1,8 \cdot 10^{-3}$), Obermaintal ($1,1 \cdot 10^{-3}$), Maintal ($9,5 \cdot 10^{-4}$) und Bamberger Kessel ($7,2 \cdot 10^{-4}$). Im Vergleich zur Verteilung der Korngruppen im Grundwasser erfüllten Bereich in Abb. 3-12 zeigt sich hierbei in erster Linie eine Abhängigkeit von den Feinkornanteilen. So werden im Regnitztal nicht nur am Gesamtprofil geringere Feinkornanteile als in den anderen Haupttälern festgestellt, sondern die einzelnen Schichten mit erkennbarem oder dominierendem Feinkorn sind auch durchschnittlich geringmächtiger. Zu weiteren Unterschieden zwischen den Talabschnitten führen die Anteile der Schotter- und Sandfraktionen.

Aus den k_f -Wertuntersuchungen der Gutachten ergibt sich eine deutlich andere Rangfolge. Hier lassen sich für Main- und Obermaintal im Durchschnitt $2,2 \cdot 10^{-3}$ m/s und für das Regnitztal und den Bamberger Kessel etwa $1,1 \cdot 10^{-3}$ m/s angeben. Während die Werte der beiden letztgenannten Gebiete eine gewisse räumliche Verteilung aufweisen und somit eher einem Vergleich dienen, konzentrieren sich die des Main- und Obermaintales auf wenige Lokaltäten und sind damit weniger aussagekräftig.

Generell sind bei der Regionalisierung und Verallgemeinerung von k_f -Werten im Quartär Areale mit mächtigeren Feinkornablagerungen zu berücksichtigen, da dort die Durchlässigkeiten sehr stark zurückgehen können. Dies gilt insbesondere für den Bereich verlandeter Flussschlingen.

3.2.8.2 Nebentäler

Die einzelnen Nebentäler werden aufgrund des geologischen Aufbaus ihrer Einzugsgebiete in die Bereiche nach Abb. 3-10 zusammengefasst. Insgesamt zeigen sie mit wenigen Ausnahmen eine deutlich geringere seitliche Ausdehnung als die angeschlossenen Haupttäler. Die Breite der quartären Talfüllungen liegt meist unter 1 km. Entlang von Aisch, Rauher und Reicher Ebrach, Wiesent und Rodach-Haßlach werden stellenweise auch Breiten bis zu 1,8 km erreicht. Generell fallen die Talsohlen steiler ein als bei den Haupttälern. Die Fließgewässer fungieren über weite Strecken als Vorflut für den quartären Wasserkörper. Die gesamte Talfüllung dient zudem als potenzielle hydraulische Entlastungszone für die umliegenden Festgesteinsaquifere. Bei mächtigerer Lehmüberdeckung können im Auenbereich und zum Teil unter entsprechendem Randzufluss aus dem Festgesteinsrahmen auch am Talrand leicht gespannte Grundwasserdruckverhältnisse auftreten.

Hydrogeologischer Bau und Grundwasserführung

Der vertikale Aufbau der quartären Talfüllungen in den Nebentälern folgt in etwa dem Schema der Haupttäler. Die geringe Breite und Einzugsgebietsgröße der Täler modifiziert vielerorts das Bild, da sich der unmittelbar umgebende Festgesteinsrahmen stärker als Materiallieferant beteiligt. Demzufolge erreichen auch die Schwemm- und Schuttfächer eine wesentlich größere Breitenwirkung. Insgesamt zeigen die Talfüllungen einen deutlichen Einfluss der jeweiligen geologischen Liefergebiete. Bei Talräumen, deren Einzugsgebiete vorwiegend im Keuper liegen, erreichen die bindigen Schichten einen Anteil von über 30% am Gesamtprofil (Abb. 3-12) zu Lasten der Sande und Schotter ohne nennenswerte Feinkornanteile. Dies gilt vornehmlich für die holozänen Auffüllungen, weniger für die Terrassen. Demgegenüber stehen z.B. Wiesent und Leitenbachtal mit jurassischem sowie Rodachtal mit paläozoischem Einzugsgebiet. Dort tritt das Feinkorn wieder mehr in den Hintergrund, so dass anteilig etwa vergleichbare Verhältnisse wie im Main- und Obermaintal herrschen. Auffällig sind dabei auch die jeweils hohen Schottergehalte bei gleichzeitig geringen Sandanteilen. Im Wiesenttal wird im Vergleich zu den anderen untersuchten Haupt- und Nebentalabschnitten mit etwa 50% der höchste Schotteranteil am Gesamtprofil verzeichnet, was sich in Verbindung mit den geringeren Feinkornanteilen positiv auf die hydraulischen Leitfähigkeiten auswirkt.

Die Grundwasserführung beschränkt sich vorwiegend auf die Talaue und sofern vorhanden auf die anschließende 10 m- bzw. Nieder- oder Hauptterrasse. Wasserwirtschaftlich spielen diese Vorkommen meist keine nennenswerte Rolle. Sie werden hauptsächlich privat, häufig zur Garten-, Feld- und Grünlandbewässerung genutzt. Hiervon ausgenommen sind allerdings die Grundwasservorkommen in den Schotterkörpern des Wiesenttals, die mitunter eine lokal wasserwirtschaftliche Bedeutung erreichen.

Quartärbasis und -mächtigkeiten

Für die Unterläufe der Wiesent (Kirchehrenbach bis Mündung), des Leitenbaches (Memmelsdorf bis Bamberger Kessel) und der Rodach (Kronach bis Mündung) wurde die Quartärbasis analog zu den Haupttälern konstruiert (Beilage 1).

Im Wiesenttal setzt sich die bereits im Regnitztalzug einsetzende Rinne fort, wobei sich ihre markante Eintiefung nach E zunehmend verliert. An ihre Stelle tritt dann eine mehr oder weniger gleichmäßig ausgeräumte Wanne. Die geophysikalischen Untersuchungen von PLAIL (1985) brachten ein ähnliches Ergebnis.

Im Leitenbachtal deuten sich von W ausgehend zunehmend weniger ausgeprägte Rinnen nach E an, die in etwa den heutigen Gewässern Leitenbach und Gründleinsbach folgen. Beide vereinen sich auf der Höhe von Memmelsdorf. Lokal sind präquartäre Geländestufen ausgebildet.

Entlang der Rodach liefert der präquartäre Untergrund ein wesentlich lebhafteres Relief. Dies gilt insbesondere für den Abschnitt zwischen Redwitz und Kronach. Tektonisch bedingt folgt dort unterhalb des Quartär ein rascher kleinräumiger Wechsel von kompetenten und inkompetenten Gesteinsschichten des Feuerletten, Burgsandstein, Lias und Buntsandstein, der vermutlich dieses Relief verursacht. Die meist stärker eingetieft Hauptrinne verzweigt sich stellenweise. Zum Rand hin deuten sich entlang präquartärer Geländestufen gelegentlich auch abgesetzte Terrassen an.

Die nachfolgenden Quartärmächtigkeiten der einzelnen Nebentäler wurden aus den verfügbaren Bohrdaten ermittelt (Tab. 3-2). Für die Täler mit jurassischem Einzugsgebiet ergaben sich demnach mittlere Mächtigkeiten von 7 m; 80% der Werte liegen zwischen 2,2 und 11,5 m. Im Leitenbachtal treten auch Werte bis 12 m, im Mündungsbereich des Ziegenbachtals bis 15 m und im Wiesenttal bis 18 m auf. Die Täler der westlichen Regnitztributäre weisen mittlere Mächtigkeiten von 8,6 m auf; 80% liegen dabei in einer Spannweite von 2,7 bis 14 m. Mächtigkeiten über 14 m wurden nur im Tal der Aisch und Rauhen Ebrach angetroffen. Im Aischtal bei Mailach wurde innerhalb der Hauptterrasse eine maximale quartäre Mächtigkeit inklusive Lößpolster von 22 m gemessen. Für die Täler der Itz, Baunach und Steinach berechneten sich Quartärmächtigkeiten von durchschnittlich 5,3 m. Die häufigsten Werte (80%) finden sich in einer Spannweite von etwa 3 bis 8 m. Innerhalb von Rinnenfüllungen werden Mächtigkeiten bis zu 12 m angetroffen, in seltenen Fällen auch darüber. Im Rodachtal und zugehörigen Nebentälern liegt die durchschnittliche Mächtigkeit bei 4,9 m; 80% der Werte streuen etwa zwischen 3 und 8 m. Davon abweichende mächtigere Quartärfüllungen treten stellenweise im Unterlauf zwischen Kronach und Redwitz auf. Sie erreichen dann Werte bis 10 m, in Einzelfällen auch bis 15 m.

Grundwasseroberfläche und -mächtigkeiten

Für die Nebentäler wurde keine Grundwasseroberfläche modelliert. Über weite Strecken bilden die Fließgewässer die Vorflut für das quartäre Grundwasser. In Einzelfällen, z.B. im Umfeld von Wehranlagen, herrschen zwischen beiden auch influente Fließverhältnisse. Aufgrund der durchschnittlich höheren Vorflutergefälle gegenüber den Haupttälern dürften sich tendenziell höhere Fließgefälle im Grundwasser ausbilden. Allerdings verflachen sich die Gefälle vielerorts durch den regulierenden Eingriff zahlreicher Stauwehre. Die flächenmäßig weit verbreiteten Feuchtwiesen und das stellenweise dichte Netz von Flutgräben in den Auebereichen – vor allem in den Keupertälern – deuten auf einen geringen Flurabstand des Grundwassers hin.

Die anhand der verfügbaren Bohrungen ermittelten Flurabstände und Grundwassermächtigkeiten sind in Tab. 3-2 dargestellt. Die Flurabstände zeigen im Mittel für alle Nebentäler ähnliche Verhältnisse. Sie liegen zwischen 1,9 und 2,5 m. Geringere Flurabstände sind im Bereich der Aue zu erwarten und meist durch Vernässungen oder typische Pflanzenvergesellschaftungen gekennzeichnet. Mit bis zu 12 m werden innerhalb der Terrassen stellenweise auch sehr hohe Flurabstände gemessen.

Bei den Grundwassermächtigkeiten zeigen sich deutlichere Unterschiede zwischen den Tälern. Sie orientieren sich konsequent an den durchschnittlichen Quartärmächtigkeiten. Demzufolge werden in den Tälern der westlichen Regnitztributäre mit 7,3 m die höchsten mittleren Mächtigkeiten erreicht, während sie bereits im Wiesent- und Leitenbachtal auf durchschnittlich 5,3 m zurückgehen. In den dem Obermain zugehörigen Nebentälern liegen sie dann im Mittel nur noch zwischen 2,6 und 3,3 m. An den Talrändern gehen die Grundwassermächtigkeiten generell bis auf zum Teil deutlich unter 1 m zurück. Zur Talmitte, im Auebereich, kommen derartig geringe Grundwassermächtigkeiten nur in Begleitung von Festgesteinsauftragungen, meist im Oberlauf der Täler, vor. Entlang von Rinnenfüllungen erreichen die Mächtigkeiten nicht selten über 8 m; innerhalb von Terrassen können sie sogar deutlich darüber liegen und bis auf 17 m ansteigen. Solche Verhältnisse sind vor allem im Talzug der Rauhen Ebrach und Aisch nachgewiesen sowie ferner in den Tälern der Rodach um Kronach, der Itz im Unterlauf, der Wiesent im Unterlauf sowie zwischen Pretzfeld und Ebermannstadt, der Reichen Ebrach um Schlüsselfeld und Sambach und des Leitenbaches um Memmelsdorf.

Tab. 3-2: Quartärmächtigkeiten, Flurabstände und Grundwassermächtigkeiten in den Nebentälern ermittelt aus Bohrdaten

Quartärmächtigkeiten [m]						
Talräume	Min	10%	Mittelwert	90%	Max	n
Aurach bis Aisch	0,2	2,7	8,6	14,0	22,0	148
Leitenbach bis Wiesent	0,2	2,2	7,0	11,5	18,4	224
Baunach bis Itz	0,1	3,0	5,3	7,7	15,6	435
Rodach	0,8	2,9	4,9	7,3	15,0	278
Flurabstände [m]						
Talräume	Min	10%	Mittelwert	90%	Max	n
Aurach bis Aisch	0,0	0,5	2,5	6,0	11,8	135
Leitenbach bis Wiesent	0,2	0,5	2,5	4,5	8,0	200
Baunach bis Itz	0,0	0,5	1,9	3,9	9,7	426
Rodach	0,1	0,9	2,3	3,9	9,7	273
Grundwassermächtigkeiten [m]						
Talräume	Min	10%	Mittelwert	90%	Max	n
Aurach bis Aisch	0,0	2,1	7,3	12,2	16,9	135
Leitenbach bis Wiesent	0,0	1,7	5,3	9,1	14,6	200
Baunach bis Itz	0,0	1,0	3,3	6,1	10,8	426
Rodach	0,0	1,1	2,6	4,6	12,9	273

Hydraulische Kennwerte

Daten zur Berechnung hydraulischer Kennwerte liegen nur für das Untere Wiesenttal und im Itztal um Coburg in akzeptabler Dichte vor. Ansonsten existieren nur sehr weit verstreute Einzelbeobachtungen, die lediglich räumlich eng begrenzte Aussagen zur Hydraulik zulassen.

Aus den Pumpversuchsdaten ergaben sich für das Wiesenttal 6 k_f -Werte, die bei einem Mittelwert von $4,2 \cdot 10^{-3}$ m/s zwischen $7 \cdot 10^{-4}$ und $8,8 \cdot 10^{-3}$ m/s liegen. Eine breitere Streuung zeigen 31 Gutachtenwerte, die bei einem Mittelwert von $2,3 \cdot 10^{-3}$ m/s zwischen $2,5 \cdot 10^{-4}$ und $1,4 \cdot 10^{-2}$ m/s variieren. Im Vergleich zu allen anderen Haupt- und Nebentälern sind die angetroffenen Durchlässigkeiten als überdurchschnittlich zu sehen. Sie lassen sich sehr gut mit den hohen Schotter- und geringen Feinkornanteilen korrelieren (Abb. 3-12). Demzufolge werden dort mit 5–51 l/(s·m) auch überdurchschnittlich hohe Brunnenergiebigkeiten angetroffen.

Im Itztal um Coburg wurde aus 17 Pumpversuchen ein deutlich geringerer mittlerer k_f -Wert von $5,4 \cdot 10^{-4}$ m/s ermittelt, was auf den erhöhten Feinkornanteil in der Talfüllung zurückzuführen ist. Die berechneten Werte streuen relativ breit zwischen $3 \cdot 10^{-5}$ und $1,7 \cdot 10^{-3}$ m/s. Die spezifischen Ergiebigkeiten erreichen dabei Werte zwischen 0,2 und 5,8 l/(s·m) bei einem Mittelwert von 1,6 l/(s·m).

Für die westlichen Nebentäler der Regnitz wurde aus 11 Pumpversuchen ein mittlerer k_f -Wert von $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/s mit einer Spannweite von $2 \cdot 10^{-5}$ bis $3,7 \cdot 10^{-4}$ m/s berechnet. Dementsprechend gering sind auch die spezifischen Ergiebigkeiten mit einem Mittelwert von 1,1 l/(s·m) innerhalb der Spannweite von 0,2 und 3 l/(s·m). In den Rinnenfüllungen entlang der Aisch und Rauhen Ebrach dürften auch höhere Werte zu erwarten sein. Insgesamt korrelieren die ermittelten Durchlässig- und Ergiebigkeiten aber mit den hohen Feinkornanteilen im Grundwasser erfüllten Quartärprofil dieser Nebentäler (Abb. 3-12).

3.3 3D-Modellierung

Die im Rahmen der Hydrogeologischen Landesaufnahme für die Planungsregion 4 erhobenen Daten sind so umfangreich und verschiedenartig (Bohrungen, Kartierungen, Profilschnitte usw.), dass deren räumliche Zusammenschau mittels einer leistungsstarken 3D-Visualisierung sinnvoll erschien. Grundsätzlich stellen Raummodelle einen Versuch dar, anhand der verfügbaren Daten den Untergrund geologisch plausibel darzustellen; die Datenlage lässt hierbei jedoch in der Regel einen großen Interpretationsspielraum zu.

Das Modell der Planungsregion 4 ist ein geologisches Grenzflächenmodell, das heißt, es wurde eine Reihe von Flächen mit Hilfe irregulärer Dreiecksvermaschungen definiert, welche an ihren Vermaschungspunkten Eigenschaften (z.B. Schichtmächtigkeiten) annehmen können. Bei den erstellten Flächen handelt es sich in erster Linie um Schichtbasis- bzw. Schichtober- und um Störungsflächen, die sich gegenseitig begrenzen und selbst wiederum durch die Geländeoberfläche und die Modellgrenzen beschnitten werden. Modelliert wurden die hydrogeologisch relevanten Schichtgrenzen des Schichtstufenlandes, welche aufgrund ihrer subparallelen und konkordanten Lagerungen sowohl als Schichtbasis- als auch Schichtoberfläche interpretiert werden können (mit Ausnahme der diskordanten Basisfläche Quartär): Buntsandstein, Muschelkalk, Unterer Keuper, Estherien- und Myophorienschichten, Schilfsandstein, Lehrbergschichten, Sandsteinkeuper, Feuerletten, Rhaetolias, Lias Beta – Lias Zeta, Lias Zeta – Dogger Beta, Dogger Beta – Dogger Zeta, Malm, Quartär.

Methodik der Modellierung

Die 3D-Modellierung erfordert derzeit noch einen sehr hohen Zeitaufwand. Die komplexen Beziehungen geologischer Objekte untereinander sowie die zugrundeliegende heterogene Datendichte können noch nicht ausreichend (halb)automatisch bei der computergestützten Modellierung berücksichtigt werden.

Grundlage der hier durchgeführten 3D-Modellierung ist das geologische Konstruktionssystem GOCAD der Firma EarthDecision, Nancy/Frankreich. Mittels einer Auswahl an Bedingungen (Mächtigkeiten, Schichteinfallen, Stützpunkte u.a.) werden durch das iterative Descrete-Smooth-Iteration-Verfahren DSI (MALLETT 2002) Flächen errechnet, welche möglichst allen gesetzten Bedingungen genügen und dabei minimal gekrümmt sind. Für das Implementieren tektonischer Strukturen wie Flexuren und Störungen ist jedoch ein zusätzlicher stark manueller Aufwand erforderlich. In erster Linie ist das System für das Modellieren von Tiefenstrukturen ausgelegt. Die topologisch hochgenauen GIS-Daten z.B. des Bayerischen Landesamts für Umwelt insbesondere der Ausbiss-Situation können nur mit Genauigkeitsverlusten übernommen werden. Hier zeigt sich eine große Schwäche der momentanen 3D-Modellierumgebungen, die noch nicht in der Lage sind, die Netztopologie flexibel genug zu erstellen, um der wechselnden Datendichte sowie der kartierten und am Höhenmodell ausgerichteten Grenzlinien ausreichend Rechnung zu tragen. In der Regel liegen aber allen Oberflächendaten (Karten) bereits unterschiedliche Höhenmodelle zugrunde und somit muss von vornherein ein genereller nicht behebbarer horizontaler wie vertikaler Lagefehler hingenommen werden. Das resultierende 3D-Modell kann also prinzipiell nicht mit den 2D-GIS-Daten im oberflächennahen Bereich (Abweichungen vertikal etwa 10–20 m u. GOK und entsprechend der Netzvermaschungsdichte etwa 100–200 m horizontal) in vollem Einklang stehen.

Regionales 3D-Modell

Der Umriss des regionalen 3D-Modells ergibt sich aus den bearbeiteten TK50-Blattschnitten. Die Oberflächen wurden mit einem die Planungsregion umfassenden Umgriff modelliert und anschließend an den TK50-Außengrenzen beschnitten. Dadurch sind die Oberflächen bestmöglich an ihre jeweilige Datengrundlage angeglichen.

Für das 3D-Modell der Planungsregion wurden neben den Schichtmarkern aus Bohrungen noch eine Vielzahl speziell nach dem Verfahren von Kus et al. (2006) erstellter, 3D-georeferenzierter Profilschnitte verwendet. Da in der Region davon ausgegangen werden kann, dass sämtliche zu modellierenden Einheiten konkordant und subparallel nach E bis SE einfallend lagern, mussten auch keine Schichtlücken in Bohrungen anhand der stratigraphischen Abfolge identifiziert und ein hypothetisches Verbreitungsgebiet für die einzelnen Einheiten errechnet werden. Die Basisfläche des Malm wurde aus APEL & BÜTTNER (1995) übernommen.

Anhand der im Rahmen der hydrogeologischen Landesaufnahme erstellten bzw. überarbeiteten tektonischen und geologischen Karten wurde ein stark zusammengefasstes und vereinfachtes Störungssystem in Form von auf die Topographie projizierten Linienelementen definiert. Die Störungslinien wurden zu weiter durchhaltenden Linienzügen zusammengefasst (Abb. 3-16) und zumeist pauschal als Abschiebungen mit einem Einfallen von 80° angesetzt.

Sukzessive wurden die festgelegten Oberflächen als erweiterte und an die Datenlage angepasste Kopie der Schichtbasisfläche Malm erstellt. Durch das generelle Schichteinfallen nach SE und dem damit verbundenen Ausstreichen der älteren Schichteinheiten nach NW hin konnten die Ausbisslinien der Schichtgrenzen als zusätzliche Strukturdaten berücksichtigt werden. Diese sind jedoch stark durch die Verwendung unterschiedlicher Höhenmodelle bei Kartierung und Modellierung verzerrt. Um die daraus entstehenden vertikalen Schwankungen zu verringern, wurde zum einen ein zur Reduktion des Datenumfanges geglättetes Höhenmodell mit einer Rasterweite von 200 m eingesetzt als auch der Verlauf der Ausbisslinien bei der Erstellung der Schichtgrenzen nur bis zu einer maximalen vertikalen Abweichung von 10 m als Randbedingung zur Netzgenerierung verwendet.

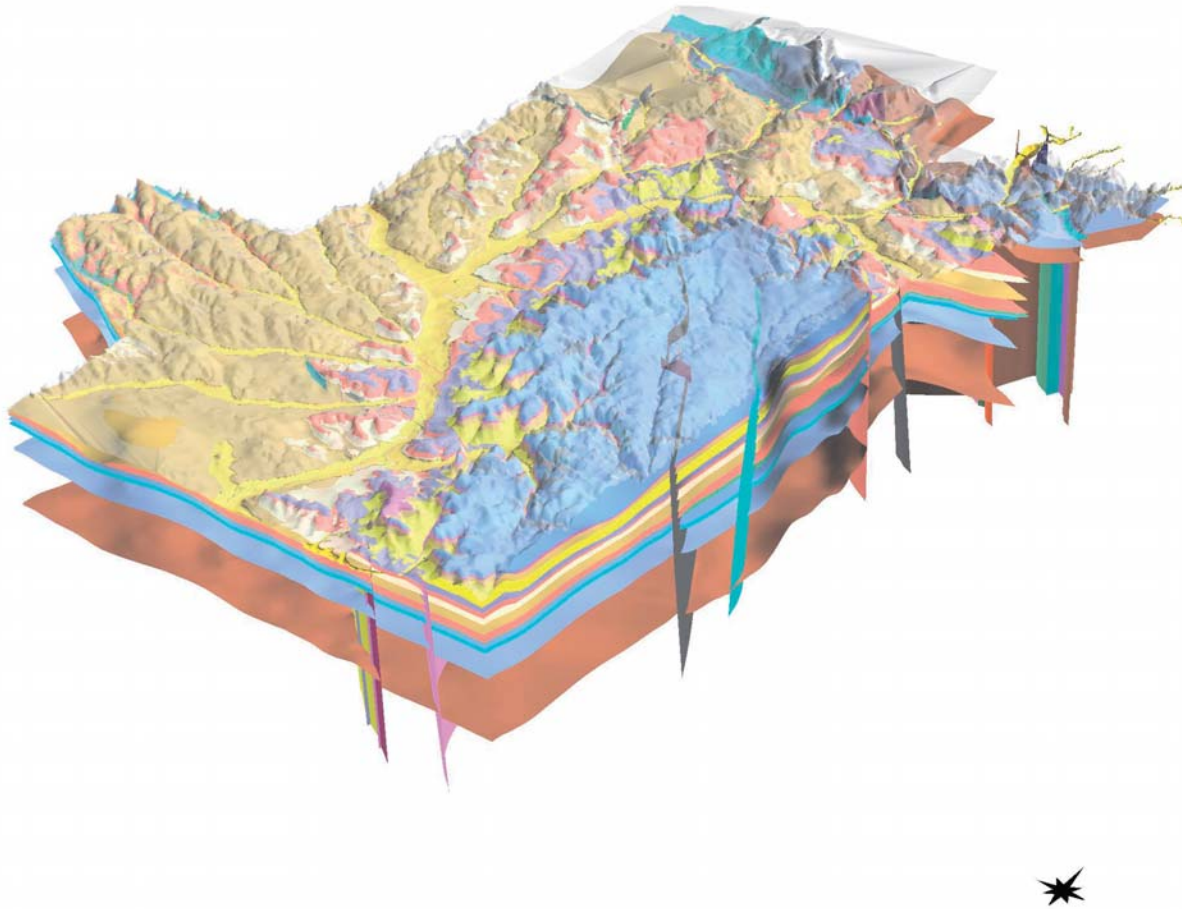


Abb. 3-16: Strukturgeologisches 3D-Modell der Region 4 mit allen modellierten Schichtoberflächen, Geländeoberfläche und Störungen.

So weisen im 3D-Modell die Ausbisslinien einen wesentlich geradlinigeren horizontalen wie vertikalen Verlauf auf. Das Verschneiden der einzelnen Oberflächen mit der Geländeoberfläche liefert dann im Ausbissbereich der Grenzlinien ein von den geologischen Karten geringfügig abweichendes Bild.

Ergebnis und Grenzen der Modellierung

Die komplette Zusammenschau und Darstellung aller Ausgangsdaten zusammen mit allen daraus abgeleiteten Daten (Schichtoberflächen inkl. Mächtigkeiten, Störungsnetzwerk) in einer virtuellen 3D-Umgebung kann als herausragender Vorteil einer Modellerstellung aufgefasst werden, da fehlerhafte Eingangsdaten und Bereiche mit zu geringer Datendichte schnell identifiziert werden können.

Hauptschwierigkeit der Modellierung stellt die nicht eindeutig durch die Datengrundlage abschätzbare tektonische Situation dar. Daher ist auch das hier vorgestellte Störungssystem lediglich als Diskussionsgrundlage zu verstehen und keinesfalls als hinreichend gesichert anzusehen. Die Störungen wurden ausschließlich als Abschiebungen mit entsprechendem standardisiertem Einfallen definiert. Dies schließt aber kompressive Strukturen nicht aus.

Das konstruktiv erstellte geologische 3D-Schichtgrenzenmodell (Abb. 3-16) muss in erster Linie als Diskussionsvorschlag zur Untergrundstruktur im Bereich der Planungsregion 4 verstanden werden. Es wurde versucht, anhand einer relativ spärlichen Datengrundlage ein mechanisch möglichst einfaches und plausibles Grundgerüst zum Schichtaufbau zu erstellen, was für die Festgesteinseinheiten einen Eindruck der tektonischen Großstrukturen liefert.

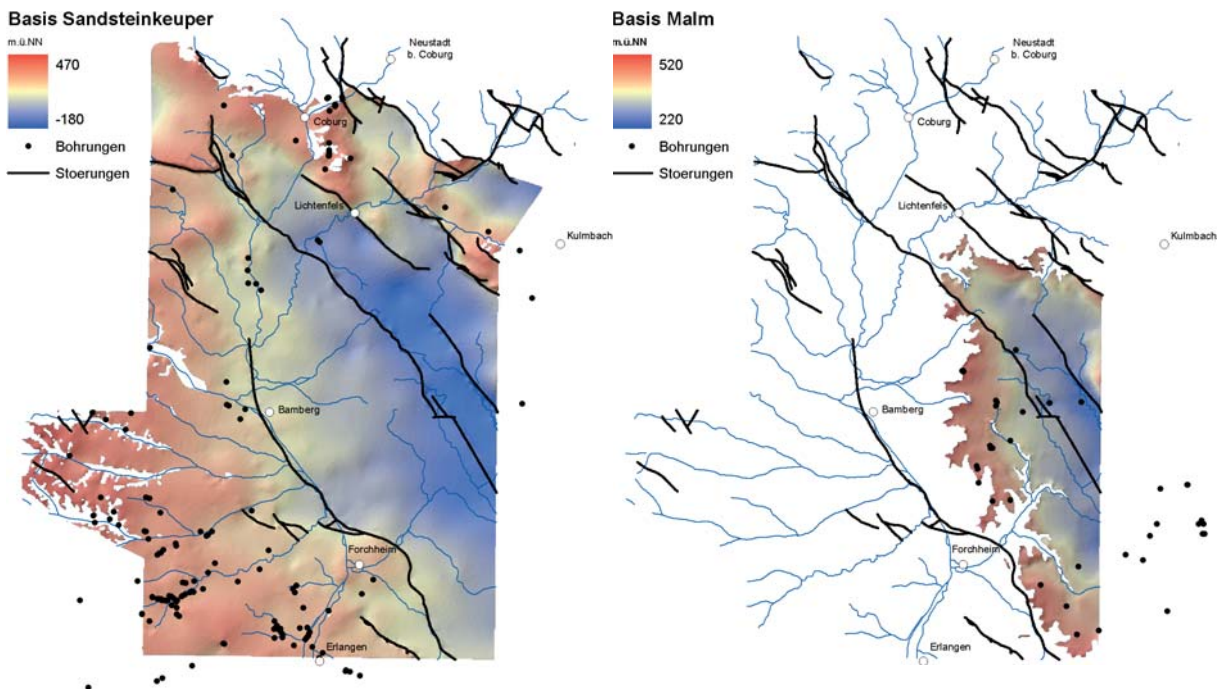


Abb. 3-17: Verbreitung und Lage der Schichtbasisfläche Sandsteinkeuper (links) und Malm (rechts) in der Planungsregion 4 sowie verwendetes Störungsnetzwerk.

Zur weiteren Verarbeitung liegen außer den Systemdaten klassische Vektor-Isolinienpläne der Höhenlage der Schichtgrenzen, der Schichtmächtigkeiten sowie deren Verbreitungsflächen als Polygone vor. Diese Daten können innerhalb des Bodeninformationssystems (BIS) des BayLfU gespeichert werden. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 3-17 erste Ergebnisse zu den Schichtbasisflächen Malm und Sandsteinkeuper dargestellt. Diese und andere errechneten Schichtgrenzen wurden zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung herangezogen und können unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen und Vereinfachungen auch für darüber hinaus gehende numerische Simulationen (z.B. Grundwasser-Simulationsmodelle) verwendet werden.

4 Grundwasserbeschaffenheit

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Grundwassers werden durch Klima- und andere Umweltfaktoren, Veränderungen bei der Passage durch die ungesättigte Zone, die mineralogische Zusammensetzung des Kontaktgesteins, die Zusammensetzung der mit dem Grundwasser in Kontakt stehenden Gase, die Druck- und Temperaturverhältnisse und die Verweildauer des Wassers im Untergrund beeinflusst. Neben der Zusammensetzung des Bodenwassers (Sickerwasser) und der Oberflächenwässer spielen im Grundwasserkörper Komplexbildungs- und Zerfallsprozesse, Säure-Base-Reaktionen, Oxidations-Reduktions-Reaktionen, Lösungs-Fällungsreaktionen, Adsorptions-Desorptions-Reaktionen sowie mikrobielle Akkumulations- und Abbauprozesse eine bedeutende Rolle (DVWK 1999, AD-HOC-ARBEITSGRUPPE HYDROGEOLOGIE 1997).

4.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage für die hydrogeochemische Charakterisierung der einzelnen hydrogeologischen Einheiten bilden flächendeckende Beprobungen der Rohwässer aus Brunnen der öffentlichen Trinkwasserversorgung, privater Trinkwasser- und Brauchwasserversorgungen sowie aus Quellen und untergeordnet aus Grundwassermessstellen. Probenahme und Analyse erfolgten ausschließlich durch das BayLfU (bis 2005: Bayerisches Geologisches Landesamt). Die Analyseergebnisse werden im Bodeninformationssystem Bayern (BIS-BY) vorgehalten.

Die chemischen Analysen vor 2003 wurden im Rahmen der Hydrogeologischen Fachbeiträge zu den Erläuterungen der Geologischen Karten 1:25 000 und anderer Projekte der hydrogeologischen Landesaufnahme durchgeführt. Zur Verdichtung des Datensatzes erfolgten in den Jahren 2003 bis 2005 weitere Beprobungen im Umgriff der Region.

Insgesamt ergab sich ein Probenumfang von 849 Wasserproben an 760 Probenahmepunkten. Anhang 1 zeigt die im hydrochemischen Labor des ehemaligen Bayerischen Geologischen Landesamtes routinemäßig analysierten Parameter mit Messmethoden, Nachweis- und Bestimmungsgrenzen sowie Teilprobenkonditionierung. Das genaue Probenahmeverfahren und die Analysemethoden können dem GLA-Fachbericht 21 „Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns“ (WAGNER et al. 2003) entnommen werden.

In 236 über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilten Proben aus allen hydrogeologischen Einheiten wurde das im Wasser gelöste Radon bestimmt. Die Werte lagen im Median bei 21 Bq/l und erreichten insbesondere in den paläozoischen Einheiten und Sandsteinkeuper auch Werte über 50 bis maximal 161 Bq/l.

4.2 Datenaufbereitung und -darstellung

Datenaufbereitung

Zunächst erfolgte eine Zuordnung aller Wasserproben zu den betrachteten hydrogeologischen Einheiten, die in der laufenden Analyse ständig überprüft und ggf. angepasst wurde. Bei doppelt oder mehrfach beprobten Objekten wurde geprüft, ob eine signifikante Änderung der Hauptinhaltsstoffe auftritt (Abweichung nicht größer als eine Standardabweichung im betreffenden Grundwasserleiter). Da sich keine größeren Schwankungen ergaben, wurde in diesen Fällen generell nur die jüngste Analyse verwendet, damit die einzelnen Probenahmepunkte in der statistischen Auswertung gleich gewichtet berücksichtigt werden. Um vergleichbare Analyseergebnisse zu erhalten,

wurden nur Proben ab 1982 verwendet, die einheitliche Analysemethoden gewährleisten. Zur Auswertung kamen zunächst Proben, von denen alle Werte der Hauptinhaltsstoffe (Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, Hydrogenkarbonat, Chlorid, Sulfat, Nitrat) vorliegen und bei denen der Fehler der Ionenbilanz $< 10\%$ ist. Zusätzlich wurden auch lückenhafte Analysen mit eingebunden sofern sie plausibel erschienen und die räumliche Verbreitung einzelner Spezies verdeutlichten.

Für die statistische Aufbereitung der Daten wurden wegen der zeitlichen Variabilität der Nachweis- und Bestimmungsgrenzen für die einzelnen Parameter einheitliche, generell eher konservative, höhere Werte verwendet (Anhang 1). Deshalb müssen hier im unteren Konzentrationsbereich gewisse Unschärfen der ermittelten Minima und Perzentilwerte in Kauf genommen werden.

Abschließend erfolgte mit der Statistik-Software SPSS eine Extremwertbetrachtung. Zunächst wurden alle untersuchten Parameter mittels Kolmogorow-Smirnow Test auf Normal- bzw. Log-Normalverteilung getestet (z.B. SCHÖNWIESE 2000; BACKHAUS et. al 2003). Zeigte sich keine signifikante Abweichung (Signifikanzniveau 95%) von der angenommenen Verteilung, wurden Q-Q Plots erstellt. Werte, die von der jeweils angenommenen Normal- bzw. Log-Normalverteilung abweichen, liegen in diesen Diagrammen nicht auf einer Geraden (ISAAKS & SRIVASTAVA 1989). Dies ist ein Hinweis darauf, dass sie nicht zur Grundgesamtheit gehören und somit nicht repräsentativ für den betrachteten Grundwasserleiter sind. Mögliche Gründe hierfür können punktförmige anthropogene Belastungen, Analyse- und Probenahmefehler (verunreinigte Probenahmeflaschen o. ä.) oder geogene Anomalien sein. Speziell in den von der Oberfläche beeinflussten Grundwasservorkommen wurden punktuell sehr hohe Werte festgestellt. Nach genauer Prüfung im Einzelfall wurden einige Werte aus dem Probenkollektiv entfernt und erscheinen somit nicht in der Übersichtstabelle in Anhang 2. Gleiches gilt für die Spurenelemente, wobei hier insgesamt deutlich weniger Ausreißer auftreten. Somit kann sich innerhalb einer betrachteten hydrogeologischen Einheit für die unterschiedlichen untersuchten Parameter eine unterschiedliche Probenanzahl ergeben. Diffuse, ubiquitäre Belastungen der Grundwässer durch Landwirtschaft (Düngung), Verkehr (Salzstreuung) und Eintrag aus der Luft wurden in der Regel nicht als Ausschlusskriterium eingebracht und spiegeln sich in Form der Hintergrundbelastung in den Daten wider.

Datendarstellung

In Kapitel 4.3 erfolgt eine Beschreibung der wesentlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften der untersuchten Grundwässer, meist bezogen auf die unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten. Zusätzlich werden die Ergebnisse in Diagrammen und Tabellen dargestellt:

- Die Typisierung der Grundwässer erfolgt durch Darstellung der äquivalent-prozentualen Zusammensetzung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) in Anionen- und Kationendreiecken und einer Vierstoffraute (Piperdiagramm).
- Die Medianwerte der mmol Äquivalent-Konzentrationen (meq) der Wasserhauptinhaltsstoffe werden in Stiff-Diagrammen visualisiert.
- Anhang 2 zeigt für jede hydrogeologische Einheit eine tabellarische, deskriptiv-statistische Auswertung aller untersuchten Parameter. Dargestellt sind für jeden Parameter Minimum, 10%- und 25%-Perzentil, Median, 75%- und 90%-Perzentil und Maximum sowie Anzahl der betrachteten Proben und die Anzahl der Proben, die unter der Nachweisgrenze liegen.
- Anhang 3 zeigt mittels Spannweitendiagrammen (Boxplots) für jeden Parameter die Verteilung bezogen auf die untersuchte hydrogeologische Einheit. Dargestellt sind wiederum die oben genannten statistischen Kennwerte und der Probenumfang.

Zusammenfassend erfolgt in Kapitel 4.4 eine Beschreibung der Wasserchemie mittels weiterer multivariater statistischer Verfahren.

4.3 Charakterisierung der Grundwässer nach Grundwasserleitern

4.3.1 Älteres Paläozoikum

Im Bereich des Frankenwald-Paläozoikum werden aufgrund des silikatischen Gesteinschemismus und der meist kurzen Verweilzeiten generell gering mineralisierte Grundwässer angetroffen. Davon abweichende höhere Lösungsinhalte sind häufig anthropogen bedingt. Als Einflussfaktoren sind neben der Wintersalzung und Landwirtschaft auch die luftbürtigen Immissionen zu berücksichtigen. Da die Grundwasserbewegung bevorzugt auf Klüften und besonders im Umfeld von Verwerfungen stattfindet, kann die Beschaffenheit lokal auch durch sekundär gebildete Kluftbeläge oder -füllungen beeinflusst sein. Zudem können sich auf die Mineralisation auch lokal aufsteigende Tiefenwässer auswirken. Dies gilt insbesondere für den Störungsbereich. Das Spektrum auffälliger Spurenelementgehalte ist vergleichsweise gering.

Unterschieden wurde in Wässer der Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge (10 Brunnen- und 33 Quellwasseranalysen), der Quarzite (6 Quellwasseranalysen) und der Tonschieferfolge (4 Brunnen- und 24 Quellwasseranalysen). Die Lage der Entnahmestellen ist in Abb. 4-1 dargestellt.

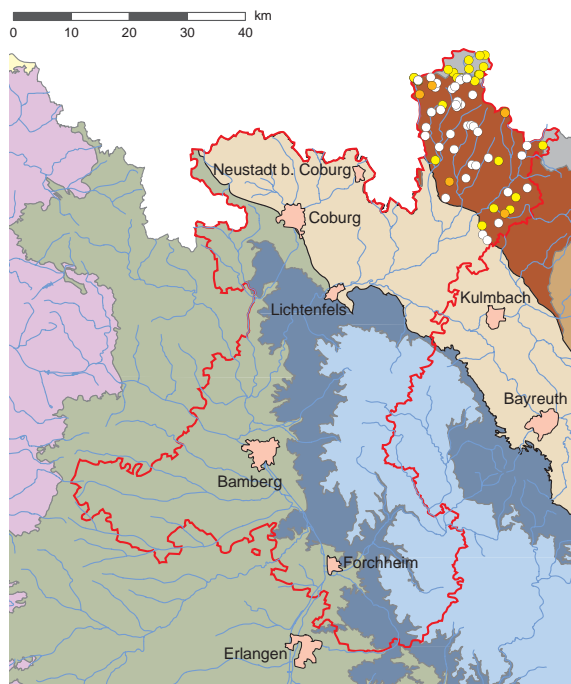


Abb. 4-1: Lage der Entnahmestellen der Grundwässer aus der Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge (weiß), Tonschieferfolge (gelb) und den Quarziten (orange) des Paläozoikum.

Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge

Die Grundwässer der Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge unterscheiden sich hinsichtlich der durchschnittlichen Lösungsinhalte häufig von denen der Tonschieferfolge. Neben den geogenen Faktoren spielt dabei aber oft die Flächennutzung im Einzugsgebiet eine erhebliche Rolle, so dass die festgestellten Unterschiede auch vorwiegend anthropogene Ursachen haben können.

Als Hauptbestandteile herrschen nach den Medianwerten bei den Kationen Calcium (12 mg/l) und Magnesium (5 mg/l), bei den Anionen Sulfat (19 mg/l) und Hydrogenkarbonat (19 mg/l) vor (Abb. 4-3). Zumeist in Abhängigkeit der anthropogenen Überprägung überschreiten Natrium, Chlorid und Nitrat die Schwelle zu den Hauptbestandteilen. Auffällig ist die Sulfatdominanz, die sowohl auf geogene als auch auf anthropogene Ursachen zurückgeführt werden kann. In diesem Zusammenhang spielen möglicherweise die in den Tonschiefern fein verteilten oder konkretionären Sulfidverbindungen eine Rolle. Da insbesondere in Quellwässern mit walddreichem Einzugsgebiet erhöhte Werte festgestellt wurden, kann anteilig auch von einer atmosphärischen Sulfatdeposition ausgegangen werden. Im Piperdiagramm zeigen sich insbesondere im Vierstoffdiagramm und im Anionendreieck sehr breite Streuungen, die sich vor allem mit der anthropogenen Beeinflussung vor dem Hintergrund der allgemein geringen Lösungsinhalte erklären lassen (Abb. 4-2). Mit einer Ausnahme lassen sich die Wässer nach dem Schema von FURTAK & LANGGUTH (1967) in die beiden Hauptgruppen der normal erdalkalischen oder erdalkalischen Wässer mit höherem Alkaligehalt einordnen. Es werden alle Typfelder – von überwiegend hydrogenkarbonatisch über sulfatisch zu überwiegend chloridisch – belegt.

Die Gesamtmineralisation erreicht mit 38 bis 325 mg/l überwiegend unterdurchschnittliche Werte. Dementsprechend werden mit Gesamthärten zwischen 1 und 5 °dH in etwa 90% aller Fälle sehr weiche bis weiche Wässer angetroffen. Die pH-Werte streuen von 4,2 bis 7,8 und unterstreichen den sauren bis leicht alkalischen Charakter der Wässer. Aufgrund der geringen Basekapazitäten setzt offensichtlich bereits bei relativ geringen Gesamthärten und trotz nachweislicher Defizite bei der Karbonatsättigung eine wirksame Pufferung ein, was dann die neutralen bis leicht alkalischen pH-Werte bei etwa 25% der untersuchten Wässer erklären mag. Hinsichtlich der Sauerstoffsättigung werden nur bei einigen Brunnenwässern deutliche Defizite beobachtet. Der positive Effekt liegt dann in einer wirksamen Nitratreduktion. Infolge der (teil-)reduzierten Verhältnisse werden bei etwa 25% der Wässer Überschreitungen nach der TRINKWV (2001) bei Mangan und in Einzelfällen auch bei Eisen festgestellt.

Auffällige, regional erhöhte Spurenstoffinhalte sind selten. Für über die Hälfte aller gemessenen Spuren liegen bei einer Vielzahl der Analysen die Gehalte unter der Nachweisgrenze. Medianwerte über 10 µg/l erreichen die Elemente Strontium (59 µg/l), Barium (54 µg/l) und Aluminium (19 µg/l) über 1 µg/l Zink (6,6 µg/l), Bor (4,6 µg/l), Lithium (1,9 µg/l) und Nickel (1,4 µg/l). Mit wenigen Ausnahmen wurden diese Elemente auch in allen Wässern der Wechselfolge nachgewiesen. Bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet sind hier die höchsten Aluminiumgehalte gemessen worden; mögliche Ursachen werden im Kapitel 4.3.3 erläutert. Des Weiteren tritt noch Zink mit überdurchschnittlich hohen Werten hervor.

Quarzite

Quarzitwässer unterscheiden sich nicht wesentlich von den geringer mineralisierten Wässern aus der Grauwacke-Tonschiefer-Folge. Die Hauptstoffgehalte sind gering mit Calcium, Hydrogenkarbonat und Sulfat als vorherrschende Spezies. Es handelt sich um saure bis leicht saure, deutlich karbonatuntersättigte, sehr weiche bis weiche Quellwässer mit einem verhältnismäßig geringen Inventar an Spurenelementen höherer Konzentrationen.

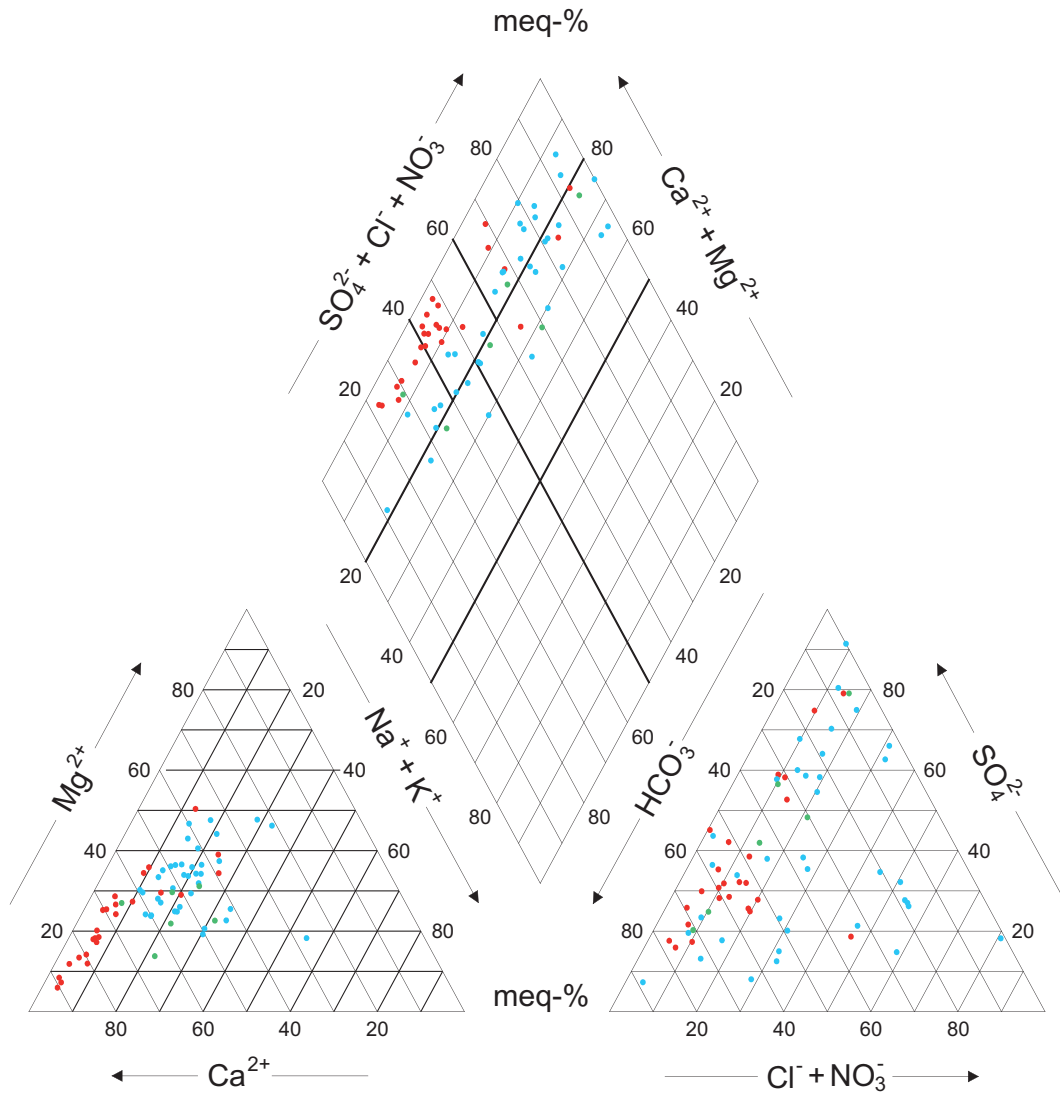


Abb. 4-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Paläozoikum im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967); blau: Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge (43); rot: Tonschiefer (28); grün: Quarzite (6).

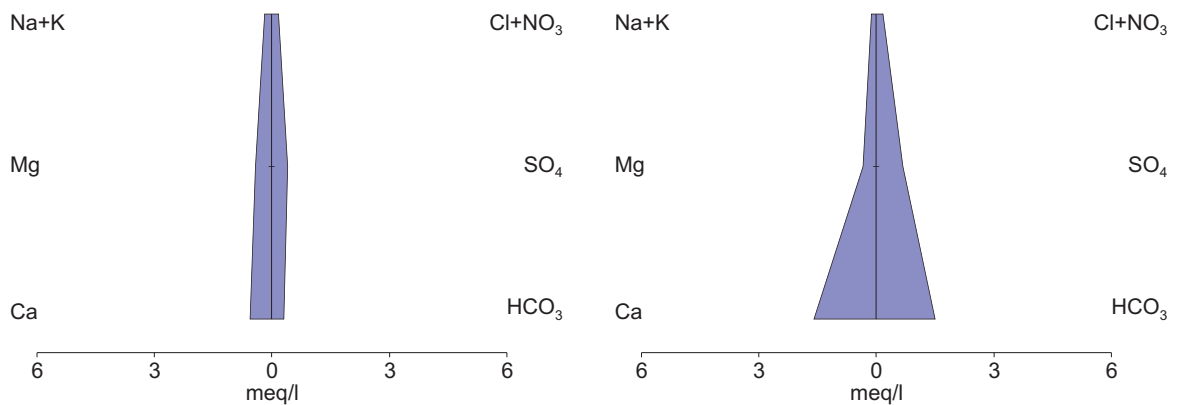


Abb. 4-3: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus der Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge (links) und den Tonschiefern (rechts) im Stiff-Diagramm (Probenahmestellen: Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge 43; Tonschiefer 28).

Tonschieferfolge

Auf den generellen Unterschied zu den Wässern der grauwacke- bzw. quarzitbetonten Abfolgen wurde bereits hingewiesen. Im direkten Vergleich zeichnen sich hier im Trend höhere Mineralisationen ab, die sich vorwiegend durch höhere Gesamt- und Karbonathärten sowie Sulfatkonzentrationen begründen. Die Siliciumgehalte sind tendenziell niedriger. Hauptbestandteile bei den Kationen sind nach den Medianwerten Calcium (33 mg/l) und bei etwa 25% der Wässer auch Magnesium (5 mg/l) und Natrium (3 mg/l), bei den Anionen Hydrogenkarbonat (92 mg/l) und Sulfat (34 mg/l), seltener Chlorid (4 mg/l) (Abb. 4-3). Für die erhöhten Sulfatgehalte dürften die vorherrschenden gelegentlich pyritführenden Tonschiefer mitverantwortlich sein. Die bereits bei den anderen paläozoischen Einheiten erläuterten qualitätsbeeinflussenden Effekte besitzen hier aufgrund ähnlicher Randbedingungen gleichfalls Gültigkeit. Im Piperdiagramm zeigt sich infolge der Erdalkaliendominanz ein gleichförmigeres Bild. Nach FURTAK & LANGGUTH (1967) handelt es sich demnach mit einigen Ausnahmen um normal erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische oder hydrogenkarbonatisch-sulfatische Wässer (Abb. 4-2). Die Ausnahmen bilden sulfatbetonte, hauptsächlich am Nordrand der Region auftretende, möglicherweise durch Karbonat führende devonische oder ordovizische Einheiten beeinflusste Wässer.

Die Gesamtmineralisation erreicht mit 55 bis 381 mg/l innerhalb der paläozoischen Einheiten etwas höhere, aber im regionalen Vergleich eher unterdurchschnittliche Werte. Dementsprechend werden relativ geringe Gesamthärten von 2 bis 14 °dH beobachtet, was sehr weichen bis mittelharten Wässern entspricht. Diese haben mit pH-Werten zwischen 5,3 und 8,2 leicht sauren bis leicht alkalischen Charakter. Die Sättigung gegenüber Calciumkarbonat ist meist defizitär. Eine deutliche Sauerstoffuntersättigung zeigen nur die Brunnenwässer, was dort vereinzelt auch zu Überschreitungen nach der TRINKWV (2001) bei Eisen und Mangan führt.

Bei den Spurenelementen wurden mit Gehalten im Median von über 10 µg/l Strontium (92 µg/l) und Barium (14 µg/l), über 1 µg/l in der Reihenfolge abfallender Konzentration die Elemente Aluminium (4,8 µg/l), Bor (4 µg/l), Zink (2,3 µg/l) und Lithium (1,8 µg/l) angetroffen. Anhand der etwas erhöhten Strontiumgehalte zeichnet sich möglicherweise der Einfluss Karbonat führender Gesteine ab. Die Aluminiumvorkommen stehen wahrscheinlich überwiegend mit der weit verbreiteten Bodenversauerung im Zusammenhang.

4.3.2 Rotliegend

Zu Charakterisierung der Rotliegend-Grundwasservorkommen im Bereich des Stockheimer Trogs liegen 8 Brunnen- und 2 Quellwasseranalysen vor (Abb. 4-4). Den Schichtenverzeichnissen der Brunnenbohrungen zufolge bauen vorwiegend Sand- und Tonsteine den Grundwasserleiter auf, was den silikatischen Charakter der Wässer erklärt. Das nach den Untersuchungen von DILL (1988) als sehr reichhaltig beschriebene Gesteinsinventar – u. a. mit Sulfat-, Kohle-, Karbonat- und Vulkanitlagen sowie Vererzungen – hat offensichtlich vor allem Auswirkungen auf die Spurenelementkonzentrationen. Eine anthropogene Beeinflussung ist in allen Wässern messbar. Da es sich um ein vergleichsweise begrenztes Grundwasservorkommen handelt, ist die nachfolgend aufgeführte Beschaffenheit trotz geringer Analysenanzahl als weitgehend repräsentativ für den Grundwasserleiter zu sehen.

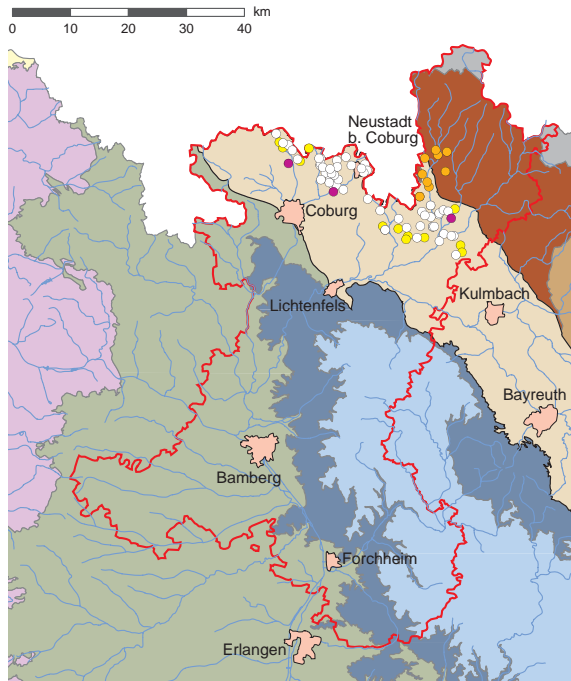


Abb. 4-4: Lage der Entnahmestellen im Rotliegend (orange), Oberen (gelb) und Unteren und Mittleren (weiß) Buntsandstein und Muschelkalk (violett).

Infolge der Medianwerte dominieren als Hauptbestandteile Calcium (42 mg/l) und Hydrogenkarbonat (129 mg/l) (Abb. 4-6). Untergeordnet und zum Teil abhängig von anthropogenen Stoffeinträgen treten Natrium (9 mg/l), Magnesium (6 mg/l) und Sulfat (20 mg/l), Nitrat (23 mg/l), Chlorid (15 mg/l) als Hauptbestandteile auf. Die Erdalkaligehalte sind dabei vorwiegend auf karbonatische Lagen und Gesteinszementationen zurückzuführen und daher weitgehend geogener Natur. Als Sulfatquellen kommen neben den anthropogenen Einträgen auch kohlehaltige Partien sowie Gips-/Anhydritvorkommen im Mittel- und Unter-Rotliegend in Betracht. An dieser Stelle ist noch Silicium zu nennen, das in allen untersuchten Wässern als Hauptbestandteil angetroffen wurde. Es wurden die im Untersuchungsgebiet höchsten durchschnittlichen Siliciumgehalte ermittelt (Medianwert 6,7 mg/l). Nach FURTA & LANGGUTH (1967) handelt es sich um normal erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische bisweilen auch hydrogenkarbonatisch-sulfatische Süßwässer (Abb. 4-5). Ausreißer identifizieren sich als anthropogen deutlich überprägt.

Die Gesamtmineralisation reicht von 117 bis 430 mg/l und weist auf eher unterdurchschnittlich mineralisierte Wässer hin. Die Gesamthärten schwanken in einem vergleichsweise engen Bereich von weich (3 °dH) bis mittelhart (15 °dH). Mit pH-Werten zwischen 6,3 und 7,8 werden leicht saure bis leicht alkalische Wässer angetroffen. Das Wertespektrum des Calciumkarbonatsättigungsindex belegt mehrheitlich deutliche bis mäßige Sättigungsdefizite. Bei den 6 Brunnenwässern mit Sauerstoffmessungen liegen aufgrund ihrer durchschnittlichen Erschließungstiefen teilreduzierte (22 bis 57% Sauerstoffsättigung) Verhältnisse vor.

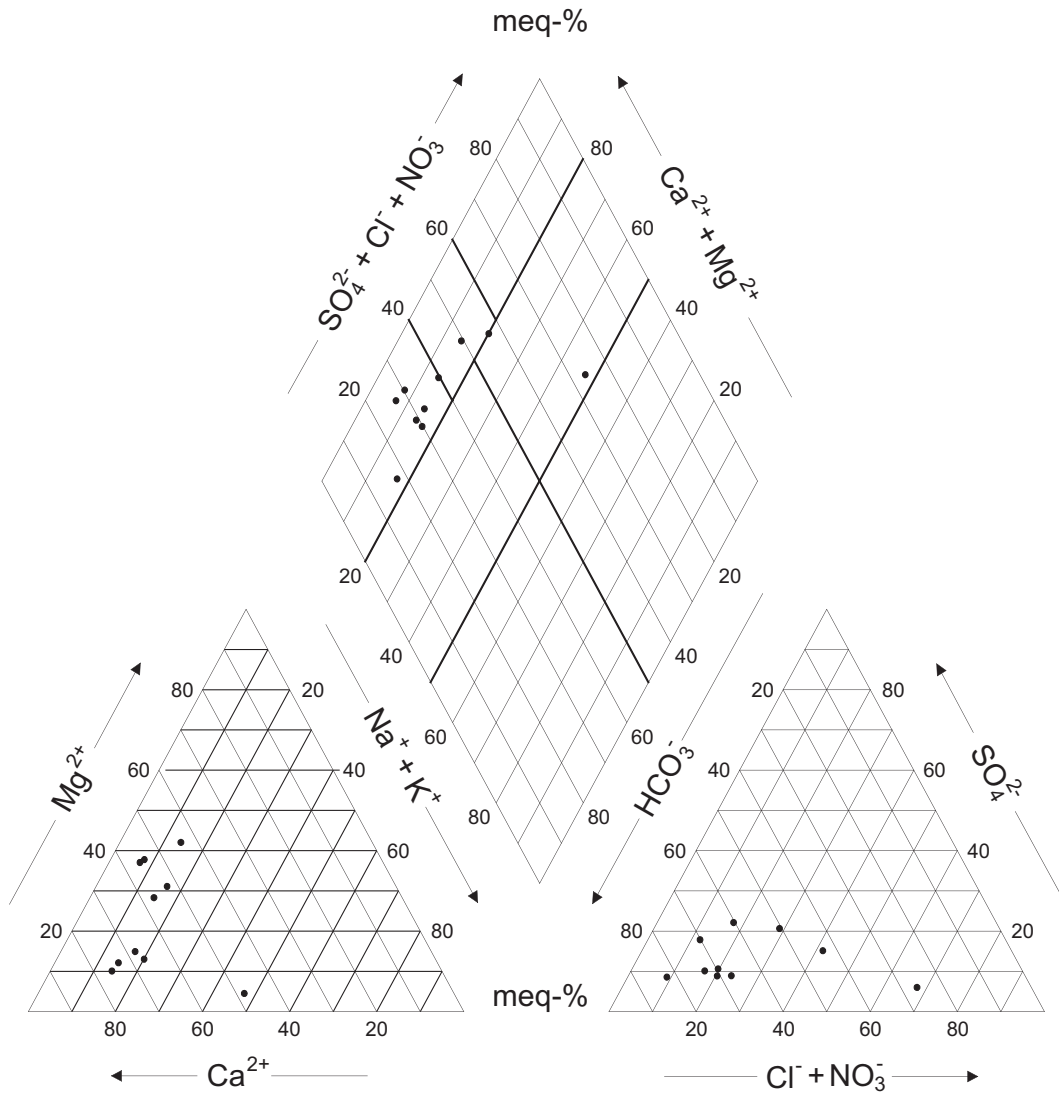


Abb. 4-5: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Rotliegend im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (10 Probenahmestellen).

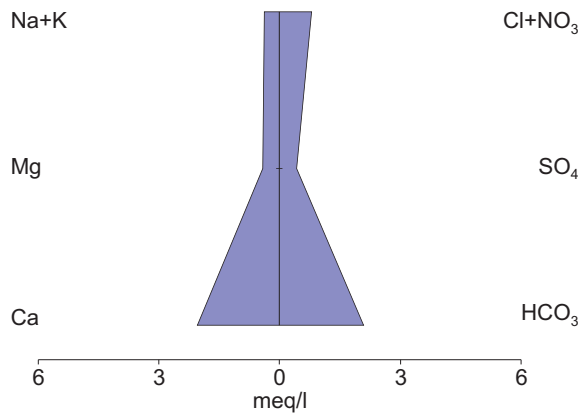


Abb. 4-6: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Rotliegend im Stiff-Diagramm (10 Probenahmestellen).

Wie bereits erwähnt, wird im Rotliegend ein relativ breites Spektrum an Spurenelementen mit erhöhten Konzentrationen vorgefunden. Ausgehend von den prospektiven Fazieszonen nach DILL (1988) kommen als Emittenten vor allem das Unter- und Mittel-Rotliegend in Frage. Offensichtlich sind die Kohle, Erz und Sulfat führenden Sedimentkörper in diesen Abfolgen über sedimentologische und/oder tektonische Strukturen hydraulisch angebunden. Es dominieren mit Konzentrationen von über 100 µg/l im Median Barium (453 µg/l) und Strontium (183 µg/l). In diesem Zusammenhang sind möglicherweise die von DILL (1988) beschriebenen Barytgänge und Salz-Ton-Playaablagerungen von Bedeutung. Mit Medianwerten über 10 µg/l folgen Bor (54 µg/l) und Lithium (16,4 µg/l). Medianwerte über 1 µg/l erreichen in der Reihenfolge abnehmender Konzentrationen noch Zink (2,7 µg/l), Rubidium (2,5 µg/l), Uran (2,3 µg/l), Arsen (1,7 µg/l) und Kupfer (1,1 µg/l). Für Barium und Arsen wurden die in der Region höchsten Medianwerte nachgewiesen. Die ermittelten Kupfer-, Rubidium- und Urangelhalte sind im regionalen Kontext ebenfalls überdurchschnittlich hoch. Erwähnenswert sind diesbezüglich die erhöhten Urankonzentrationen in den Kohlenflözen um Stockheim.

4.3.3 Buntsandstein

Im Buntsandstein sind aus qualitativer Sicht die Grundwässer des Oberen von denen des Unteren und Mittleren Buntsandstein zu unterscheiden. Aufgrund der Verbreitung und der wasserwirtschaftlichen Nutzung in der Region liegt das Hauptaugenmerk auf dem Unteren und Mittleren Buntsandstein, für den insgesamt 25 Brunnen- und 31 Quellwässer analysiert wurden. Im Oberen Buntsandstein liegen Analysen für 11 Quellwässer und ein Brunnenwasser vor. Die Entnahmestellen sind in der Abbildung 4-4 dargestellt.

Unterer und Mittlerer Buntsandstein

Der durchwegs silikatisch aufgebaute Leiterkomplex führt naturgemäß mineralärmere Grundwässer, die allerdings durch den Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen auch überprägt vorliegen. Die häufig tektonisch bedingte Nachbarschaft Karbonat und/oder Sulfat führender triassischer, jurassischer und vereinzelt auch paläozoischer Einheiten kann für die Grundwasserbeschaffenheit eine Rolle spielen. In speziellen hydrogeologischen Situationen (z.B. hydraulischen Entlastungszonen) tritt eine begrenzte Beimischung mineralreicherer Grundwässer auf, was eine Aufhärtung der ansonsten sehr weichen Wässer zufolge hat. Dieser Effekt ist in einigen Tiefbrunnen lokaler Wasserversorger zu beobachten. Im Quellwasser des „Mergelbrunnleins“ NW Kemmaten ist der Einfluss einer benachbarten Muschelkalkbruchscholle deutlich sichtbar. Eine lokale Zusickerung mittelharter, sulfatreicherer Wässer aus dem hangenden Stockwerk des Oberen Buntsandstein führt gleichermaßen zur Aufhärtung. Oberflächennahe Grundwässer mit Straßen und Landwirtschaft im Einzugsgebiet zeigen zudem eine deutliche anthropogene Komponente.

Hinsichtlich der Medianwerte sind als Hauptbestandteile bei den Kationen meist Calcium (23 mg/l) und seltener auch Magnesium (5 mg/l), bei den Anionen Hydrogenkarbonat (48 mg/l) und Sulfat (22 mg/l) vorherrschend (Abb. 4-8). In Abhängigkeit anthropogener Stoffeinträge oder auch bei Mischwässern überschreiten Natrium, Chlorid und Nitrat die Schwelle zu den Hauptbestandteilen. Kalium ist meist Nebenbestandteil; häufig sind hier die für „unbeeinflusste“ Wässer aus dem Buntsandstein typischen K/Na-Verhältnisse größer 1 zu beobachten. Vor dem Hintergrund der allgemein geringen Mineralisation zeigt sich im Piper-Diagramm insbesondere bei den Anionen eine sehr breite Streuung, d.h. schon geringere Stoffeinträge führen zu einer deutlichen Verschiebung der Ionenverhältnisse (Abb. 4-7). Nach dem Schema von FURTAK & LANGGUTH (1967) sind die Wässer im unbeeinflussten Zustand als normal erdalkalisch, überwiegend hydrogenkarbonatisch oder hy-

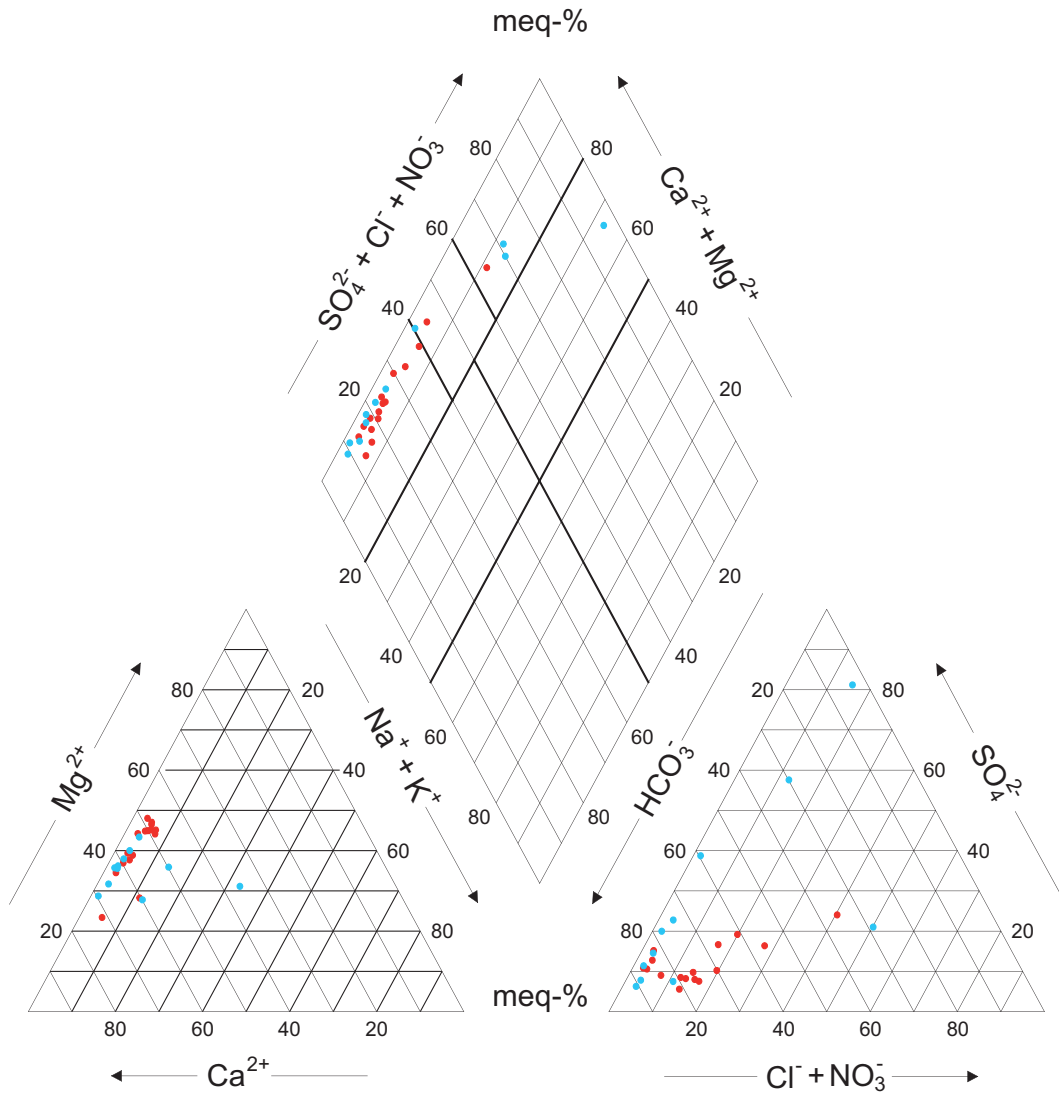


Abb. 4-7: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Buntsandstein im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967); blau: Oberer Buntsandstein (11); rot: Unterer- Mittlerer Buntsandstein (56).

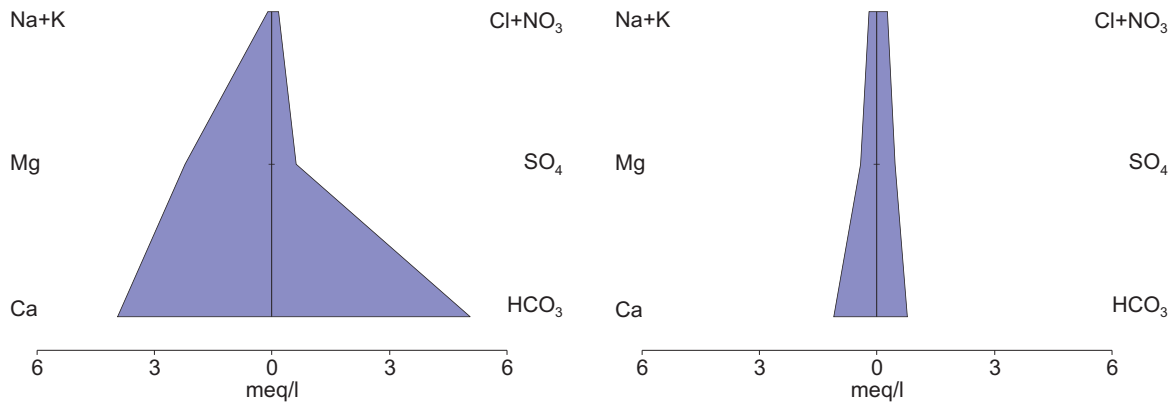


Abb. 4-8: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Oberen (links) und dem Unteren und Mittleren (rechts) Buntsandstein im Stiff-Diagramm (Probenahmestellen: Oberer Buntsandstein 11; Unterer und Mittlerer Buntsandstein 56).

drogenkarbonatisch bis sulfatisch einzustufen. Zunehmend beeinflusste Wässer tendieren eher zu den erdalkalischen Wässern mit höherem Alkaligehalt.

Die typische Gesamtmineralisation schwankt zwischen 40 und 250 mg/l, bei höheren Mineralisationen handelt es sich um lokale Sonderfälle. Bei 75% aller Fälle werden mit Gesamthärten von 1 bis 8 °dH und pH-Werten von 4,6 bis 7,1 sehr weiche bis weiche, leicht saure bis neutrale Wässer angetroffen. Höhere Werte werden für beide Parameter nur bei stärkerer Überprägung beobachtet. Die Calciumkarbonat-Sättigungsindizes weisen mehrheitlich (75% aller Fälle) mit Werten zwischen -6,7 und -1,3 auf eine deutliche Untersättigung hin. Bei der Sauerstoffsättigung wurden mit Werten von 50 bis über 100% nur mäßige bis geringe Defizite, zum Teil gesättigte bis übersättigte Verhältnisse, festgestellt. In Einzelfällen überschreiten einige Wässer bei Mangan (bis 0,06 mg/l) die Grenzwerte nach der TRINKWV (2001).

Bei den Spurenelementen dominiert Barium mit 211 µg/l im Median (90% liegen zwischen 64 und 925 µg/l). BÜTTNER (1995) ermittelte für Buntsandsteinwässer auf Blatt 6036 Weidenberg ähnlich hohe Bariumkonzentrationen. Als Bariumquelle kommen vermutlich die Gesteine selbst sowie lokale Schwerspatgänge in Frage. LINHARDT & ZABROK (2005) ermittelten sowohl für Ton- als auch Sandsteine des Mittleren Buntsandstein vergleichsweise hohe mittlere Bariumgehalte von 700 und 1200 ppm. Mit 54 µg/l im Median (4 bis 548 µg/l) ist Strontium ebenfalls von Bedeutung. In diesem Zusammenhang fällt auf, dass Strontiumgehalte > 100 µg/l nur in 15 Brunnenwässern auftreten. Eine Ausnahme bildet mit einer Strontiumkonzentration von 228 µg/l das bereits genannte Quellwasser des „Mergelbrünneins“ wobei als hauptsächlicher Strontiumemittent die im Einzugsgebiet liegende Muschelkalkscholle in Frage kommt. Die strontiumreicheren Wässer überschreiten auch für Calcium, Magnesium und Hydrogenkarbonat zum Teil deutlich die für den Buntsandstein ermittelten Medianwerte, was letztendlich auf Mischwassertypen hinweist. Für Rubidium wurden im Vergleich zu allen anderen Einheiten mehrheitlich die höchsten Werte (bei 80% zwischen 2,3 und 10,7 µg/l) in der Region ermittelt. Mit Gehalten im Median zwischen 1 und 10 µg/l liegen in der Reihenfolge abnehmender Konzentrationen noch Aluminium (7,8 µg/l), Zink (4,4 µg/l), Lithium (2,6 µg/l), Kupfer (1,4 µg/l) und Nickel (1,1 µg/l) vor, wobei Aluminium und Nickel nicht in allen Brunnenwässern nachgewiesen wurden. Für Aluminium wird bei einigen Quellwässern der Grenzwert nach der TRINKWV (2001) von 200 µg/l überschritten (222–1200 µg/l). Höhere Aluminiumkonzentrationen im Buntsandstein korrespondieren nach WAGNER et al. (2003) mit den Al-Gehalten im silikatischen Ausgangsgestein und den guten Löslichkeiten bei niedrigen pH-Werten. Bei oberflächennahen Quellwässern wird Aluminium durch die Versauerung auch anthropogen mobilisiert.

Oberer Buntsandstein

Aufgrund der Karbonat- und Sulfatführung unterscheiden sich die Wässer des Oberen meist deutlich von denen des Unteren und Mittleren Buntsandstein. Einfluss auf die Qualität dürfte bei einem Teil der Wässer auch der hangende Muschelkalk ausüben. Die lokale Tektonik spielt möglicherweise ebenso eine Rolle.

Hauptbestandteile bei den Kationen sind nach den Medianwerten Calcium (23 mg/l) und in 90% aller Fälle auch Magnesium (5 mg/l). Bei den Anionen herrschen mit einer Ausnahme Hydrogenkarbonat (48 mg/l) und Sulfat (22 mg/l) vor (Abb. 4-8). Die jeweiligen Maximalwerte werden bei einem einzelnen Quellwasser (Klausenquelle, NE Gestungshausen) beobachtet. Nitrat und Chlorid überschreiten in etwa 40% aller Fälle ebenso die Schwelle zu den Hauptbestandteilen, was ausschließlich anthropogene Ursachen haben dürfte. Silicium, Natrium und Kalium sind ausnahmslos Nebenbestandteile. Bei der Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) zeigen sich ähnliche Verhältnisse wie beim Unteren und Mittleren Buntsandstein (Abb. 4-7). Demnach handelt es sich

häufig um normal erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische, zum Teil auch sulfatische Wässer.

In den Einzugsgebieten der Grundwasservorkommen ist der Einfluss karbonatischer und sulfatischer Gesteine allerdings sehr unterschiedlich ausgeprägt, was zu breiten Wertestreuungen bei den meisten Hauptinhaltsstoffen und den davon abhängigen Parametern führt. Allen untersuchten Wässern gemeinsam sind die stets über 16 mg/l liegenden Sulfatgehalte. Die Gesamtmineralisation schwankt zwischen 48 und 880 mg/l. Eine vergleichbare Streuung weisen die Gesamthärten (1 bis 33 °dH), pH-Werte von 4,4 bis 8,3 und Karbonatsättigungsindizes von -4,6 bis +0,5 auf. Die niedrigeren Werte beziehen sich auf isolierte Grundwasservorkommen im Rötquarzit, die hier gering mineralisierte, saure, weiche bis sehr weiche, karbonatuntersättigte Wässer führen. Ansonsten handelt es sich eher um mittelharte bis harte, leicht alkalische Wässer weitestgehend ohne größere Defizite bei der Karbonatsättigung. Die Sauerstoffsättigung der Wässer liegt mehrheitlich zwischen 70 und 98% und zeigt schwach reduzierte bis gesättigte Verhältnisse an.

Bei den Spurenelementen dominiert Barium (39,8–320 µg/l) mit 84 µg/l gefolgt von Strontium (23,5–566 µg/l) mit 72 µg/l im Median. Auffällig ist die deutlich bimodale Verteilung der Strontiumgehalte, wobei höhere Gehalte (180–566 µg/l) nur bei Quellwässern mit Muschelkalküberdeckung im Einzugsgebiet beobachtet werden. Elemente mit Medianwerten zwischen 1 und 10 µg/l sind in der Reihenfolge abnehmender Konzentrationen Lithium (6,6 µg/l), Rubidium (1,8 µg/l), Uran (1,3 µg/l) und Zink (1,2 µg/l).

4.3.4 Muschelkalk

Für die Charakterisierung der Muschelkalkwässer steht nur spärliches Datenmaterial zur Verfügung. Es existieren 2 Vollanalysen (Hauptinhaltsstoffe und Spuren) neueren Datums und 5 unvollständige Analysen aus den 70er Jahren. Nachfolgend wird deshalb nur ein kurzer Überblick gegeben. Die Entnahmestellen sind in Abb. 4-4 dargestellt. Aufgrund der karbonatischen Wirtsgesteine sind, wie mit den vorliegenden Analysen belegt, generell harte, bei hydraulischem Kontakt zu sulfatischen Lagern auch sehr harte Grundwässer zu erwarten. Die bekannten Härten reichen von 18 bis 29 °dH. Geringere Härten dürften bereits auf Mischwässer hindeuten. Als Hauptbestandteile dominieren bei den Kationen folglich Calcium (80–178 mg/l) und Magnesium (20–37 mg/l), bei den Anionen Hydrogenkarbonat (265–396 mg/l) und Sulfat (21–192 mg/l). Je nach Beteiligung von Wässern aus dem Gips führenden Mittleren Muschelkalk können die Maximalwerte für Calcium und Sulfat noch deutlich überschritten werden. Die pH-Werte zwischen 7,2 und 7,7 weisen auf einen leicht alkalischen Charakter hin. Nach FURTAK & LANGGUTH (1967) handelt es sich weitgehend um normal erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische oder hydrogenkarbonatisch-sulfatische Wässer.

Bei den 2 Vollanalysen wurden insbesondere für Strontium sehr hohe Werte gemessen (1,2 und 14,1 mg/l). Ähnlich hohe Werte beschreiben WAGNER et al. (2003) für Wässer aus dem Mittleren Muschelkalk. Als weiteres Spurenelement mit höheren Gehalten bei beiden Analysen (37 und 65 µg/l) fällt noch Barium auf.

4.3.5 Keuper und Rhätolias

4.3.5.1 Unterer Keuper

Aus dem Unteren Keuper im nördlichen Randbereich der Region 4, etwa nördlich der Linie Rodach–Meeder, stehen 10 Vollanalysen von Quellwässern jüngeren Datums zur Verfügung (Abb. 4-9). Im Ausstrich entlang der Fränkischen Linie liegen zusätzlich 3 Analysen von Quellwässern der ehemaligen Wasserversorgungen von Seubelsdorf und Großvichtach vor. Für die statistische Betrachtung der Hauptinhaltsstoffe wurden einige ältere Analysen von Brunnen- und Quellwässern, die bereits in den westlich angrenzenden Nachbarregionen liegen, mit eingebunden. Wässer, die nachweislich dem Grenzdolomit des Unteren Keuper entstammen, wurden in den statistischen Darstellungen der Boxplots und Stiff-Diagramme nicht berücksichtigt.

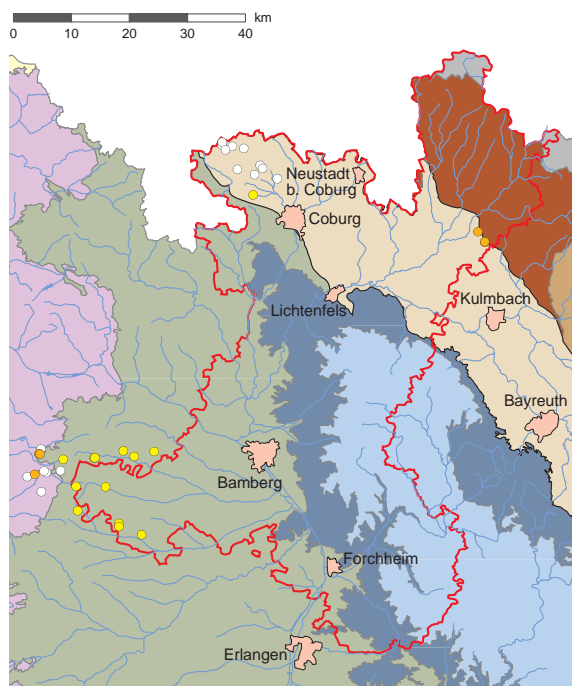


Abb. 4-9: Lage der Entnahmestellen im Unteren Keuper (weiß), Grenzdolomit (orange) und Gipskeuper (gelb).

Hauptbestandteile aller Wässer sind bei den Kationen Calcium (56–232 mg/l) und Magnesium (21–68 mg/l), bei den Anionen Hydrogenkarbonat (151–542 mg/l) und Sulfat (23–411 mg/l) (Abb. 4-11). In vielen Fällen überschreiten auch Chlorid und Nitrat zum Teil deutlich die Schwelle zu den Hauptbestandteilen, was überwiegend auf flächenhaften landwirtschaftlichen Stoffeintrag zurückzuführen ist. Die durchschnittlich hohen Magnesiumgehalte stehen vermutlich mit den vorwiegend dolomitisches ausgeprägten Karbonateinschlaltungen im Zusammenhang. Die Sulfatgehalte haben nach UDLUFT (1979) vor allem anthropogene Ursachen. Bei Gipsführung im Grenzdolomit (EMMERT 1964) und unter Einfluss hangender Sulfatlager im Gipskeuper dürften höhere Konzentrationen eher auf einen geogenen Hintergrund zurückzuführen sein (z.B. Quellwässer der ehem. WV Seibelsdorf). Dafür sprechen die gleichfalls hohen Calciumkonzentrationen. Bislang ist auch noch nicht geklärt, inwieweit die bekannte Sulfidführung im Unteren Keuper eine Rolle für die vorkommenden Sulfatkonzentrationen spielt. Durch die Vormacht der Erdalkalien können die meisten Wässer nach FURTAK & LANGGUTH (1967) zur normal erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen oder vereinzelt auch sulfatischen Gruppe gezählt werden (Abb. 4-10).

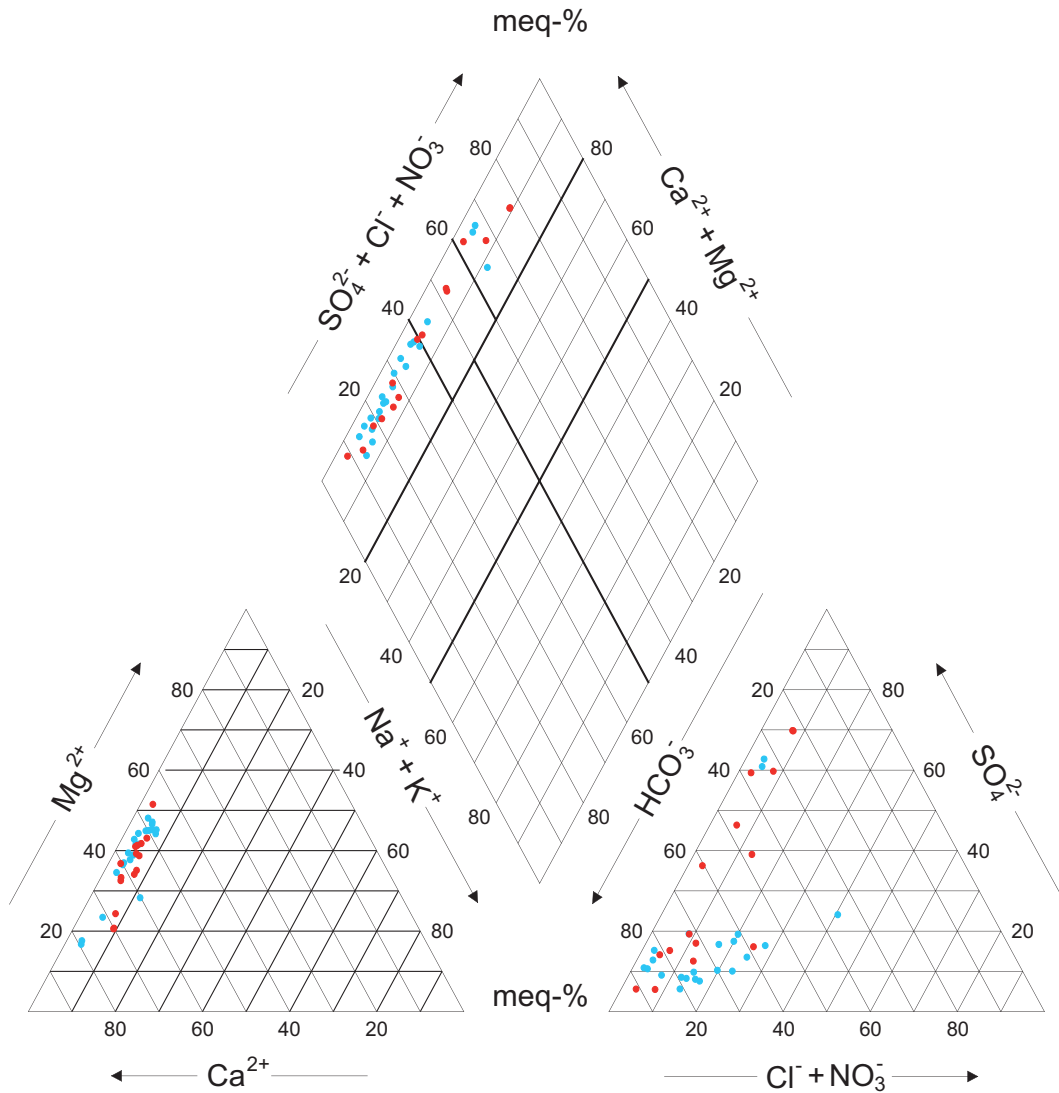


Abb. 4-10: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Unteren Keuper (blau) und Gipskeuper (rot) im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (Probenahmestellen: Unterer Keuper 16; Gipskeuper 13).

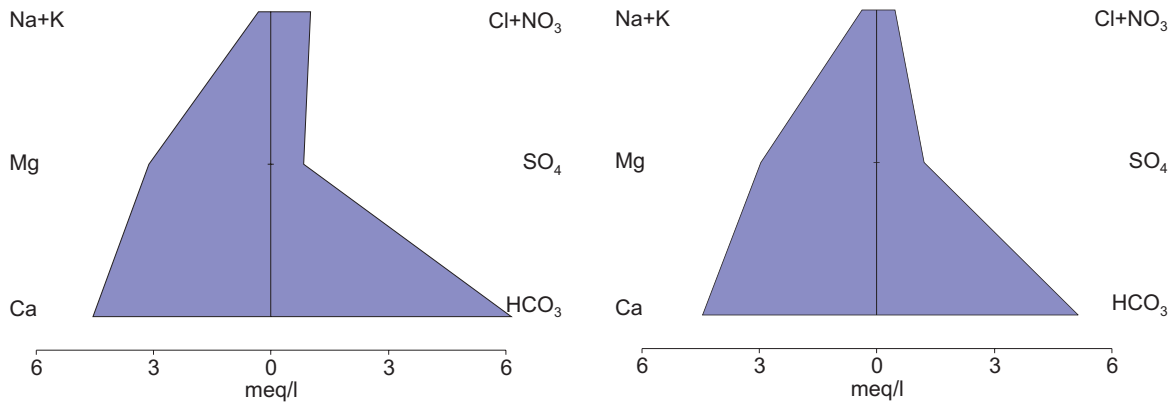


Abb. 4-11: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Unteren Keuper (links) und Gipskeuper (rechts) im Stiff-Diagramm (Probenahmestellen: Unterer Keuper 16; Gipskeuper 13).

Die Gesamtmineralisation streut zwischen 400 und 1000 mg/l bei neutralen bis leicht alkalischen pH-Werten von 7 bis 7,6. Mit Gesamthärten von 15 bis 39 °dH werden mittelharte bis sehr harte Wässer angetroffen. Die mittelharten Wässer mit geringeren Mineralisationen beschränken sich dabei auf isolierte Vorkommen im Werksandstein. Bei fehlender Lößüberdeckung und walddreichem Einzugsgebiet können dort bisweilen auch äußerst gering mineralisierte saure Wässer auftreten. Die Sauerstoffsättigung befindet sich mit Werten zwischen 36 und 71% meist im teilgesättigten Bereich.

Bei den Spurenelementen wurden mit Gehalten im Median von über 100 µg/l Strontium (144 µg/l), über 10 µg/l Barium (86,3 µg/l) und über 1 µg/l in der Reihenfolge abfallender Konzentration die Elemente Lithium (9 µg/l), Zink (1,8 µg/l) und Chrom (1,4 µg/l) angetroffen. Für Chrom wurden die durchschnittlich höchsten Werte in der Region ermittelt. Etwa 75% der auf Aluminium untersuchten Wässer (8 von 12) zeigen mit Werten von 32 bis 1051 µg/l auffällig hohe Konzentrationen. Eine Al-Grenzwertüberschreitung nach der TRINKWV (2001) (> 200 µg/l) wurde allerdings nur bei einem Grundwasservorkommen im Forst Gellnhausen beobachtet. In den 3 Quellwässern nahe der Fränkischen Linie wurden vergleichsweise sehr hohe Strontium- (707–2629 µg/l) und höhere Lithiumgehalte (14–20 µg/l) festgestellt.

4.3.5.2 Gipskeuper

Aus dem Gipskeuper liegen insgesamt 13 Vollanalysen (8 davon mit Spurenanalytik) vor. Dabei handelt es sich um 9 Brunnen- und 6 Quellwässer aus der Schichtenfolge Schilfsandstein bis Lehrbergsschichten. Alle Angaben zu Spureninhalten sind aufgrund der geringen Analysenanzahl nur als Trend zu sehen. Die Entnahmestellen sind in Abb. 4-9 dargestellt.

Der Abb. 4-11 zufolge sind die wesentlichen Hauptbestandteile Calcium (61–200 mg/l) und Magnesium (25–74 mg/l) sowie Hydrogenkarbonat (226–565 mg/l) und Sulfat (25–484 mg/l). Die zum Teil erhöhten Magnesiumanteile deuten auf dolomithaltige Karbonate hin, die neben den feinkörnigen Sandsteinlagen als Grundwasser führende bzw. leitende Schichten am Hauptwasserumsatz im Gipskeuper beteiligt sind. Die höheren Calcium- und Sulfatgehalte gehen auf die Gipsführung zurück. Nach FURTAK UND LANGGUTH (1967) handelt es sich um normal erdalkalische Wässer. Je nach Beteiligung sulfatführender Lagen erfolgt eine Typisierung in überwiegend hydrogenkarbonatisch oder hydrogenkarbonatisch-sulfatisch bis überwiegend sulfatisch (Abb. 4-10).

Je nach Präsenz und Einfluss sulfatischer Gesteine variiert die Gesamtmineralisation in einem breiten Spektrum zwischen 440 und 1180 mg/l. Bei den Wässern mit Sulfatgehalten zwischen 25 und 60 mg/l liegt sie zwischen 440 und 540 mg/l bei einer Gesamthärte zwischen 14 und 19 °dH. Als Sonderfall zeigen zwei Analysen etwas erhöhte Calciumwerte und wesentlich höhere Magnesiumwerte (48–62 mg/l) bei vergleichsweise geringen Sulfatgehalten (25–28 mg/l), was auf den Einfluss dolomitischer Lagen hinweist. Die Gesamtmineralisation erreicht dann Werte zwischen 710 und 770 mg/l bei einer Gesamthärte von 24 bis 27 °dH (hart). Die Karbonathärte liegt zwischen 12 und 26 °dH aber jeweils unter der Gesamthärte. Die pH-Werte von 7,2 bis 7,4 belegen neutrale bis leicht alkalische Eigenschaften. Die Wässer sind teilweise sauerstoffuntersättigt. Bei Sulfatgehalten von 80 bis 490 mg/l liegt die Gesamtmineralisation zwischen 550 und 1180 mg/l mit Gesamthärten von 20 bis 44 °dH (hart bis sehr hart). Die Karbonathärten sind mit 10 bis 18 °dH deutlich geringer, was angesichts der erhöhten Sulfatwerte auch zu erwarten ist. Bei den tieferen Brunnenwässern werden meist reduzierende Sauerstoffverhältnisse vorgefunden. Insgesamt weisen die Wässer mit Calciumkarbonat-Sättigungsindices von -0,7 bis -0,2 eine nahezu durchgehende Karbonatpufferung auf. Grenzwertüberschreitungen nach der TRINKWV (2001) wurden nur in einem Einzelfall bei Mangan beobachtet.

Bezogen auf alle Keuperwässer der Region wurden hier die mit 0,3 bis 2,3 mg/l im Trend höchsten Strontiumwerte gemessen. Die Arsenkonzentrationen sind mit 0,2 bis 3,7 µg/l ebenfalls überdurchschnittlich hoch. In allen untersuchten Wässern sind weiterhin folgende Spurenelemente mit Gehalten größer 1 µg/l nachgewiesen (Medianangabe): Barium (69 µg/l), Bor (33 µg/l), Lithium (20 µg/l), Zink (1,2 µg/l), Kupfer (1,1 µg/l) und Rubidium (1 µg/l). Im Gesamtvergleich überdurchschnittliche Mediangehalte erreichen noch Uran (1,8 µg/l) und Vanadium (2,8 µg/l), die zusammen mit Arsen bis auf eine Ausnahme in allen Wässern nachgewiesen wurden.

4.3.5.3 Sandsteinkeuper

Für die hydrogeochemische Charakterisierung der Wässer aus dem Sandsteinkeuper stehen insgesamt 245 Einzelanalysen von 240 Entnahmestellen (116 Brunnen, 124 Quellen) zur Verfügung, die sich wie in Abb. 4-12 dargestellt auf die Region und Nachbargebiete verteilen. In dem vielschichtigen Leiterkomplex (Kapitel 3-2) erschließen die Brunnen und Quellen sehr unterschiedlich mineralisierte Grundwässer. In einer groben Untergliederung werden Wässer von silikatischem bis karbonatischem Charakter in einer Gruppe zusammengefasst und statistisch ausgewertet, weitere Differenzierungen innerhalb dieser Gruppe werden im Text behandelt. Austauschwässer und Mineralwässer werden gesondert betrachtet.

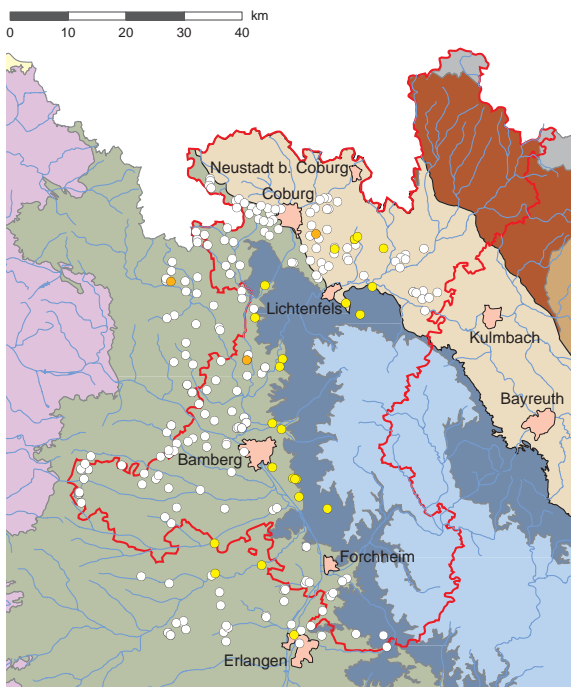


Abb. 4-12: Lage der Entnahmestellen im Sandsteinkeuper; Silikatisch-karbonatische Wässer (weiß), Austauschwässer (gelb) und Mineralwässer (orange).

Silikatisch bis karbonatische Wässer

Innerhalb dieser naturgemäß vielschichtigen Gruppe werden mehr oder weniger unterschiedliche Grundwassertypen zusammengefasst. Die generelle hydrogeochemische Entwicklung dieser Grundwässer spiegelt das komplexe Zusammenwirken Grundwasser leitender (in der Regel Sandsteine) und gering leitender Bereiche (in der Regel Tonsteine) in einem zum Teil deutlich differenzierten

Stockwerksbau wider. Eine besondere Rolle spielen dabei karbonatische (meist dolomitische), seltener Gips führende Gesteine oder Gemengteile, die in unterschiedlichem Maß am Aufbau des Grundwasserleiterkomplexes beteiligt sind. Die mehr tonig-mergelige Beckenfazies im Norden und die vorwiegend sandige Randfazies im Süden sowie der unscharfe vermutlich sehr breite zentrale Verzahnungsbereich dazwischen sorgen zudem für regionale Trends in der Grundwasserbeschaffenheit (Abb. 4-13). Aufgrund der unterschiedlichen Mischwassertypen wird häufig eine breite Streuung der Konzentrationen einzelner Inhaltsstoffe vorgefunden.

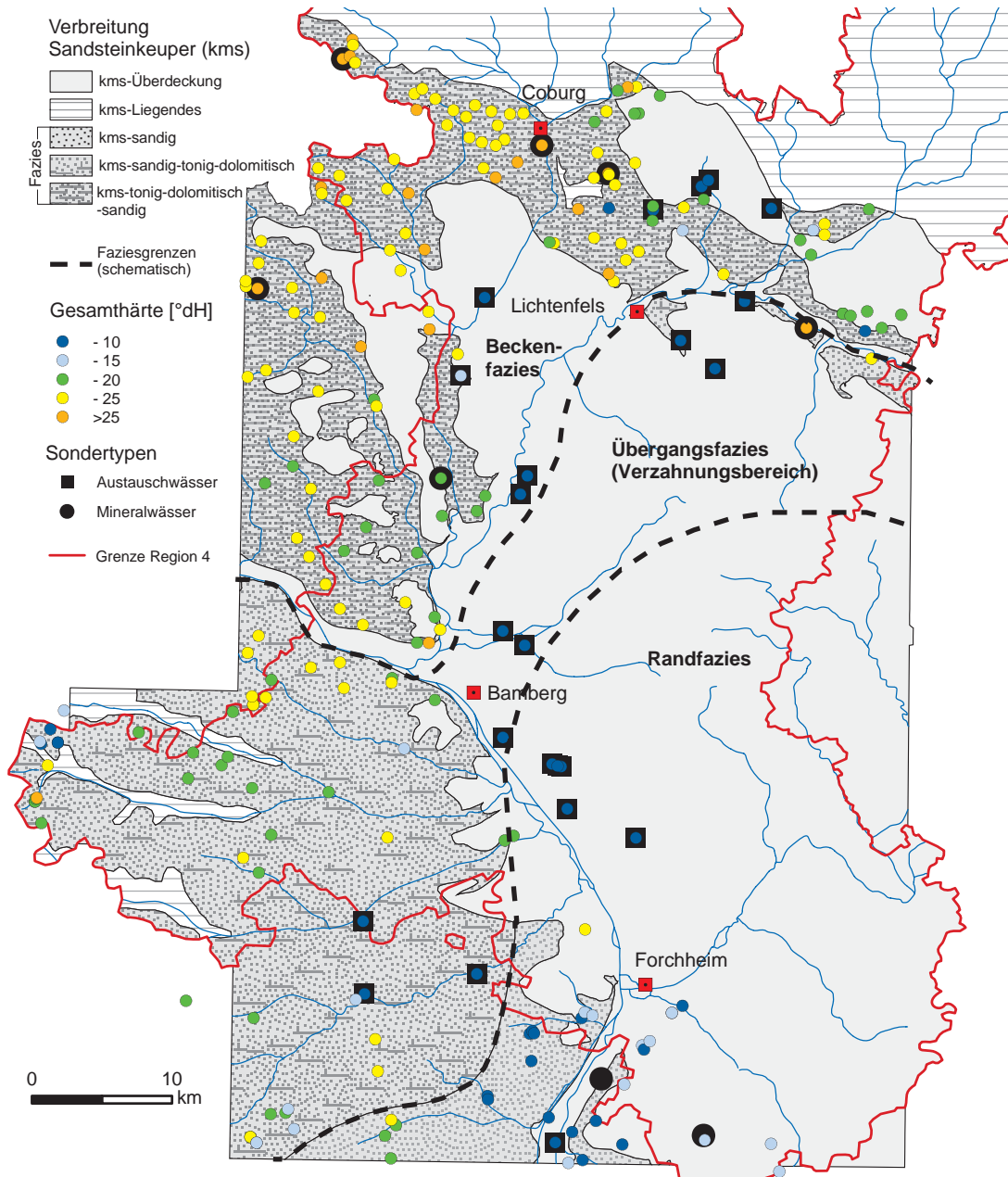


Abb. 4-13: Schematische Verbreitung der Fazies im Sandsteinkeuper mit Darstellung der Gesamthärte der untersuchten Grundwässer des silikatisch-karbonatischen Typs sowie der Mineral- und Austauschwässer.

Wesentliche Hauptbestandteile der häufigsten Grundwässer dieser Gruppe sind Calcium, Magnesium, Hydrogenkarbonat und Sulfat (Abb. 4-15). Der vergleichsweise hohe Anteil an Magnesiumionen (Median bei 45 meq-%) hängt offensichtlich mit der Lösung dolomitischer Gesteine bzw. Gemengeteile zusammen. Natrium, Nitrat und Chlorid überschreiten häufig die Schwelle zu den Hauptbestandteilen. Kalium und Silicium sind in der Regel Nebenelemente. Wie aus der Abb. 4-14 ersichtlich, handelt es sich nach FURTAK & LANGGUTH (1967) in der Mehrzahl um normal erdalkalische, vorwiegend hydrogenkarbonatische Süßwässer (Tab. 4-1: kms 1). Daneben existieren auch Entwicklungen, die insbesondere durch etwas höhere Alkali- und/oder Sulfatgehalte auffallen und dementsprechend anders klassifiziert werden können. Eine Sonderentwicklung stellen hierbei tiefere Keupergrundwässer (Tab. 4-1: kms 5) östlich der Regnitz und südlich der Wiesent dar, die als erdalkalische, überwiegend sulfatische und/oder chloridische Wässer mit höherem Alkaligehalt einzustufen sind. HEINRICHS & BAUER (1999) vermuten hier einen Zustrom aufsteigender Tiefenwässer im Umfeld von Störungszonen. Weiterhin fallen geringer mineralisierte Grundwässer aus dem allgemeinen Schema. Diese sind entweder an die sandige Randfazies im Süden gebunden oder an oberflächennahe Grundwasservorkommen mit vorwiegend silikatisch geprägtem Einzugsgebiet (Tab. 4-1: kms 3 + kms 4). Zuletzt treten im tieferen Keuper der Becken- und Übergangsfazies Mischwässer auf, bei denen eine gewisse Beimischung von Austauschwässern angenommen werden kann (Tab. 4-1: kms 2). Insgesamt können bis zu 5 Typen unterschieden werden. Tab. 4-1 verschafft einen Überblick über wichtige hydrogeochemische Merkmale, mögliche Ursachen und regionale Bezüge einzelner Typen.

Die Gesamtmineralisation aller Wässer streut naturgemäß sehr breit und reicht von 60 mg/l bei weicheren Quellwässern (Gesamthärte 2–10 °dH) bis zu maximal 840 mg/l bei sehr harten Wässern (Gesamthärte bis 30 °dH), die auch eine deutlich anthropogene Komponente (Nitrat > 30 mg/l) aufweisen. Die pH-Werte streuen ebenso sehr stark und reichen von leicht sauer (5,2) bis hin zu leicht alkalisch (7,8). Etwa 80% der Wässer liegen mit pH-Werten von 7,2–7,5 allerdings im neutralen bis leicht alkalischen Bereich. Infolge der unterschiedlichen Wassertypen wird beim Calciumkarbonat-Sättigungsindex mit Werten zwischen -4,9 und +0,2 eine hohe Bandbreite vorgefunden. Entsprechend der sehr unterschiedlichen Tiefenlagen und Mischungsverhältnisse ist eine sehr unterschiedliche Sauerstoffsättigung zu beobachten. Sie liegt für 80% aller Wässer zwischen 16% und 88%. In einigen Fällen führt sie zu Grenzwertüberschreitungen nach der TRINKWV (2001) für Mangan und Eisen.

Hinsichtlich der Spurenstoffe weisen die Wässer des Sandsteinkeuper bei einer Reihe von Elementen überdurchschnittlich hohe Konzentrationen auf. Die Erdalkalien Strontium und Barium erreichen Medianwerte von 359 (Sr) und 389 (Ba) µg/l (80% aller Werte liegen zwischen 90 und 1000 µg/l) und sind damit vorherrschend. Ein klarer Trend höherer Bariumkonzentrationen in Richtung Beckenfazies ist offensichtlich. Sie treten vorwiegend in Grundwässern des dolomitischen Mittleren Burgsandstein auf. Die Untersuchungen der Bariumkonzentrationen in Bachsedimenten (FAUTH et al. 1985) sowie in Gesteinen (LINHARDT & ZABROSEK 2005) erbrachten für das oberfränkische Sandsteinkeupergebiet gleichfalls deutlich erhöhte geogen bedingte Hintergrundwerte. Die höheren Strontiumkonzentrationen wurden hingegen sowohl in der Becken- bzw. Übergangs- und wahrscheinlich unter Beimischung von Tiefenwässern auch in der Randfazies (siehe Tab. 4-1: kms 5) angetroffen. Sehr hohe Strontiumwerte (3–10 mg/l), die von aufsteigenden Tiefenwässern im Bereich von Bruchzonen verursacht sein könnten oder von punktuellen anthropogenen Einträgen, wurden vereinzelt im Coburger Land festgestellt. Lokal problematisch sind die vorwiegend geogen bedingten Arsengehalte (z.B. in HEINRICHS 1996). Sie erreichen im Median Konzentrationen von 1,1 µg/l. Mit bis zu 35 µg/l sind insbesondere im tieferen Keuper der sandigen Randfazies sehr hohe Gehalte gemessen worden. In der Übergangs- und Beckenfazies treten im Vergleich zu anderen Grundwasserleitern der Region gleichfalls erhöhte Arsenwerte auf (bis zu 8 µg/l). Weitere Spurenelemente mit Medianwerten über 10 µg/l sind Bor und Lithium und über 1 µg/l in der Reihen-

folge abfallender Konzentrationen Uran, Zink, Vanadium, Rubidium und Kupfer. Für Uran (4,3 µg/l) und Vanadium (1,9 µg/l) wurden die höchsten Medianwerte im Untersuchungsgebiet festgestellt. Während Uran im Sandsteinkeuper durchgehend in höheren Konzentrationen vorkommt, zeigt sich bei Vanadium ein Trend höherer Konzentrationen in Richtung Beckenfazies.

Austauschwässer

An insgesamt 23 Tiefbrunnen wurden weiche Grundwässer (Gesamthärte < 10 °dH) angetroffen, die sich im Chemismus deutlich von den sonstigen Wässern des Sandsteinkeuper unterscheiden. Die charakteristischen Stoffinhalte, vor allem die hohen Natrium- und Hydrogencarbonatkonzentrationen sowie die vergleichsweise geringen Calciumgehalte, weisen auf Ionenaustausch hin. Allerdings handelt es sich durch unterschiedliche Beimischung von Grundwässern aus höheren Stockwerksbereichen und/oder höher mineralisierter Tiefenwässer selten um reine Austauschwässer. Dieser Effekt kommt z.B. durch höhere Chlorid- und Sulfatgehalte oder höhere Calcium- und/oder Magnesiumkonzentrationen zum Ausdruck. Die Austauschwässer treten mit wenigen Ausnahmen hauptsächlich im Bereich des überdeckten Sandsteinkeuper östlich der Regnitz bzw. südlich des Obermains auf (Abb. 4-13). Grundwässer mit ausgeprägtem Ionentausch sind vor allem im Bereich Zapfendorf bis Hirschaid nachgewiesen.

Die Hauptbestandteile sind meist Natrium mit Gehalten von etwa 40 bis 200 mg/l und Hydrogencarbonat mit etwa 180 bis 400 mg/l (Abb. 4-15). In Abhängigkeit der Ionenaustauschintensität und/oder der Zufuhr jüngerer Grundwässer erreichen die Calciumgehalte Werte zwischen 1 und 38 mg/l. Calcium kann somit sowohl Neben- als auch Hauptbestandteil sein. Mit wenigen Ausnahmen (Zustrom mineralreicher Tiefenwässer) sind die Anionen Chlorid (Medianwert 12 mg/l) und Sulfat (Medianwert 37 mg/l) als Hauptbestandteile vorhanden. Nach FURTAK UND LANGGUTH (1967) haben die Grundwässer erdalkalischen bis alkalischen, überwiegend hydrogencarbonatischen, in Einzelfällen auch sulfatisch-chloridischen Charakter (Abb. 4-14).

Die Gesamtmineralisation liegt etwa zwischen 400 und 750 mg/l (in Einzelfällen auch darüber) bei Gesamthärten von 0,5–9 °dH. Die pH-Werte sind mit 7,3–9,2 als schwach alkalisch bis alkalisch einzustufen. Die Spannweite der Sauerstoffsättigung reicht von 1–24% und belegt die deutlich defizitären Verhältnisse. Vereinzelt werden für Mangan die Grenzwerte der TRINKWV (2001) überschritten.

Bei den Spurenelementen Bor (168 µg/l), Lithium (105 µg/l), Molybdän (0,8 µg/l) und Rubidium (1,6 µg/l) wurden die in der Region höchsten Medianwerte nachgewiesen. Des Weiteren erreichen die Medianwerte für Barium und Strontium Konzentrationen über 10 µg/l sowie für Zink und Arsen über 1 µg/l.

Tab. 4-1: Mögliche Typen der silikatischen bis karbonatischen Sandsteinkeuperwässer

Typ	Anzahl Objekte/Analysen	Hydrochemische Merkmale Minimum – Maximum (Median)	Mögliche Ursachen, Regionalisierung
kms 1	174/179	GMin [mg/l]: 340 – 840 (600) GH [°d]: 12 – 30 (21) KH [°d]: 7 – 24 (17) pH: 6,9 – 7,9 (7,3) Arsen [µg/l]: 0,2 – 7,8 (1,6) Uran [µg/l]: <NG – 42,3 (4,3) GH > KH	Die unterschiedliche Präsenz von Härtebildnern sorgt bei diesem Typ allgemein für eine breite Konzentrationsstreuung wesentlicher Hauptinhaltsstoffe. Über die Hälfte der Analysen zeigt eine anthropogene Grundlast, etwa 30% bereits eine höhere Belastung (Nitrat > 30 mg/l), was ebenso zu einer Differenzierung führt. Ein Trend in der Zunahme der Gesamthärte von Süd nach Nord ist offensichtlich und hauptsächlich durch die Faziesausbildung begründet (Becken-, Übergangs- und Randfazies, vgl. Abb. 4-13). Ebenso auffällig ist das Vorkommen höherer Arsenkonzentrationen (> 2µg/l) nördlich des Mains bzw. westlich des Obermains (Beckenfazies) sowie die in der Region im Median höchsten Urangelhalte.
kms 2	12/12	GMin [mg/l]: 490 – 760 (640) GH [°d]: 14 – 24 (19) KH [°d]: 16 – 25 (20) pH: 7,2 – 7,5 (7,3) Arsen [µg/l]: 0,6 – 3,4 (1,6) GH < KH	Die vornehmliche Erschließung tieferer, mittelharter bis harter Keuperwässer kommt in höheren Natriumkonzentrationen (20 – 50 mg/l) zum Ausdruck und deutet auf schwache Austauschvorgänge hin; ein weiterer Anzeiger sind die geringfügig höheren Karbonat- gegenüber Gesamthärten. Hierbei dürfte es sich um einen Mischwassertyp aus normalen Keuperwässern und in geringeren Anteilen zuströmenden tieferen Austauschwässern handeln. Der Effekt des Stockwerkbaus wird hier angedeutet. Diese Wässer kommen sowohl in der Becken- als auch Übergangsfazies (vgl. Abb. 4-13) nördlich der Aurach vor. Die maximalen Arsenkonzentrationen (1,9 – 3,5 µg/l) wurden im Dreieck Stegaurach, Bamberg und Bischoberg gemessen.
kms 3	9/10	GMin [mg/l]: 60 – 315 (150) GH [°d]: 2 – 10 (4) KH [°d]: 1 – 7 (2) pH: 5,2 – 7,3 (6,1) Arsen [µg/l]: 0,2 – 1,3 (0,5)	Es handelt sich ausschließlich um geringer mineralisierte Quellwässer. Es werden oberflächennahe, häufig hangende Grundwasserkörper im saisonalen Gang entwässert. Unter Voraussetzung sandiger, karbonatarmer bzw. -freier Einzugsgebiete kann dieser Grundwassertyp im gesamten Betrachtungsraum auftreten, vorzugsweise im sandigen Blasensandstein i. w. S oder Oberen Burgsandstein. Es sind i. d. R. schwach gepufferte, weiche Wässer mit leicht saueren Eigenschaften. Sie sind daher deutlich von anderen Typen abgrenzbar. Die etwas erhöhten Siliziumanteile deuten wie beim Typ kms 4 auf den silikatischen Charakter hin.
kms 4	5/5	GMin [mg/l]: 170 – 370 (260) GH [°d]: 5 – 10 (7) KH [°d]: 5 – 11 (8) pH: 6,8 – 7,2 (7) Arsen [µg/l]: 0,7 – 35,1 (13,6)	Geringer mineralisierte Wässer aus dem tieferen Keuper sind an eine vorwiegend silikatische Ausbildung der Gesteine im Einzugsgebiet gebunden. Karbonatführende Schichten treten in den Hintergrund oder fehlen ganz. Deshalb kommen diese Wässer nur in der sandigen Randfazies und hier in der SW anschließenden Nachbarregion 7 vor (vgl. Abb. 4-13). Streng genommen handelt es sich auch hier um Mischwässer, deren Einzelkomponenten sich aber nicht wesentlich in ihrer Beschaffenheit unterscheiden. Es sind vorzugsweise weiche Wässer mit neutralem bis leicht saurem Charakter. Mit Arsengehalten bis zu 35 µg/l werden hier die höchsten Konzentrationen im gesamten Untersuchungsraum erreicht.
kms 5	7/7	GMin [mg/l]: 370 – 530 (480) GH [°d]: 8 – 14 (12) KH [°d]: 8 – 14 (11) pH: 7,3 – 7,8 (7,6) K+ [mg/l]: 9,7 – 14,4 (12,5) Cl- [mg/l]: 50 – 140 (104) Arsen [µg/l]: 2,1 – 23,8 (13,3) Lithium [µg/l]: 121– 171 (142)	Mit diesem Typ werden tiefere Wässer vom überdeckten Sandsteinkeuper erschlossen. Nach HEINRICHS et al. (1999) handelt es sich bei diesen Mischwässern um eine Sonderentwicklung im Keuper. So werden normale Keupergrundwässer der Randfazies durch Zustrom von Tiefenwässern im Bereich von Störungszonen und Zusickerung aus der Feuerletten- bzw. Rhätoliasüberdeckung modifiziert. Ionenaustausch ist ebenfalls möglich. Die Beimischung von Tiefenwässern kommt z.B. in der erhöhten Chloridkonzentration zum Ausdruck. Weiterhin auffällig sind die überdurchschnittlich hohen Kaliumwerte. Die Arsen- und Lithiumgehalte sind ebenfalls deutlich erhöht. Diese Wässer kommen hauptsächlich südlich der Wiesent und östlich der Regnitz vor.

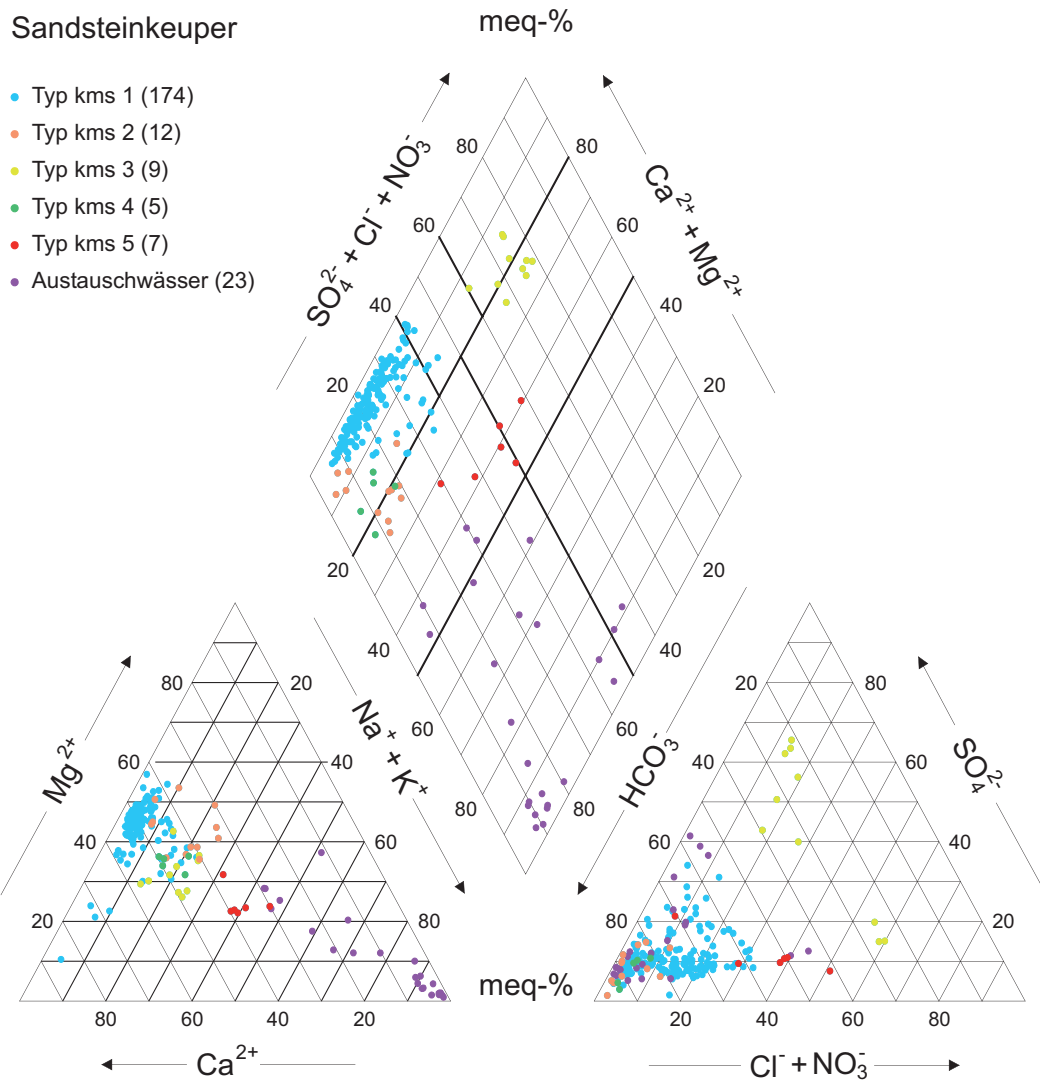


Abb. 4-14: Chemische Zusammensetzung der Grundwassertypen (kms1 – kms 5) und der Austauschwässer des Sandsteinkeuper im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAk & LANGGUTH (1967) (Anzahl der Probenahmestellen jeweils in Klammern).

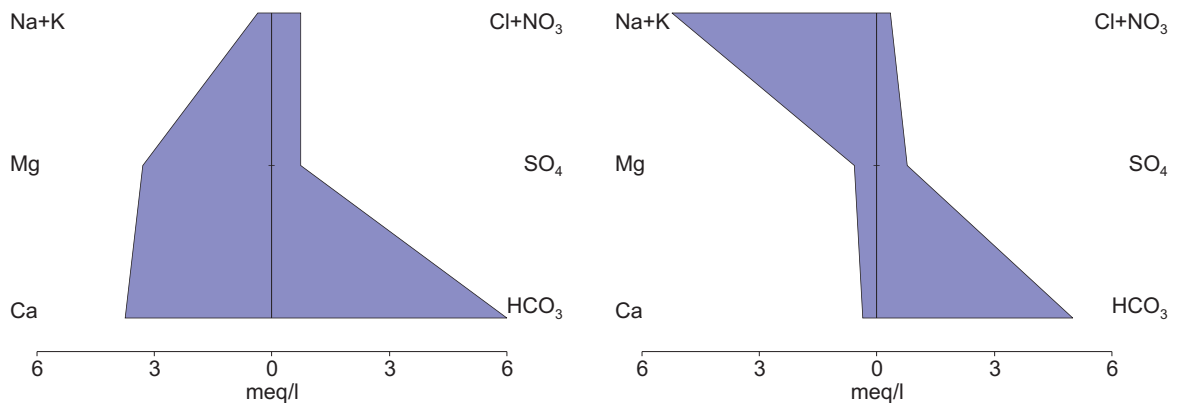


Abb. 4-15: Chemische Zusammensetzung der silikatisch-karbonatischen Grundwässer (links) und der Austauschwässer (rechts) des Sandsteinkeuper im Stiff-Diagramm (Probenahmestellen: silikatisch-karbonatische Grundwässer 217; Austauschwässer 23).

Mineralwässer

Zu höher mineralisierten Grundwässern im Sandsteinkeuper mit Lösungsinhalten > 1 g/l liegen nur wenige Analysen vor, so dass hier nur eine Übersicht gegeben wird. Hinweise zur Entstehung und zum Inhalt solcher Wässer liefern u. a. BIRZER (1974), UDLUFT (1979), GUDDEN (1981) und DÜMMER (1982). Prinzipiell handelt es sich um mineralreiche sauerstoff- und nitratarme, sulfatische und/oder chloridische, meist allochthone Tiefenwässer, die sich auf natürlichem Wege oder infolge einer technischen Erschließung mit geringer mineralisierten Wässern im Leiterkomplex des Sandsteinkeuper vermischen können. Das im Tiefbrunnen Bammersdorf bei Forchheim in 112 bis 160 m Teufe im Sandsteinkeuper erschlossene Brackwasser weist z.B. eine Gesamtmineralisation von 4,8 g/l auf und entstammt nach UDLUFT (1979) der oberen Zechsteinwandersole aus dem hessisch-thüringischen Werragebiet. Mineralwässer mit Chloridgehalten > 60 mg/l wurden in einigen, mittlerweile aufgelassenen Tiefbrunnen zwischen Hallstadt und Breitengüßbach erschlossen, ebenso im Schwabachtal E Erlangen. Bei zwei Forschungsbohrungen (FB) sind minder ergiebige, höher mineralisierte Grundwasservorkommen im tieferen überdeckten Coburger Sandstein und Blasensandstein der Beckenfazies angetroffen worden. Die hangenden Heldburgmergel wirken hier als hydraulische Barriere und behindern die Zufuhr jüngerer mineralärmerer Grundwässer. In den wesentlichen Inhaltsstoffen unterscheiden sich die Wässer der beiden Bohrungen erheblich (siehe Tab. 4-2).

Tab. 4-2: Mineralreiche Grundwässer aus dem Coburger Sandstein und Blasensandstein (kmBL + C), untergeordnet Lehrbergschichten (kmL), in den Forschungsbohrungen Marbach und Daschendorfer Forst

Parameter	Einheit	FB Marbach	FB Daschend. Forst
Teufe PN	m	75 -153	122 – 190
Teufe PN	m NN	255 – 177	175 – 107
Stratigraphie		kmBL + C (kmL)	kmBL + C (kmL)
CO ₂ frei	mg/l	49	174
Natrium	mg/l	286	3652
Kalium	mg/l	18	52
Calcium	mg/l	279	257
Magnesium	mg/l	164	1799
Sulfat	mg/l	1563	13188
Chlorid	mg/l	164	1713
GMin	g/l	3	21
PN: Probennahme			

Im Grundwasser der FB Marbach dominieren Natrium und Calcium sowie Sulfat. Auffällig ist der erhöhte Magnesiumgehalt. Für die Mineralisation dürfte u. a. der Zustrom überwiegend mineralreicher Wässer aus dem Gips führenden Unteren Burgsandstein (Heldburgfazies) verantwortlich sein. Er erfolgt primär durch Leakage, was generell geringe Austauschraten im Leiter bedingt. Als weitere Sulfat- und/oder Magnesiumquellen kommen aufgrund ihrer Position vor allem der Gipskeuper und hinsichtlich des Sulfats auch der Blasensandstein selbst in Frage. Ionenaustausch und Beimischung allochthoner Solen komplettieren den Stoffhaushalt.

Mit der FB Daschendorfer Forst wurde ein sehr salzhaltiges CO₂-reiches Tiefenwasser erschlossen. Natrium, Magnesium und Sulfat dominieren (Tab. 4-2). Es dürfte sich vorwiegend um ein allochthones Grundwasser handeln, das jedoch nicht ausschließlich der Zechsteinsole zugeordnet werden muss. Die hohen Sulfat- und Magnesiumgehalte deuten auch auf den Einfluss jüngerer Schichtglieder hin. UDLUFT (1979) führt solche magnesiumsulfatreichen Wässer auf Ionenaustausch und Dolomittlösung im Muschelkalk und Keuper zurück. Grundwasseranalysen aus einer älteren Erkundungsbohrung (ca. 2 km NE FB Daschendorfer Forst) im Umfeld von Mürsbach (aus GUDDEN 1981) belegen diesen Einfluss am Beispiel der signifikanten Zunahme des Sulfatgehaltes (um ca. 3 g/l) im Rötquarzitwasser gegenüber der erbohrten Zechsteinsole. Aufgrund des deutlichen Anstiegs der Salzkonzentration oberhalb des Mittleren und Unteren Buntsandstein ist auch der Einfluss lokaler Sulfat- und Steinsalzlager im Mittleren Muschelkalk und Oberen Buntsandstein zu diskutieren. BÜTTNER & SCHWARZMEIER (1997) berichten z.B. im Raum Schweinfurt-Eltmann über Salzvorkommen im Mittleren Muschelkalk. Die außergewöhnlich hohen Gehalte an freiem CO₂ stammen nach GUDDEN (1981) aus einer CO₂-Lagerstätte im Zechstein, wobei als Trägergestein ein fossiles Bryozoenriff fungiert. Im Zechsteinwasser wurden Konzentrationen von bis zu 64 g/l angetroffen, mit abnehmender Teufe sinken die Konzentrationen jedoch sehr schnell auf wenige Gramm pro Liter (z.B. 4 g/l im Rötquarzit, 2 g/l im Unteren Keuper), im Sandsteinkeuper sind im Allgemeinen Werte wie in der FB bereits deutlich unter 1 g/l zu erwarten (Tab. 4-2).

4.3.5.4 Rhätolias

Der silikatisch bis karbonatische Aufbau sowie ein in weiten Teilen ausgeprägter Stockwerksbau bestimmen maßgeblich die Qualität der erschlossenen Grundwässer im Rhätolias. Für den Leiterkomplex liegen insgesamt 62 Grundwasseranalysen aus 12 Brunnen und 50 Quellen vor, die aufgrund ihrer Herkunft und Inhalte nachfolgend in die Gruppen silikatische und karbonatisch-sulfatische Wässer sowie Austauschwässer gegliedert werden. Zur Lage der Entnahmestellen siehe Abbildung 4-16.

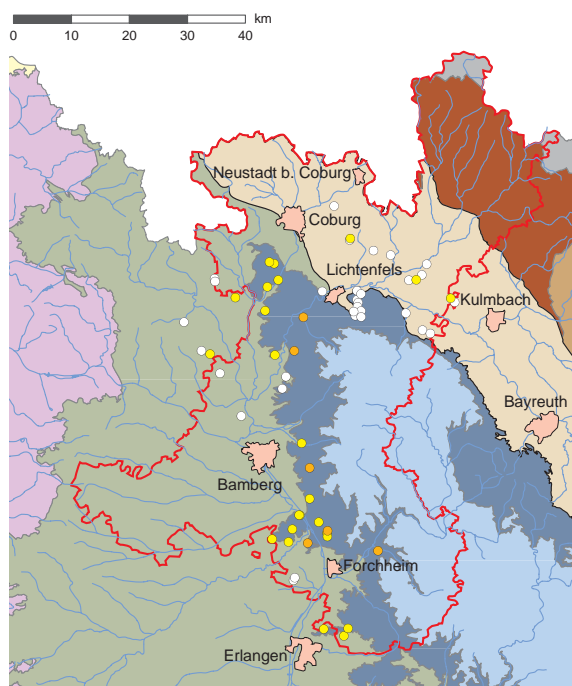


Abb. 4-16: Lage der Entnahmestellen der silikatischen (weiß) und karbonatisch-sulfatischen (gelb) Grundwässer sowie der Austauschwässer (orange) des Rhätolias.

Silikatische Wässer

Grundwässer mit silikatischer Ausprägung werden vornehmlich im Bereich der Rhätsandsteine erschlossen. Zumeist handelt es sich um kleinräumige oberflächennahe Vorkommen, deren Wasser in der Regel eine geringe Mineralisierung aufzeigen. Deutliche Abweichungen treten bei Anwesenheit karbonatischer Lagen in der Grundwasserüberdeckung oder durch anthropogene Stoffeinträge auf. Als Hauptbestandteile überwiegen bei den Kationen Calcium (6–58 mg/l) vor Magnesium (3–30 mg/l), bei den Anionen Sulfat (13–145 mg/l) und Hydrogenkarbonat (< NG–240 mg/l) (Abb. 4-18). Als mögliche Sulfatquelle ist neben anthropogenen Stoffeinträgen auch die Sulfidoxidation (z.B. in Liastonen) zu diskutieren. Erhöhte Chlorid-, Natrium- und Nitratgehalte sind vielfach anthropogen bedingt. Im Vierstoffdiagramm nach FURTAK & LANGGUTH (1967) zeigt sich aufgrund der unterschiedlichen Einflussfaktoren ein relativ uneinheitliches Bild (Abb. 4-17). Der Hauptanteil der Wässer gehört zur Gruppe der normal erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen bis überwiegend sulfatischen Wässer. Darüber hinaus treten auch Wässer auf, die bereits den erdalkalischen Wässern mit höherem Alkaliegehalt zugeordnet werden können.

Die Gesamtmineralisation liegt zwischen 65 und 336 mg/l und kann in Abhängigkeit geogener (Karbonate) und anthropogener Einflüsse bisweilen auch Werte bis 500 mg/l erreichen. Die gleichen Abhängigkeiten zeigen sich bei den pH-Werten, die sich in einem entsprechend breiten Intervall von 4,4 bis 7,7 bewegen. Im Trend liegen sie meist unter 7 und belegen den neutralen bis leicht sauren Charakter der Wässer. Gemäß der Verteilung der Hauptinhaltsstoffe werden mit Gesamthärten von 1,8–13,9 °dH sehr weiche bis mittelharte Grundwässer angetroffen. Etwa 90% sind deutlich karbonatuntersättigt (Sättigungsindex Calciumkarbonat: -5,5 bis -1,1). Die meisten Wässer haben ein geringes Sauerstoffdefizit oder sind übersättigt. Etwa 25% aller Sauerstoffmessungen belegen auch teilreduzierte und in Einzelfällen nahezu sauerstofffreie Verhältnisse im Grundwasser, was vereinzelt zu Grenzwertüberschreitungen nach der TRINKWV (2001) bei Eisen und Mangan führt.

Bei den Spurenelementen dominieren mit Gehalten im Median von über 10 µg/l in der Reihenfolge abfallender Konzentration Strontium, Barium und Lithium, mit Werten über 1 µg/l die Elemente Nickel, Aluminium, Zink und Rubidium. Im regionalen Vergleich wurden in diesen Wässern für Nickel (4,6 µg/l), Cer (0,6 µg/l) und Yttrium (0,1 µg/l) die höchsten Medianwerte angetroffen, wobei Nickel und Yttrium in jeweils zwei Analysen nicht nachgewiesen wurden.

Karbonatisch-sulfatische Wässer

Grundwässer mit karbonatisch-sulfatischer Prägung werden häufig in den Liassandsteinen und vereinzelt im Rhätsandstein angetroffen. In Vertikalbrunnen werden durch Erschließung beider Stockwerke meist Mischwässer erschlossen. Verantwortlich für die karbonatische Prägung sind in jedem Falle die karbonatischen Lagen (karbonatische Sandsteine, Mergel- und Kalksteine) im Unteren Lias. Der sulfatische Charakter hängt vermutlich auch mit einer geogen bedingten Sulfidoxidation im Lias zusammen.

Hauptbestandteile bei den Kationen sind Calcium (53–135 mg/l) und Magnesium (10–74 mg/l) und bei den Anionen Hydrogenkarbonat (104–403 mg/l) und Sulfat (40–199 mg/l) (Abb. 4-18). Bei 75% aller Analysen wurden Chloridgehalte zwischen 19 und 46 mg/l festgestellt. Nur wenige Quellwässer, vorzugsweise jene mit waldreichen Einzugsgebieten, sowie alle Brunnenwässer zeigen Nitratgehalte unter 5 mg/l, ansonsten liegen sie zwischen 13 und 70 mg/l, im Einzelfall auch darüber. Insbesondere an den Chlorid- und Nitratkonzentrationen spiegelt sich die deutliche anthropogene Belastung der Grundwässer wider. Nach FURTAK & LANGGUTH (1967) erfolgt eine Zuordnung zu den normal erdalkalischen Wässern entweder mit überwiegend hydrogenkarbonatischem oder hydrogenkarbonatisch-sulfatischem oder überwiegend sulfatischem Charakter (Abb. 4-17).

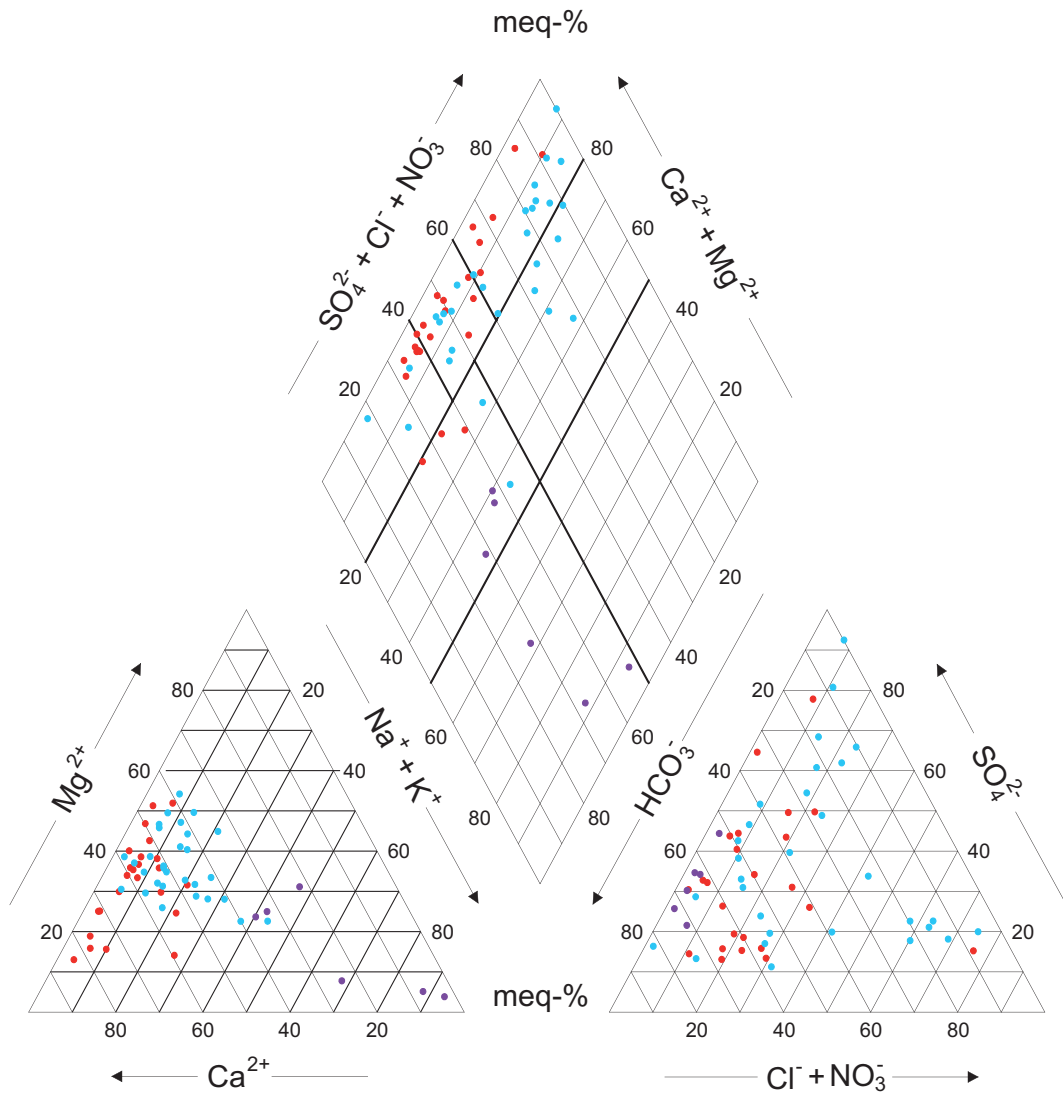


Abb. 4-17: Chemische Zusammensetzung der silikatischen (blau) und karbonatisch-sulfatischen (rot) Grundwässer sowie der Austauschwässer des Rhätolias im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (Probenahmestellen: silikatisch 32, karbonatisch-sulfatisch 24, Austauschwässer 6).

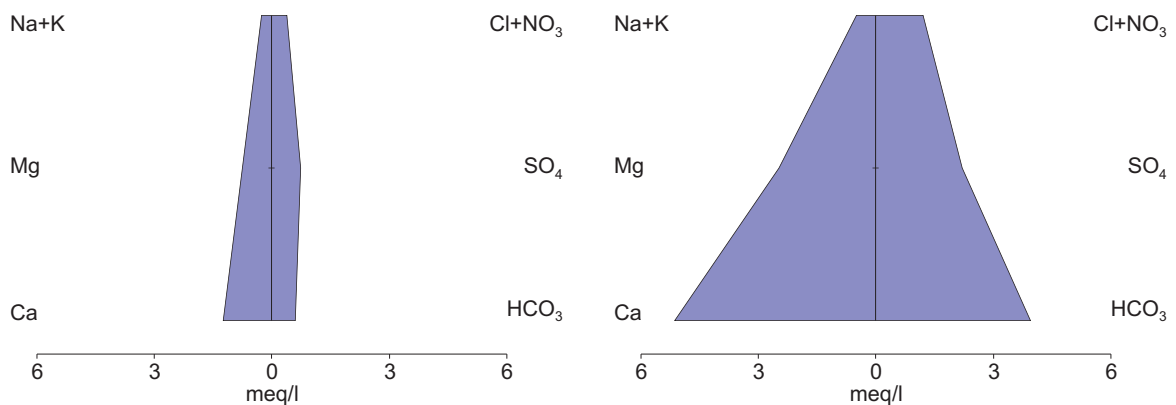


Abb. 4-18: Chemische Zusammensetzung der silikatischen (links) und karbonatisch-sulfatischen (rechts) Grundwässer des Rhätolias im Stiff-Diagramm (Probenahmestellen: silikatisch 32, karbonatisch-sulfatisch 24).

Die Gesamtmineralisation liegt zwischen 460 und 880 mg/l. Mit einer Spannweite von 6,4 bis 8,2 zeigen die pH-Werte ebenso eine gewisse Streuung, liegen aber meist im neutralen bis leicht alkalischen Bereich. Aufgrund der Erdalkaliendominanz werden ausschließlich mittelharte bis sehr harte Wässer angetroffen (17–32 °dH), die bei etwa 75% aller Fälle nur ein geringes Sättigungsdefizit (Sättigungsindex -0,7 bis +0,4) gegenüber Calciumkarbonat aufweisen. Bei etwa 50% der Analysen wurden Sauerstoffsättigungen zwischen 6 bis 80% festgestellt. Besonders deutliche Sauerstoffdefizite werden in tieferen Brunnenwässern beobachtet, was dort zu Überschreitungen nach der TRINKWV (2001) bei Eisen- (0,8 bis 1,8 mg/l) und vereinzelt auch Mangan (bis 0,09 mg/l) führt.

Bei den Spurenelementen dominiert Strontium mit Gehalten im Median von über 100 µg/l. Medianwerte über 10 µg/l erreichen in der Reihenfolge abfallender Konzentration Bor, Lithium und Barium, Werte über 1 µg/l die Elemente Zink und Rubidium. Die Borkonzentrationen sind gegenüber den silikatischen Wässern des Rhät deutlich erhöht.

Austauschwässer

Austauschwässer wurden mit einer Ausnahme ausschließlich im tieferen überdeckten Rhätolias angetroffen. Die Wässer entstammen dem Stockwerk der Rhätsandsteine. Diese werden je nach Beimischung der vorwiegend karbonatisch-sulfatischen Wässer aus hangenden Stockwerken (Lias) in unterschiedlichen Maßen modifiziert. Die hydrogeochemische Verschiedenheit der Stockwerkswässer und damit auch der Nachweis einer wirksamen Trennung wurden insbesondere in Tiefbrunnen bei Seigendorf und Eggolsheim nachgewiesen. Für die Charakterisierung liegen insgesamt 7 Analysen aus 6 Tiefbrunnen östlich der Linie Main–Regnitz und einer Quelle westlich der Regnitz vor (Abb. 4-16).

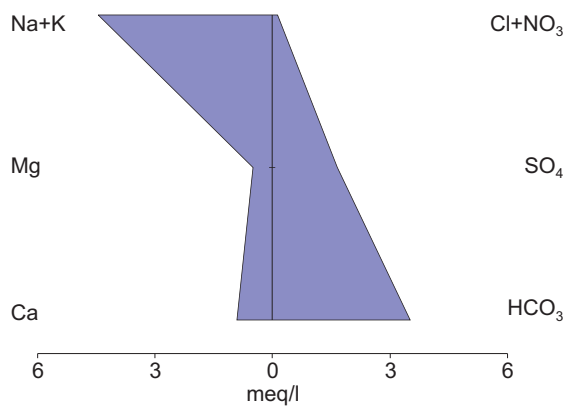


Abb. 4-19: Chemische Zusammensetzung der Austauschwässer des Rhätolias im Stiff-Diagramm (6 Probenahmestellen).

Als Hauptbestandteile sind bei den Kationen vor allem Natrium (41–120 mg/l) und bei den Anionen Hydrogenkarbonat (181–299 mg/l) vorherrschend (Abb. 4-19). Sulfat ist mit Gehalten zwischen 42 und 125 mg/l ebenfalls ein wichtiger Hauptbestandteil. Bei entsprechender Mischung oder weniger fortgeschrittenem Ionenaustausch gehören auch Calcium (0,2–47 mg/l) und Magnesium (< BG–19 mg/l) dazu. In der Regel handelt es sich gemäß der Klassifikation nach FURTAK & LANGGUTH (1967) um alkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische, vereinzelt auch um erdalkalische Wässer mit höherem Alkaliegehalt (Abb. 4-17).

Die Gesamtmineralisation streut zwischen 317 und 534 mg/l. Mit einer Spannweite von 7,0 bis 8,0 liegen die pH-Werte der von Alkalien dominierten Wässer nur im neutralen bis leicht basischen Bereich, was möglicherweise mit dem vermutlich aus der Sulfidoxidation stammenden Sulfat zusammenhängt. Dies hat offensichtlich auch defizitäre Auswirkungen auf die Calciumkarbonatsättigung, für die mit einer Ausnahme Werte zwischen -1 und -2,1 berechnet wurden. Aufgrund der vorherrschenden Alkalien werden sehr weiche bis weiche, selten auch mittelharte Wässer angetroffen (0,9–11 °dH). Typisch für die Austauschwässer sind die stets höheren Karbonathärten (8–14 °dH). Alle Analysen weisen mit 2 bis 64% auf deutlich bis mäßige Sauerstoffdefizite hin, was bei einigen Brunnenwässern zu Überschreitungen nach der TRINKWV (2001) bei Eisen (bis 1,3 mg/l) und vereinzelt auch Mangan (bis 0,06 mg/l) führt.

Bei den Spurenelementen zeigt sich ein gegenüber den karbonatisch-sulfatischen Wässern des Rhätolias vergleichbares Bild. Es dominiert Strontium mit Gehalten im Median von über 100 µg/l. In der Reihenfolge abfallender Konzentration treten mit Medianwerten von über 10 µg/l Bor, Lithium und Barium, mit Werten von über 1 µg/l die Elemente Zink und Rubidium auf. Die Borkonzentrationen sind in der Größenordnung mit denen der Sandsteinkeuper-Austauschwässer vergleichbar.

4.3.6 Lias

Aus dem Lias liegen insgesamt nur 9 Vollanalysen (5 davon mit Spurenanalytik) vor (Abb. 4-20). Deshalb wird im Folgenden auf eine eingehende statistische Betrachtung verzichtet. Alle Angaben zu Spureninhalten sind aufgrund der geringen Analysenanzahl als nicht gesichert zu sehen.

Hauptbestandteile der untersuchten Wässer sind infolge der karbonatischen Ausprägung der Gesteine Calcium mit einer Spannweite von 98 bis 170 mg/l und Hydrogenkarbonat mit einer Spannweite von 225 bis 395 mg/l. In geringeren Anteilen gehören noch Magnesium und Sulfat dazu. Höhere Sulfatwerte sind für den Lias nicht untypisch und sowohl auf geogene als auch anthropogene Ursachen zurückzuführen. Hierbei dürfte die Oxidation schichtgebundener Sulfidanreicherungen eine bedeutende Rolle spielen. In Abhängigkeit anthropogener Stoffeinträge überschreiten auch Natrium, Chlorid und vor allem Nitrat nicht selten die Schwelle zu den Hauptbestandteilen. Da im Einzugsgebiet vieler Lias-Quellen intensive Landwirtschaft betrieben wird, ist stellenweise mit einer hohen Nitratbelastung zu rechnen.

Die Gesamtmineralisation liegt etwa zwischen 500 und 1000 mg/l, wobei Werte im oberen Drittel der Spannweite hauptsächlich auf höhere anthropogene Stoffeinträge zurückzuführen sind. Entsprechend der vorherrschenden Hauptbestandteile werden mit 17 bis 32 °dH harte bis sehr harte Wässer angetroffen. Der pH-Wert von 6,9 bis 7,7 reicht vom leicht sauren bis in den leicht alkalischen Bereich und weist zusammen mit der Calciumkarbonatsättigung (Sättigungsindex von -0,66 bis 0,05) auf eine durchgehende Karbonatpufferung hin.

Bei den Spurenelementen kann in der Reihenfolge abnehmender Konzentrationen mit folgenden Konzentrationen gerechnet werden (in Klammern berechnete Mittelwerte aus 5 Analysen): Strontium (623 µg/l), Lithium (36,7 µg/l), Barium (11,9 µg/l), Zink (2,5 µg/l), Rubidium (1,3 µg/l) und Uran (1,2 µg/l).

4.3.7 Dogger

Für das Dogger-Grundwasserstockwerk liegen Analysen von 13 Brunnen- und 108 Quellwässern vor. Die Lage der Entnahmestellen ist in Abb. 4-20 dargestellt. Bei etwa 80% aller analysierten Wässer zeigt sich ein mehr oder weniger deutlicher Einfluss durch die Malmüberdeckung und/oder doggerbürtigen Karbonate.

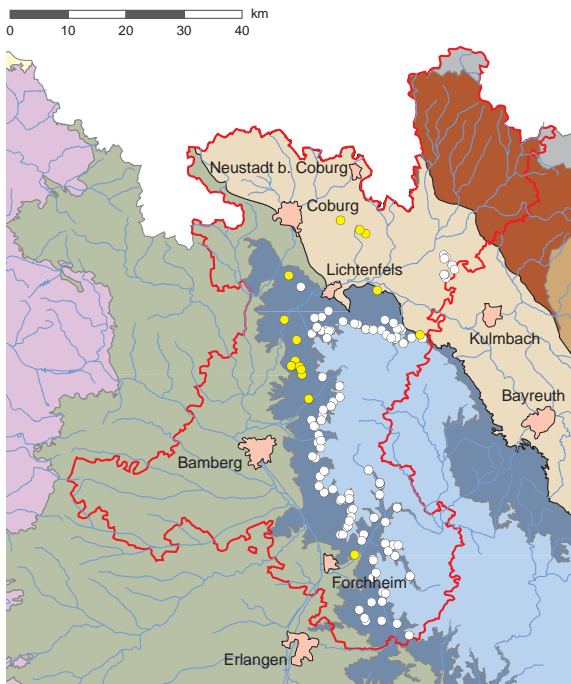


Abb. 4-20: Lage der Entnahmestellen der Grundwässer aus dem Dogger (weiß) und Lias (gelb).

Anteilig stellen Calcium mit Spannweiten von 42 bis 127 mg/l (90% aller Wässer) und Hydrogenkarbonat mit Spannweiten von 79 bis 394 mg/l (90% aller Wässer) die dominierenden Hauptbestandteile dar und unterstreichen damit den überwiegend karbonatischen Charakter der Wässer (Abb. 4-22). Weiterhin ist noch Sulfat zu nennen, das mit etwa 30 mg/l einen relativ hohen Medianwert erreicht. Im direkten Vergleich zu den Malmwässern nehmen die Sulfatgehalte im Stockwerk des Dogger tendenziell zu. Die Schwelle zu den Hauptbestandteilen überschreiten im Median auch Magnesium (6,8 mg/l) und Chlorid (6,4 mg/l). Bei etwa 50% der Wässer gehört Nitrat ebenso dazu. Allerdings erscheinen die durchschnittlichen Nitratwerte vor dem Hintergrund der zum Teil landwirtschaftlich intensiv genutzten Einzugsgebiete vergleichsweise gering. Höhere Nitratgehalte werden insbesondere im unbedeckten Dogger beobachtet. Bei der flächenhaften Grundwasserregeneration über das Malmgrundwasserstockwerk gehen die Nitratgehalte im Dogger offensichtlich zurück, was möglicherweise mit den einhergehenden höheren Verweilzeiten, Sauerstoffdefiziten und Verdünnungseffekten begründet werden kann. Im Sinne von FURTAK & LANGGUTH (1967) handelt es sich größtenteils um Wässer des normal erdalkalischen, überwiegend hydrogencarbonatischen Typs. Insbesondere geringer mineralisierte Dogger-Wässer weichen von diesem Typ ab und streuen je nach Stoffeintrag in einem relativ breiten Bereich der Gruppen normal erdalkalisch und erdalkalisch mit höherem Alkaligehalt (Abb. 4-21).

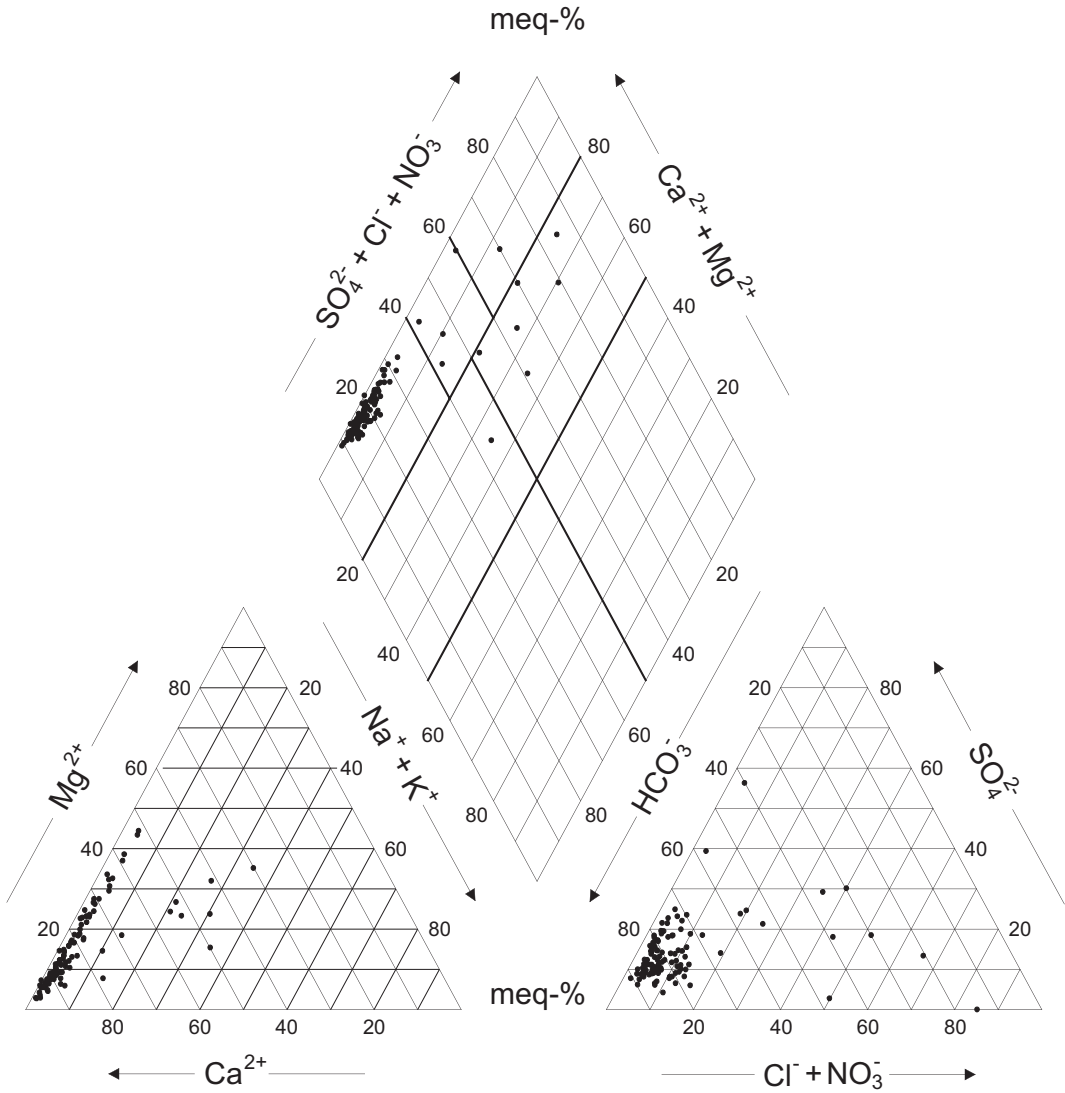


Abb. 4-21: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Dogger im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (121 Probenahmestellen).

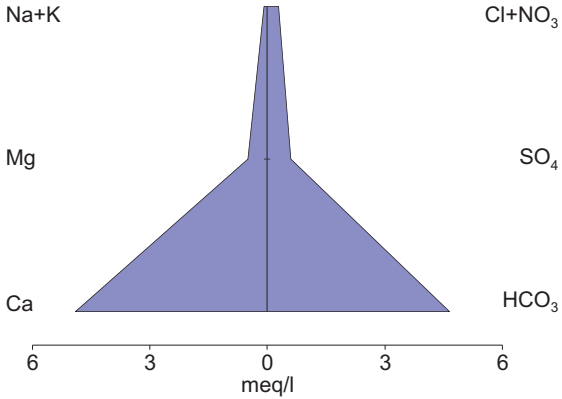


Abb. 4-22: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Dogger im Stiff-Diagramm (121 Probenahmestellen).

Aufgrund des gleichzeitigen Vorkommens geringer und durchschnittlich mineralisierter Grundwässer werden bei den im Folgenden beschriebenen Parametern teilweise größere Wertestrebereiten beobachtet. Geringer mineralisierte Grundwässer treten vor allem im Umfeld des unbedeckten Dogger auf. Die Gesamtmineralisation schwankt in einem weiten Bereich zwischen 23 und 605 mg/l, wobei der Median von 454 mg/l die vorherrschende Größenordnung widerspiegelt. Bei Gesamthärten von 1 bis 21 °dH und pH-Werten von 4,9 bis 8,2 werden sehr weiche bis harte, saure bis leicht alkalische Wässer angetroffen. Die saueren und weichen Wässer zeigen dabei mit Indexwerten zwischen -5,7 und -1,3 eine deutliche Untersättigung an Calciumkarbonat. Mehrheitlich werden aber aufgrund der karbonatischen Bindemittel und des Malmeinflusses mittelharte und neutrale Wässer mit geringen oder gar fehlenden Sättigungsdefiziten gegenüber Calciumkarbonat (Sättigungsindex -0,6 bis 0,5) vorgefunden. Geringere Sauerstoffsättigungen (4 bis 70%) zeigen vor allem die Brunnenwässer, mehrheitlich liegen sie jedoch über 80%. In wenigen Fällen wurden bei den Eisengehalten Grenzwertüberschreitungen nach der TRINKWV (2001) festgestellt.

Bei den Spurenstoffen dominiert mit einem Median von 110 µg/l Strontium. Elemente, die im Median noch 1 µg/l überschreiten sind Barium (7,2 µg/l) und Lithium (4,4 µg/l).

4.3.8 Malm

Für die hydrogeochemische Charakterisierung der Malmwässer stehen 7 Brunnen- und 179 Quellwässer zur Verfügung. Bei der Statistik wurden Wässer des Seichten von denen des Tiefen Karst unterschieden. Zur Lage der Entnahmestellen siehe Abbildung 4-23.

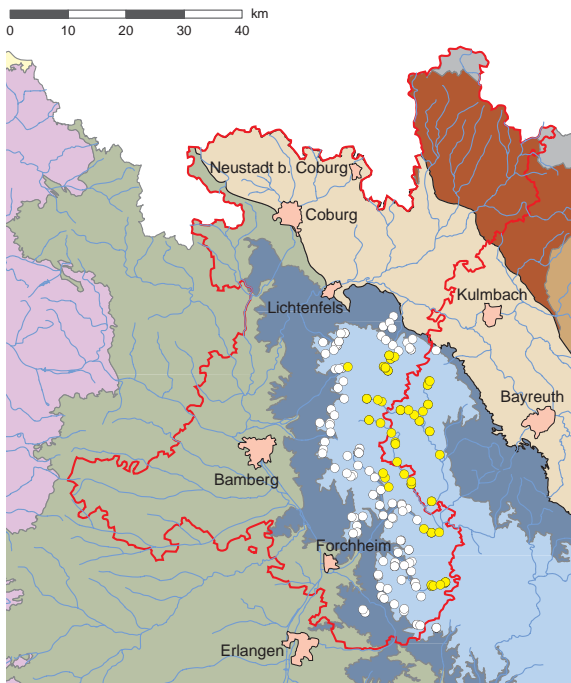


Abb. 4-23: Lage der Entnahmestellen der Grundwässer aus dem Seichten (weiß) und Tiefen (gelb) Malmkarst.

Für alle Wässer dominieren bei den Hauptinhaltsstoffen auf der Seite der Kationen Calcium mit Gehalten von 60 bis 142 mg/l, auf der Seite der Anionen Hydrogenkarbonat mit Gehalten von 126 bis 416 mg/l (Abb. 4-25). Ein für die Charakterisierung wichtiger Hauptbestandteil ist Magnesium, das je nach Einfluss dolomitischer Karbonate Gehalte von 1 bis 44 mg/l erreichen kann. Nach APEL & BÜTTNER (1995) werden die Magnesiumgehalte vor allem durch die dolomitisierte Massenkalkfazies beeinflusst. Eine weitere Ursache liegt vermutlich in den höheren Verweilzeiten der Grundwässer im Untergrund, bei denen sich einem dolomitischen Speichergestein entsprechende Lösungsgleichgewichte einstellen. So fällt insbesondere auf, dass sich die Ca/Mg-Verhältnisse vom Seichten zum Tiefen Karst von etwa 5:1 auf bis zu 2:1 meist deutlich verringern. Die Schwelle zu den Hauptbestandteilen überschreiten in der Regel noch Sulfat, Nitrat, Chlorid und in einigen Fällen auch Natrium. Aufgrund der lokal über Klüfte und Karstgerinne direkt eingetragenen, auf Wintersalzung und landwirtschaftliche Nutzung zurückzuführenden Stoffeinträge ist insbesondere bei den Nitrat-, Chlorid- und Natriumgehalten allerdings auch mit größeren Schwankungen zu rechnen. Alle untersuchten Wässer entsprechen nach FURTAK & LANGGUTH (1967) dem normal erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen Typ (Abb. 4-24). Davon abweichende Typisierungen sind nur bei starker anthropogener Überprägung zu erwarten. Die Haupt- und Nebenelementgehalte der Wässer des Tiefen Karst weisen allgemein geringere Schwankungen auf.

Die Spannweite (90% aller Fälle) der Gesamtmineralisation der Malmwässer liegt zwischen 400 und 600 mg/l, wobei die Wässer des Tiefen Karst aufgrund der höheren Verweilzeiten im Trend etwas höher mineralisiert sind als die des Seichten. Mit Gesamthärten zwischen 15 und 23 °dH und pH-Werten von 7 bis 8 werden meist mittelharte bis harte, neutrale bis leicht alkalische Wässer erschlossen. Hinsichtlich der Sättigung gegenüber Calciumkarbonat werden mit Sättigungsindizes von -0,6 bis 0,4 (90% aller Wässer) erwartungsgemäß keine nennenswerten Defizite beobachtet. Mit wenigen Ausnahmen wurden für die Sauerstoffsättigung durchgängig hohe Werte ermittelt (Sauerstoffsättigung > 85% bei etwa 90% aller Malmwässer).

Bei den Spurenelementen wurden nur für wenige Elemente höhere Konzentrationen festgestellt. Tendenziell lässt sich eine Zunahme der Gehalte vom Seichten zum Tiefen Karst erkennen. Für Barium wurde bei beiden Gruppen ein Medianwert von 11 µg/l ermittelt. Alle weiteren Angaben beziehen sich auf die Wässer des Tiefen Karst. Gehalte im Median von über 10 µg/l erreicht Strontium, von über 1 µg/l Bor, Zink und Arsen. Bor und Zink wurden allerdings in 10 und 25% der Fälle nicht nachgewiesen.

4.3.9 Quartär

Die Beschaffenheit der quartären Grundwässer wird in unterschiedlichem Maß von Zuflüssen aus dem Festgesteinsrahmen beeinflusst. Die vielfältige und meist intensive Nutzung der Talräume (Landwirtschaft, Industrie, Rohstoffabbau, Siedlungen und Freizeitnutzungen) sowie die Infiltration von Oberflächenwässern infolge influenter Fließverhältnisse (z.B. im Bereich von Staustufen) wirken sich ebenfalls und nicht selten deutlich auf die Grundwasserqualität aus. Überdies variieren die chemischen Inhalte der Wässer aufgrund der petrographisch sehr heterogenen Zusammensetzung der quartären Grundwasserleiter.

Es liegen insgesamt Analysen von 26 Brunnenwässern und einem Quellwasser vor, die überwiegend aus dem Main- und Regnitztal stammen (Abb. 4-26). Ausnahmen bilden drei Analysen aus dem Wiesent- und eine aus dem Aischtal. Das Quellwasser entstammt aus einem isolierten Grundwasservorkommen im Bereich der 45 m- bis 60 m-Terrasse bei Unteroberndorf. Eine hydraulische Kopplung an den darunter liegenden Rhätholias ist dabei jedoch nicht ganz auszuschließen.

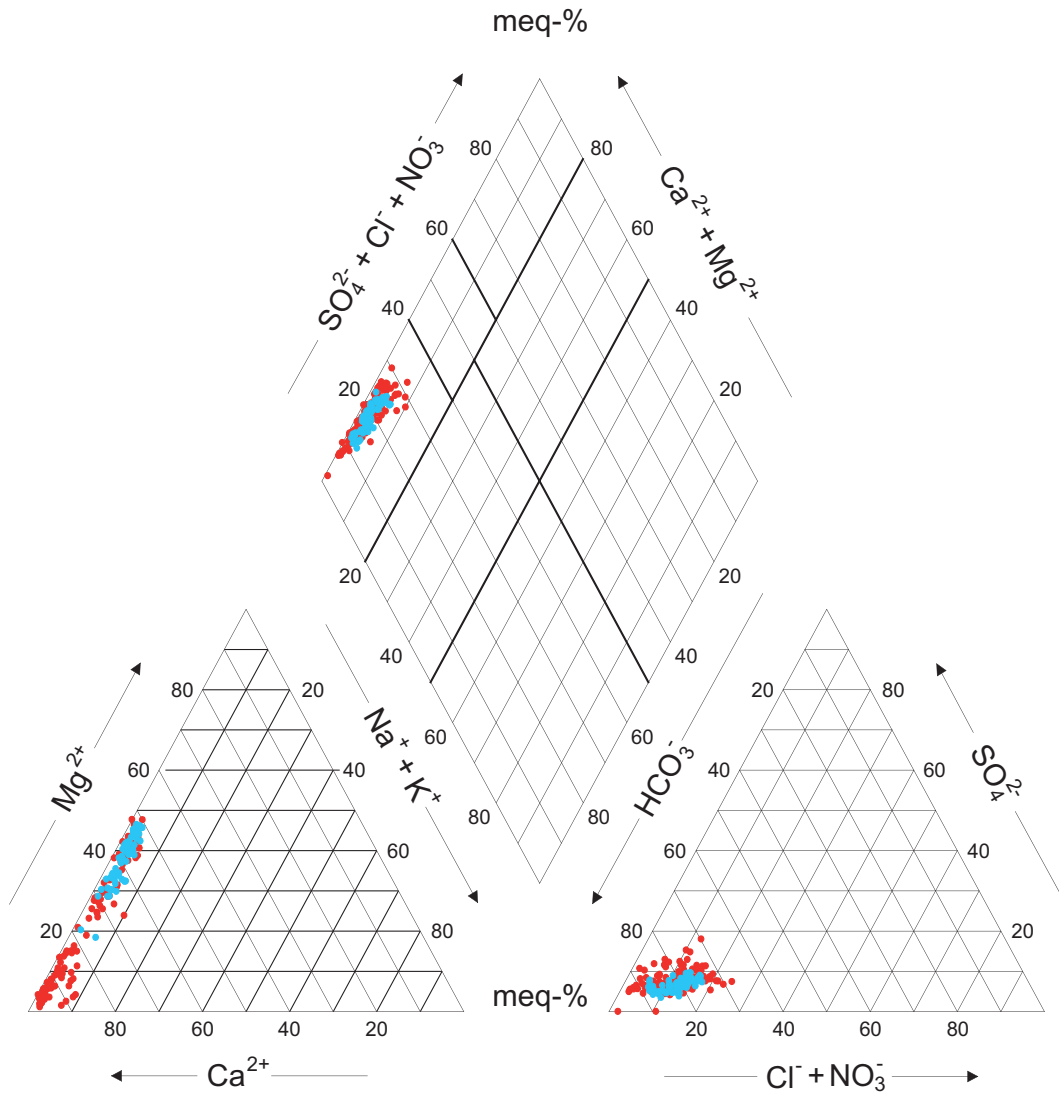


Abb. 4-24: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Seichten (rot) und Tiefen (blau) Malmkarst im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (Probenahmestellen: Seichter Malmkarst 116, Tiefer Malmkarst 68).

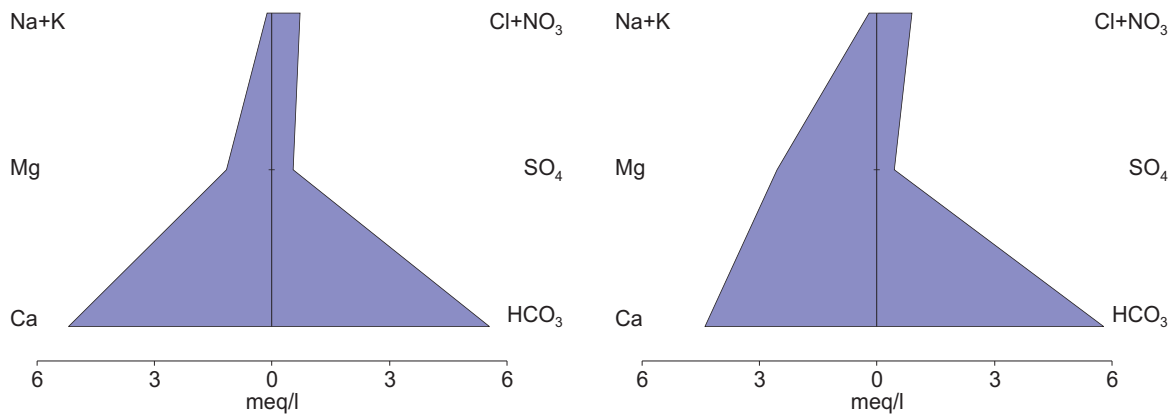


Abb. 4-25: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem dem Seichten (links) und Tiefen (rechts) Malmkarst im Stiff-Diagramm (Probenahmestellen: Seichter Malmkarst 116, Tiefer Malmkarst 68).

Um anthropogen möglichst gering beeinflusste Wässer zu erhalten, wurden hauptsächlich Wässer aus Brunnen und Grundwassermessstellen im Bereich von Trinkwasserschutzgebieten untersucht. Aufgrund der besonderen Aquifergeometrie, der geostatistisch ungünstigen Verteilungsdichte verfügbarer Analysen und der mannigfaltigen, lokal wechselnden Einflüsse auf die Beschaffenheit lässt sich für das quartäre Grundwasser allerdings kaum ein durchgängig repräsentativer Typ definieren.

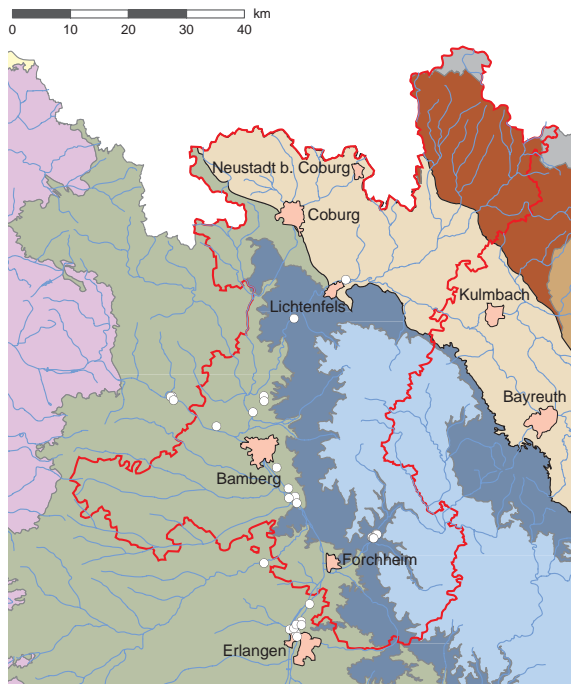


Abb. 4-26: Lage der Entnahmestellen der Grundwässer aus dem Quartär.

Als Hauptbestandteile treten bei den Kationen vorwiegend Calcium (11–128 mg/l), häufig Magnesium (3–34 mg/l), seltener Natrium (2–29 mg/l) und bei den Anionen meist Hydrogencarbonat (38–424 mg/l) und Sulfat (10–90 mg/l) in Erscheinung (Abb. 4-28). Meist in Abhängigkeit des anthropogenen Stoffeintrags überschreiten Chlorid, Nitrat und seltener Kalium die Schwelle zu den Hauptbestandteilen. Je nach hydraulischen Bedingungen beeinflussen auch Zuflüsse aus dem Festgesteinrahmen die Lösungsinhalte. Sie führen in der Regel auch zu einer Aufhärtung der Wässer. Bekannt sind z.B. sulfatreiche Zuflüsse aus dem Gipskeuper im Maintal bei Eltmann. Im Bereich um Erlangen vermischen sich lokal höher mineralisierte Wässer aus dem Keuper mit geringer mineralisierten Wässern im Quartär. Entlang von Störungszonen wird dort auch eine Beimischung aufsteigender Tiefenwässer vermutet. Nach FURTAK & LANGGUTH (1967) sind vorwiegend normal erdalkalische und vereinzelt auch erdalkalische Wässer mit höherem Alkaligehalt anzutreffen (Abb. 4-27). Sie sind überwiegend hydrogencarbonatisch, finden sich aber aufgrund der variantenreichen Stoffinhalte auch in allen anderen Typisierungen der beiden genannten Hauptgruppen wieder.

Die Gesamtmineralisation liegt in einem relativ breiten Bereich von 86 bis 905 mg/l. Mit pH-Werten zwischen 5,7 und 7,6 sind die Wässer leicht sauer bis schwach alkalisch, mehrheitlich liegen sie jedoch im nahezu neutralen Bereich (Median 7,1). Für den Index der Calciumkarbonatsättigung wurden Werte zwischen -3,3 und -0,2 berechnet (Median -0,5). Eine deutliche Untersättigung zeigen dabei naturgemäß die geringer mineralisierten Wässer. Sie tritt relativ häufig auf (bei etwa 40% aller Analysen) und deutet auf ein vorwiegend silikatisches Gesteinsinventar der quartären Talfüllung hin. Aufgrund des breiten Konzentrationsspektrums wichtiger Härtebildner (Calcium und Magnesi-

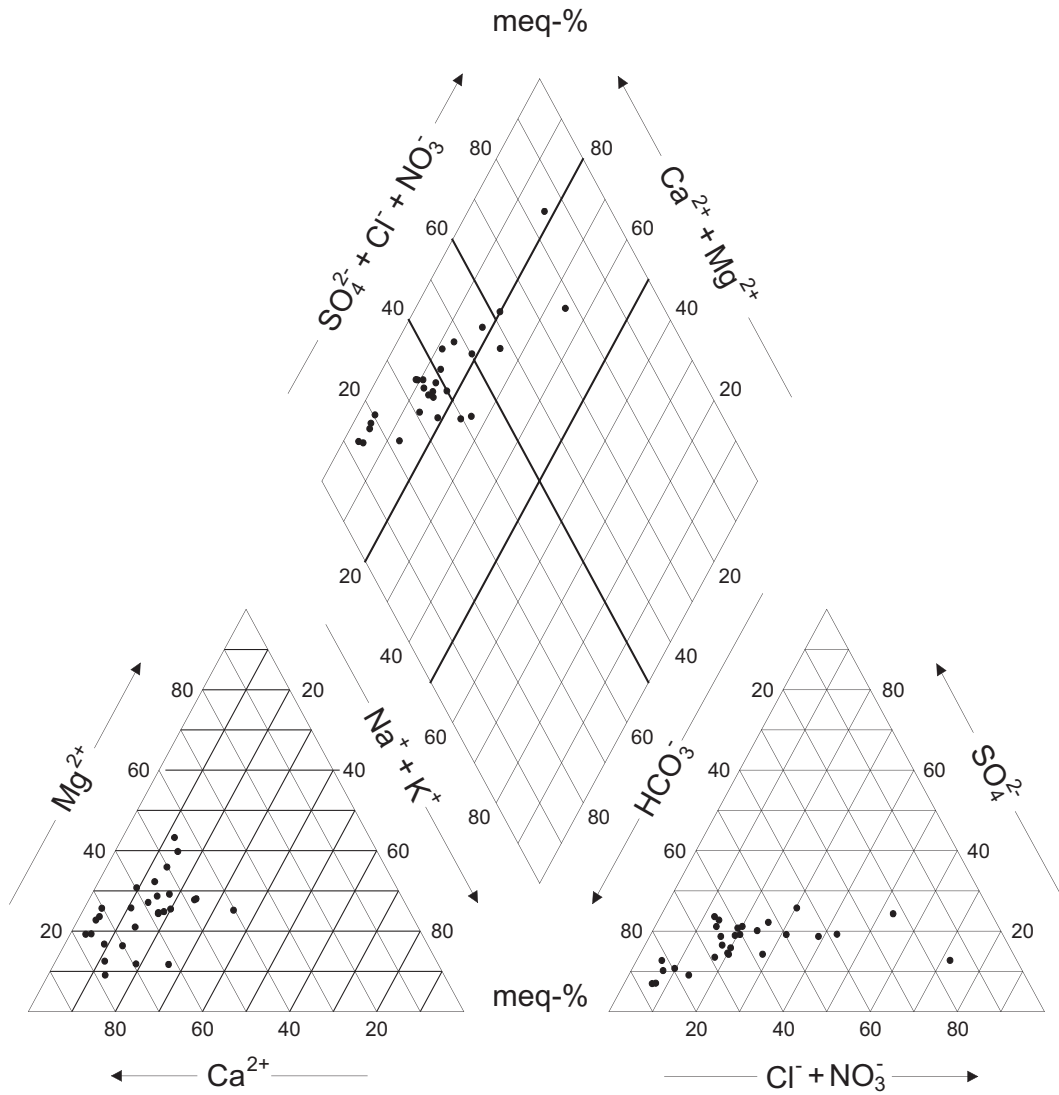


Abb. 4-27: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Quartär im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (27 Probenahmestellen).

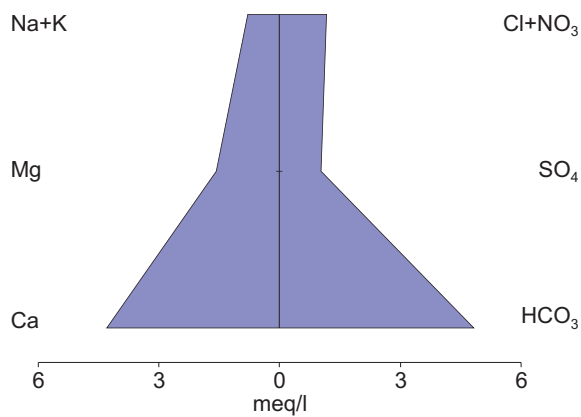


Abb. 4-28: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Quartär im Stiff-Diagramm (27 Probenahmestellen).

um) werden Gesamthärten von sehr weich (2 °dH) bis hart (26 °dH) erreicht. Mögliche Quellen der Härtebildner wurden bereits erwähnt. Bei der Sauerstoffsättigung zeigen sich mit Werten < 50% bei etwa 75% aller Analysen merkliche Defizite, was vermutlich mit der flächenhaften Verbreitung von bindigen Auensedimenten und vereinzelt auch Mooren in der Grundwasserüberdeckung sowie generell mit höheren Verweilzeiten des Grundwassers im Untergrund zusammenhängt. Infolge der reduzierenden Verhältnisse überschreiten einige Wässer bei Eisen (bis 0,55 mg/l) und Mangan (bis 1,7 mg/l) die Grenzwerte der TRINKWV (2001).

Bei den Spurenelementen dominieren mit Gehalten im Median von über 100 µg/l in der Reihenfolge abfallender Konzentration Strontium und Barium, mit Werten über 10 µg/l Bor und Zink, mit Werten über 1 µg/l die Elemente Lithium, Kupfer und Rubidium. Im Median wurden für Cobalt (0,1 µg/l), Kupfer (1,9 µg/l) und Zink (19 µg/l) die höchsten Werte in der Region ermittelt.

4.4 Multivariate Statistik

4.4.1 Zielsetzung

Die multivariate Analyse zielte darauf ab, eine möglichst kompakte Darstellung des Informationsgehaltes des großen Datensatzes zu liefern. Im Einzelnen wurden dabei, analog zu WAGNER et al. (2003), die folgenden Ziele verfolgt:

Einerseits wurde untersucht, inwieweit sich die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten nicht nur hinsichtlich einzelner Parameter, sondern auch aufgrund typischer Kombinationen von Parameterwerten unterscheiden. Damit wird letztendlich überprüft, inwieweit die aufgrund verschiedener Kriterien vorab erfolgte Klassifizierung der Wässer von den Beschaffenheitsdaten unterstützt wird.

Andererseits sollten die Daten möglichst effizient visualisiert werden. Eine solche grafische Darstellung kann beispielsweise dafür genutzt werden, Ausreißer und Gruppierungen zu identifizieren, die Verteilung von Parameterwerten darzustellen oder Übergänge zwischen sehr ähnlichen Einheiten zu untersuchen.

4.4.2 Daten und Methoden

4.4.2.1 Aufbereitung der Daten

Von den bestimmten Parametern wurden 30 ausgewählt, die in mindestens 90% aller Messstellen bestimmt worden waren. Als Summenparameter wurde die elektrische Leitfähigkeit berücksichtigt, als Hauptinhaltsstoffe Chlorid, Hydrogencarbonat, Kalium, Calcium, Magnesium, Natrium, Nitrat, pH-Wert, Silicium und Sulfat. Ferner wurden Ammonium, Aluminium, Arsen, Barium, Cer, Kobalt, Chrom, Kupfer, Lanthan, Lithium, Mangan, Molybdän, Nickel, Rubidium, Strontium, Uran, Vanadium, Yttrium und Zink mit aufgenommen.

Fehlstellen wurden durch den Mittelwert für den jeweiligen Parameter ersetzt. Um die verschiedenen Parameter trotz der unterschiedlichen Wertebereiche gleich zu gewichten, wurden die Daten vor der Analyse z-normiert: Von den Einzelwerten wurden die Mittelwerte der jeweiligen Parameter abgezogen, und die Werte anschließend durch die Standardabweichung des jeweiligen Parameters geteilt.

Die einzelnen Einheiten waren mit sehr unterschiedlichen Probenzahlen vertreten (Tab. 4-3). Das Maximum mit 151 Proben wurde vom Sandsteinkeuper ohne Austauschwässer gebildet, während aus anderen Einheiten zum Teil nur jeweils Werte weniger Messstellen vorlagen.

Tab. 4-3: Aufteilung des verwendeten Datensatzes nach hydrogeologischen Einheiten (Grundwässer)

Einheit (Grundwässer)	Kurzbezeichnung	Anzahl der Messstellen
Doggereisensandstein	bb	55
Grauwacken-Tonschiefer Wechselfolge	Grauw_Toschi	28
Gipskeuper	kmg	8
Sandsteinkeuper Austauschwässer	kms_aust	20
Sandsteinkeuper silikatisch bis karbonatisch	kms_si_karb	151
Rhät-Lias Austauschwässer	kola_aust	6
Rhät-Lias karbonatisch	kola_karb	23
Rhät-Lias silikatisch	kola_si	30
Unterer Keuper	ku	13
Lias	lble	5
Muschelkalk	mu	2
Quartär	qu	23
Quarzite	quarzit	6
Rotliegend	ro	8
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	sm_su	56
Oberer Buntsandstein	so	11
Tonschiefer	Toschi	17
Malm, seicht	w_seicht	54
Malm, tief	w_tief	23

4.4.2.2 Methoden

Zur Untersuchung auf abgrenzbare Gruppen wurde die Clusteranalyse verwendet. Im ersten Schritt wurde eine hierarchische Clusteranalyse eingesetzt, um die optimale Clusterzahl zu bestimmen. Im zweiten Schritt wurde diese Einteilung mit einer Clusterzentrenanalyse verfeinert.

Mit der Diskriminanzanalyse wurde untersucht, inwieweit sich die verschiedenen Einheiten anhand der Beschaffenheitsdaten voneinander abgrenzen lassen. Dafür wurden allerdings nur die 13 Einheiten berücksichtigt, für die die Daten von mindestens 10 Messstellen vorlagen. Für die grafische Darstellung und Analyse großer multivariater Datensätze hat sich das Verfahren der Selbstorganisierenden Karte in Kombination mit Sammon's Mapping (KOHONEN 2001, SAMMON 1969) bewährt. Dabei werden die einzelnen Messstellen als Punkte so in einer zweidimensionalen Grafik angeordnet, dass die Abstände in der Grafik möglichst proportional zu den Ähnlichkeiten im hochdimensionalen Datensatz sind. Die Ähnlichkeiten wurden mit der euklidischen Distanz bestimmt.

Das methodische Vorgehen entspricht weitgehend dem in WAGNER et al. (2003) beschriebenen. Dort sind auch die einzelnen Verfahren genauer beschrieben. Die Daten wurden in Microsoft Excel aufbereitet. Die statistische Analyse und die grafische Aufbereitung der Ergebnisse erfolgte überwiegend in der Sprache R, Version 2.2.2005-12-19 (HORNIK 2005). Dafür wurden die Pakete „stats“, „cluster“ und „MASS“ verwendet. Für die Erstellung der Selbstorganisierenden Karte wurde das von ALHONIEMI, HIMBERG, PARVIAINEN und VESANTO entwickelte Paket SOM (<http://www.cis.hut.fi>) verwendet, das für Mathworks Matlab entwickelt wurde. Für die Analyse wurde die Matlab Version 6.5.0.180913a Release 13 verwendet.

4.4.3 Ergebnisse

4.4.3.1 Bestimmung von Gruppierungen: Clusteranalyse

Die Clusteranalyse wurde mit den Werten der 30 Hauptkomponenten durchgeführt. Damit wurde vermieden, dass die Einflussfaktoren, die mit vielen Parametern korrelieren, überproportional gewichtet werden. Anhand des markanten Knicks der Kurve der Fehlerquadratsumme, aufgetragen gegen die Clusterzahl, wurde die Zahl von sechs Clustern als optimal bestimmt (Abb. 4-29). Diese Zahl ist deutlich niedriger als die Zahl der Einheiten.

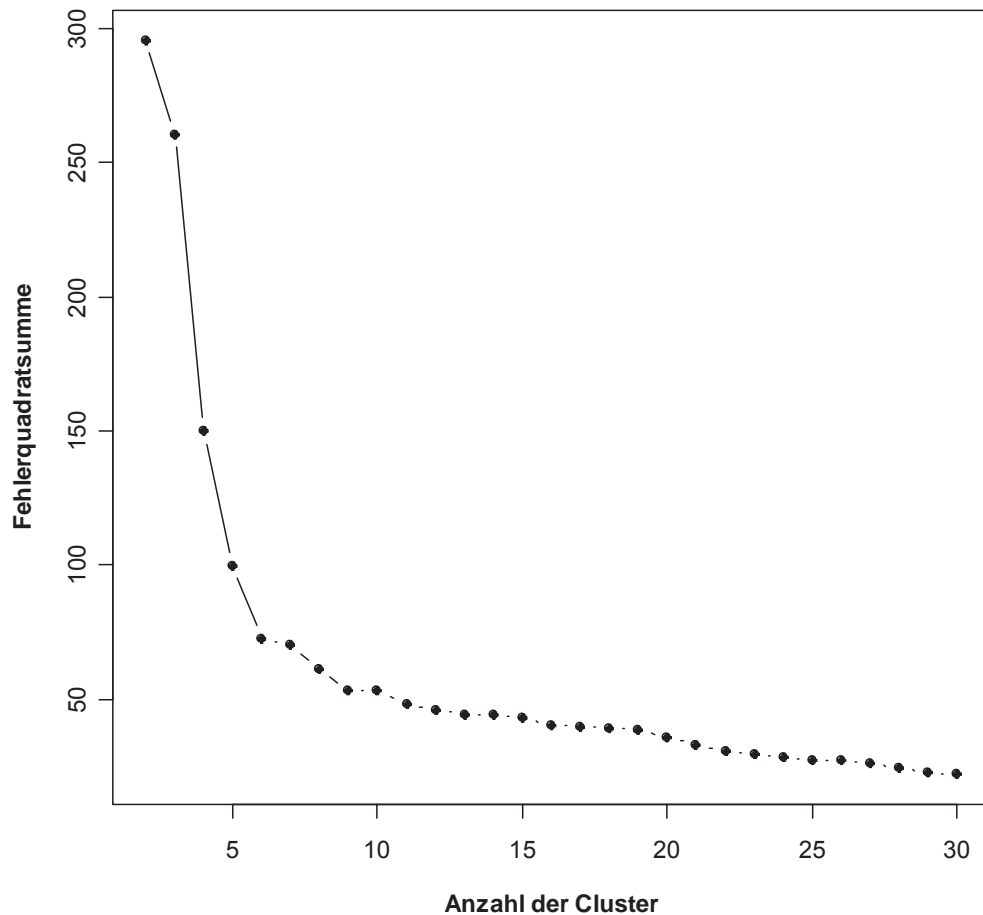


Abb. 4-29: Fehlerquadratsumme in Abhängigkeit von der Zahl der Cluster.

Abb. 4-30 gibt die Zuordnung der Messstellen der verschiedenen Einheiten zu den sechs Clustern wieder. Mit 172 Messstellen ist Cluster Nr. 1 das größte Cluster. Es wird vor allem von Messstellen aus dem Jura (Malm, Dogger, Lias), dem Unteren Keuper und dem Muschelkalk dominiert. Daneben wird ein Teil der Messstellen aus dem Lias, dem Gips- und Sandsteinkeuper und den Rhät-Lias-Schichten mit karbonatischen Grundwässern dem 3. Cluster (20 Messstellen) zugeordnet. Das Cluster Nr. 2 (132 Messstellen) wird vor allem vom Paläozoikum, Buntsandstein, den Rhät-Lias-Schichten mit silikatischer Prägung und den Quarziten dominiert. Das Cluster Nr.4 (96 Messstellen) umfasst neben denen aus dem Keuper auch den größten Teil der Messstellen aus dem Quartär. Das Cluster Nr. 5 (32 Messstellen) wird fast ausschließlich von Austauschwässern des Sandsteinkeuper und Rhät gebildet. Cluster Nr. 6 vereinigt 87 Messstellen, überwiegend aus dem Rotliegend, Sandstein- und Gipskeuper.

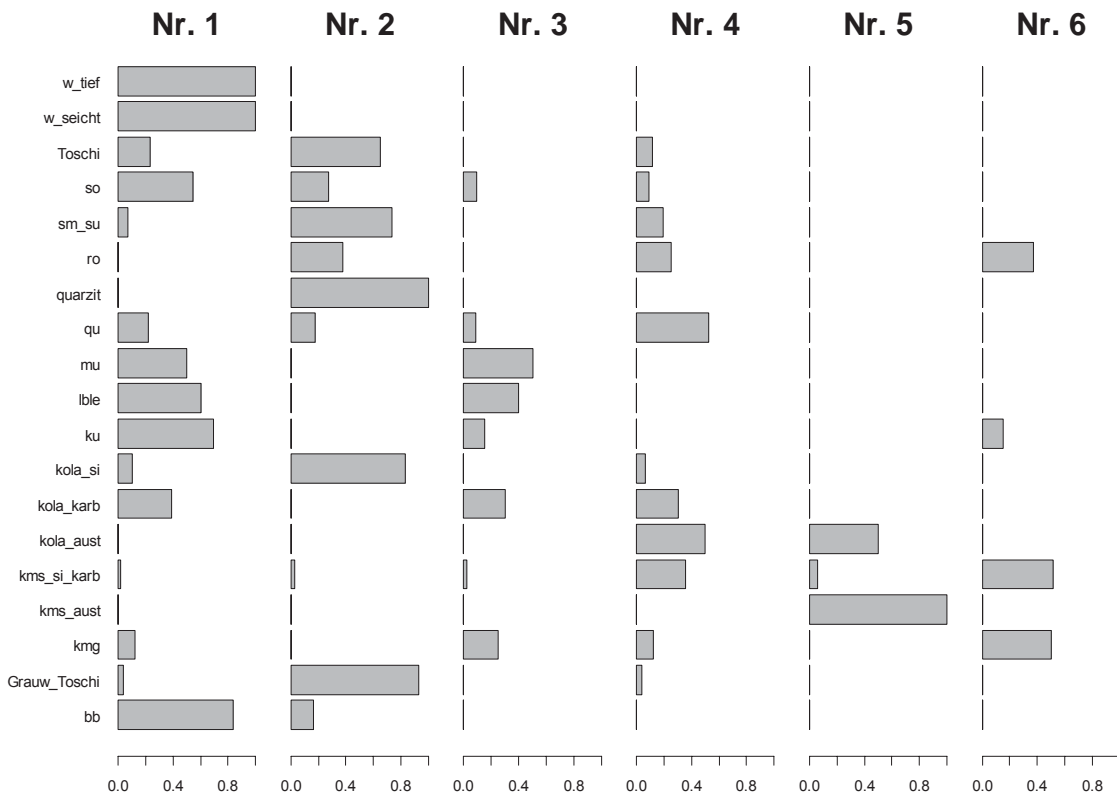


Abb. 4-30: Prozentuale Zuordnung der Messstellen der verschiedenen Einheiten zu den sechs Clustern.

4.4.3.2 Überprüfung der Klassifizierung: Diskriminanzanalyse

Mittels der Diskriminanzanalyse wurden 72% der Proben den richtigen Einheiten zugeordnet. Zur Abschätzung der Verallgemeinerbarkeit dieses Ergebnisses wurde zusätzlich eine Kreuzvalidierung durchgeführt. Dabei wird nacheinander jeweils eine Probe aus dem Datensatz herausgenommen, die Diskriminanzfunktionen bestimmt, und anschließend die Zuordnung dieser Probe vorgenommen. Damit lässt sich abschätzen, wie gut die Klassifizierungsleistung für neue Datensätze ist. Dabei sinkt die Trefferquote auf 64%.

In Tabelle 4-4 ist die Zuordnungsmatrix für die nicht kreuzvalidierte Diskriminanzanalyse dargestellt. Die beste Trennbarkeit weisen die Einheiten kms_si_karb und sm_su mit jeweils fast 90% korrekter Zuordnungen auf. Recht gut ließen sich auch noch die Einheiten kms_aust, kola_si, kola_karb und w_tief abtrennen. Zwischen den paläozoischen Einheiten Tonschiefer und Grauwacke-Tonschiefer konnte dagegen nur schlecht unterschieden werden, ebenso zwischen denen des Seichten und Tiefen Karst im Malm. Von den 13 Messstellen des Unteren Keuper wurden nur drei korrekt klassifiziert.

Tab. 4-4: Zuordnung der Proben der Einheiten mit jeweils mindestens 10 Messstellen nach der Diskriminanzanalyse. Angegeben ist jeweils der Prozentsatz, bezogen auf die Gesamtzahl der Proben pro Einheit (rechte Spalte). Werte zwischen 10% und 50% sind blau hervorgehoben, Werte > 50% sind rot und fett gedruckt

	zugeordnet zu													Anzahl der Messstellen
	bb	Grauw_Toschi	kms_aust	kms_si_karb	kola_karb	kola_si	ku	qu	sm_su	so	Toschi	w_seicht	w_tief	
bb	65	0	0	0	0	9	2	0	0	0	7	16	0	55
Grauw_Toschi	0	61	0	0	0	4	4	0	0	0	18	0	0	28
kms_aust	0	0	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
kms_si_karb	1	2	0	89	1	2	0	1	1	0	0	0	0	151
kola_karb	4	0	0	4	70	0	0	4	0	0	0	17	0	23
kola_si	0	0	0	0	0	83	0	0	7	0	7	0	0	30
ku	0	0	0	15	0	0	31	0	0	15	0	15	8	13
qu	0	9	0	13	0	0	0	52	9	0	4	0	0	23
sm_su	4	2	0	0	0	0	0	0	89	4	0	0	2	56
so	0	9	0	0	9	0	0	0	0	64	0	18	0	11
Toschi	18	35	0	0	0	0	0	0	6	0	41	0	0	17
w_seicht	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52	24	54
w_tief	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	78	23

4.4.3.3 Visualisierung der Daten und Ergebnisse: Selbstorganisierende Karte

Der quadrierte Korrelationskoeffizient der Distanzen im 30-dimensionalen Datenraum und in der zweidimensionalen grafischen Darstellung beträgt 0,9. Die Entfernungen zwischen den einzelnen Punkten in der Grafik, die jeweils eine Messstelle darstellen, und den Ähnlichkeiten in der Beschaffenheit der Wässer sind somit sehr eng korreliert. Damit ist eine sehr kompakte Darstellung des Datensatzes möglich, die zur Identifizierung von Ausreißern, zur Bestimmung von Gruppierungen, zur Abgrenzung von verschiedenen hydrogeologischen Einheiten etc. genutzt werden kann.

Die Anordnung der Messstellen in der Grafik wird vor allem durch die Hauptinhaltsstoffe der Wässer bestimmt. Von oben links nach unten rechts nimmt tendenziell der pH-Wert zu, von oben nach unten die Elektrische Leitfähigkeit (Abb. 4-31). Die Konzentrationen von Calcium, Magnesium und Hydrogencarbonat weisen ein sehr ähnliches Muster wie das der Elektrischen Leitfähigkeit auf (nicht dargestellt). Die Sulfatkonzentrationen sind durch wenige sehr hohe Werte im unteren linken Quadranten gekennzeichnet, während hohe Natrium- und Chloridkonzentrationen vor allem in den Messstellen im rechten Teil der Grafik positioniert wurden (Abb. 4-31). Auffällig ist der weder mit den pH-Werten noch mit der Gesamtmineralisierung korrelierende Anstieg der Siliciumkonzentrationen von links nach rechts.

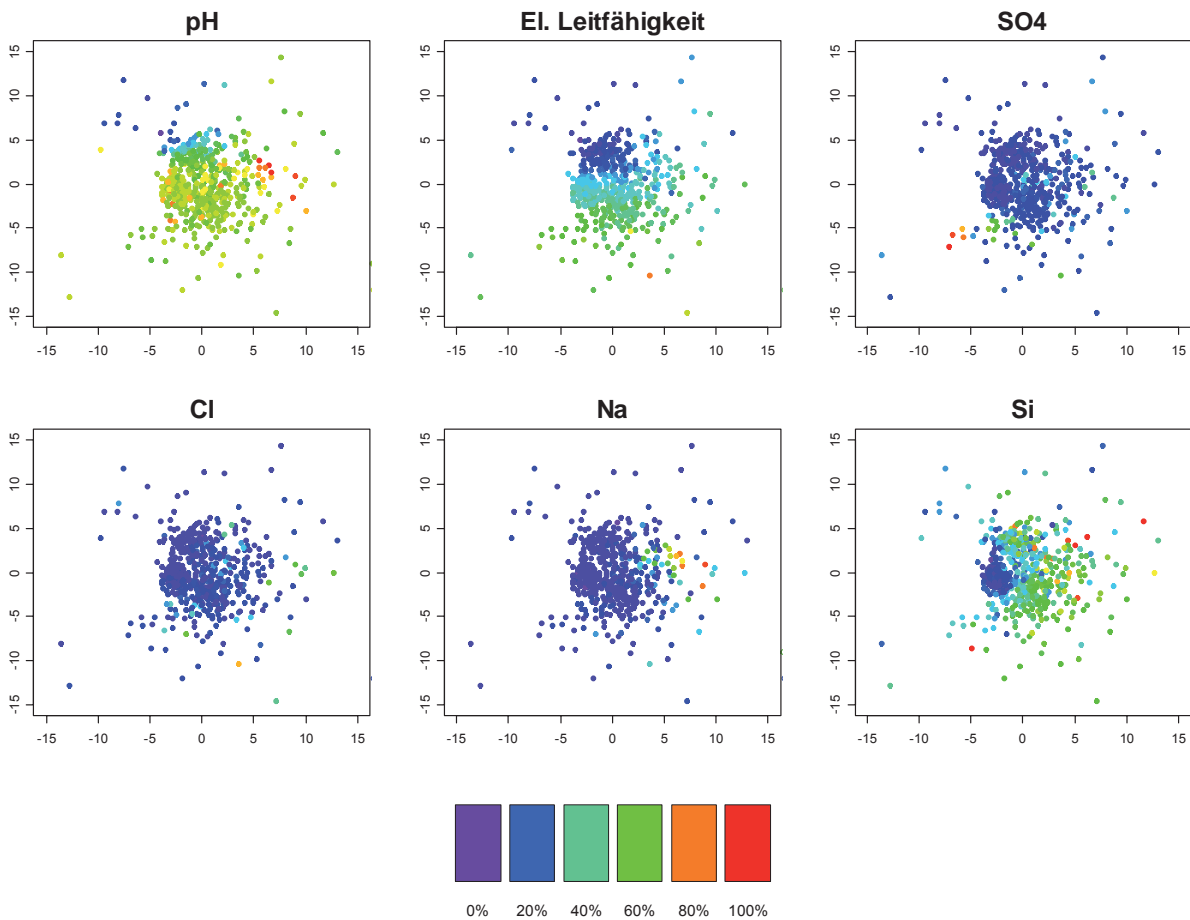


Abb. 4-31: Darstellung der Messstellen in der Selbstorganisierenden Karte. Farblich kodiert sind jeweils die Parameterwerte in Prozent des jeweiligen Maximalwertes.

Im Vergleich zu den Hauptinhaltsstoffen sind die Verteilungen der Spurenstoffe stärker durch einzelne hohe Werte gekennzeichnet. Messstellen mit hohen Aluminiumgehalten sind nur im oberen linken Teil der Grafik zu finden, d.h. im Bereich der niedrigen pH-Werte (Abb. 4-32). Hohe Barium- und Chromgehalte werden dagegen nur in den hoch mineralisierten Wässern gefunden. Hohe Lithium-, Vanadium- und Uran-Konzentrationen sind auf den rechten Teil der Grafik beschränkt, d.h. auf Wässer mit höheren Siliciumgehalten (Abb. 4-32).

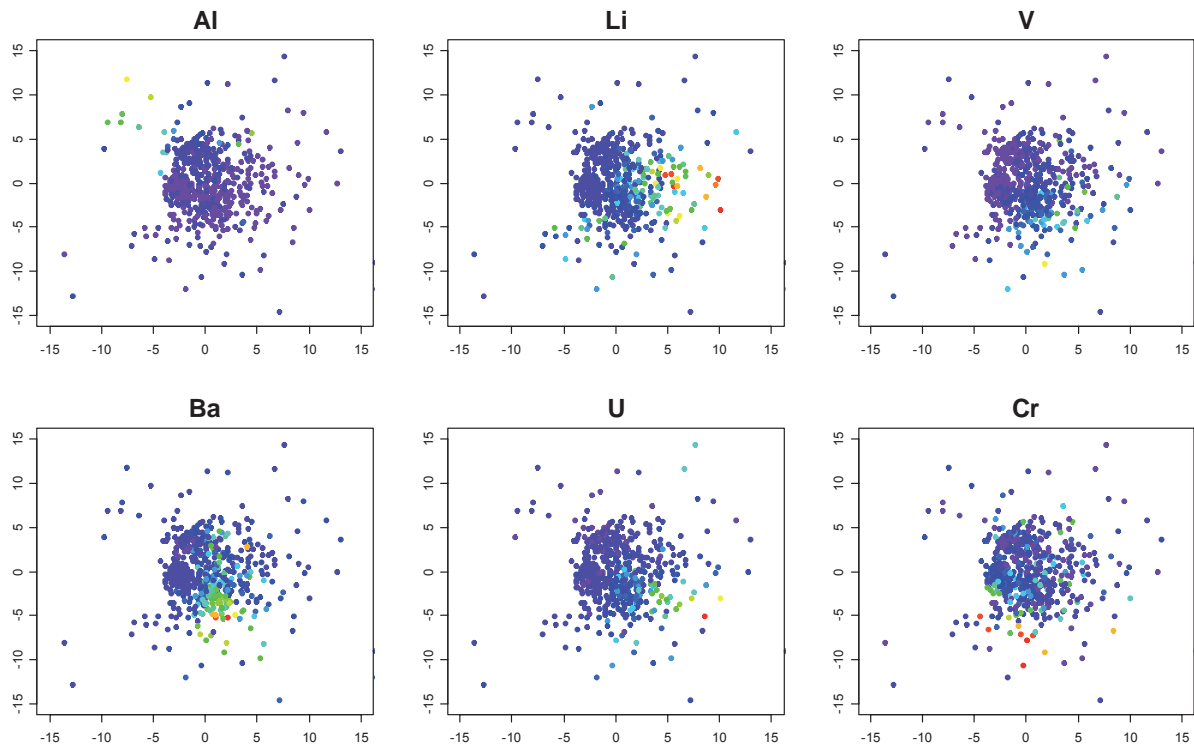


Abb. 4-32: Darstellung der Messstellen in der Selbstorganisierenden Karte. Farblich kodiert sind jeweils die Parameterwerte in Prozent des jeweiligen Maximalwertes (Abb. 4-31).

Die Darstellung der Messstellen der verschiedenen Einheiten ermöglicht es, die Abgrenzbarkeit der hydrogeologischen Einheiten visuell zu überprüfen. In Abb. 4-33 sind nur die Einheiten berücksichtigt, aus denen Werte von mindestens 10 Messstellen vorlagen. Generell bestätigt sich die auch in der Cluster- und Diskriminanzanalyse beobachtete starke Überlappung der Einheiten. Trotzdem lassen sich die verschiedenen Schwerpunkte erkennen. So werden die Wässer aus dem Oberen und Mittleren Buntsandstein und der paläozoischen Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge überwiegend in der oberen linken Ecke positioniert, sind also durch niedrige pH-Werte und schwache Mineralisierung gekennzeichnet (Abb. 4-31). Die Wässer kms_si_karb sind dagegen v.a. im unteren rechten Quadranten zu finden, d.h. im Bereich höherer Mineralisierung, hoher Siliciumgehalte, und tendenziell auch höherer Barium- und Urankonzentrationen. Die Wässer der Grauwacken-Tonschiefer-Wechselfolge und die des Tonschiefers überlappen sich in der Grafik deutlich, was die schlechte Trennbarkeit durch die Diskriminanzanalyse erklärt. Ähnlich stark ist die Überlappung zwischen Seichtem und Tiefem Karst des Malm, allerdings bei deutlich geringerer Varianz der Werte (Abb. 4-33).

Die Selbstorganisierende Karte wurde außerdem genutzt, um zu überprüfen, inwieweit sich die Einheiten trotz der starken Überlappungen signifikant hinsichtlich der Anordnung in der Selbstorganisierenden Karte unterscheiden. Dabei wurden nicht nur die jeweiligen Mittelwerte berücksichtigt, sondern generell die Verteilung der Koordinaten der Selbstorganisierenden Karte. Damit lassen sich Unterschiede z.B. selbst dann detektieren, wenn die Mittelwerte identisch sind, aber die Streuung sich unterscheidet. Verwendet wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test.

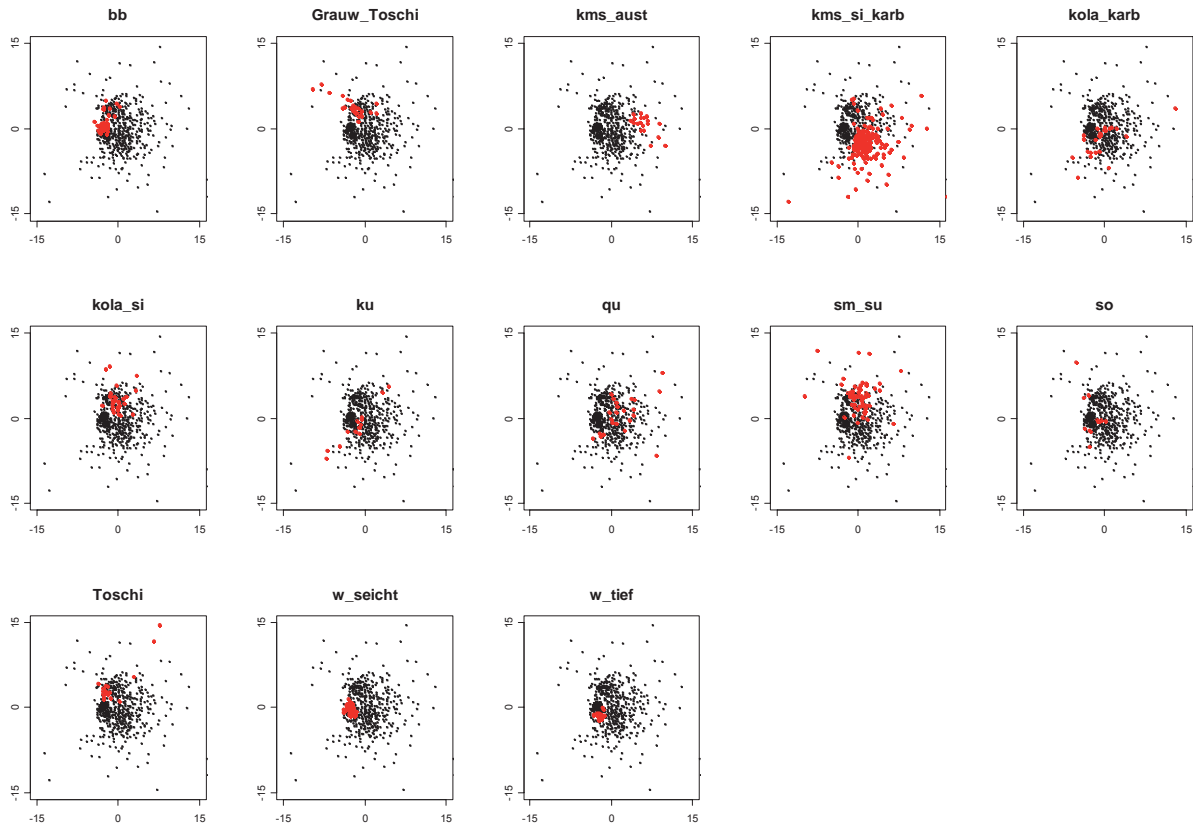


Abb. 4-33: Lage der Messstellen der verschiedenen hydrogeologischen Einheiten in der Selbstorganisierenden Karte.

Nicht signifikante Unterschiede ergaben sich nur für Vergleiche, in denen jeweils eine Einheit mit weniger als 20 Messstellen vertreten war. Dies gilt für den Tonschiefer, für den Oberen Buntsandstein und den Unteren Keuper. Es ist anzunehmen, dass ein höherer Stichprobenumfang hier zu einer deutlicheren Abgrenzbarkeit führen würde.

4.4.4 Zusammenfassung

Die multivariate Analyse der Daten des gegenüber WAGNER et al. (2003) massiv verdichteten Messnetzes in der Region 4 bestätigte im Wesentlichen die dort erzielten Ergebnisse. Allerdings lassen sich aufgrund des höheren Stichprobenumfangs in diesen Regionen stärker differenzierte Aussagen treffen.

Die anhand der Clusteranalyse unterschiedenen Gruppen sind nur schwach mit der vorab vorgenommenen Einteilung in hydrogeologische Einheiten korreliert. Die Diskriminanzanalyse bestätigte die starken Überlappungen zwischen den Einheiten. Allerdings wurde diese Analyse durch den geringen Stichprobenumfang in einem Teil der Einheiten erschwert.

Mit der Selbstorganisierenden Karte war eine sehr kompakte und gut zu interpretierende Darstellung des Datensatzes möglich, die 90% der Gesamtvarianz reproduzierte. Diese Darstellung bestätigte die starken Überlappungen zwischen den hydrogeologischen Einheiten. Mit Ausnahme einzelner Einheiten mit weniger als 20 Messstellen ergaben sich für sämtliche Vergleiche jeweils signifikante Unterschiede, die die vorab vorgenommene Klassifizierung bestätigten.

5 Grundwasserhaushalt

5.1 Klimatische Verhältnisse

Das Klima der Region 4 ist subkontinental bis schwach subatlantisch geprägt, mit Übergang zu den rauhen Höhen der Nördlichen Frankenalb und dem kalt-trockenen Binnenlandklima der Regnitz-Senke. Hier droht Spätfrostgefahr. Die Nördliche Frankenalb und der Frankenwald haben mit 190–210 Tagen die kürzeste Vegetationszeit, die im übrigen Gebiet 210–230 Tage andauert. Die durchschnittlichen Jahresniederschläge fallen mit 650–850 mm gering aus. Sie gehen etwa gleichmäßig auf das Sommer- und Winterhalbjahr verteilt nieder. In den höheren Lagen von Steigerwald, Haßbergen und Frankenalb werden Niederschlagswerte bis ca. 850 mm erreicht. Mit etwa 650 mm sind der Ostrand des Steigerwaldes und die angrenzende Regnitz-Senke die trockensten Gebiete, der Frankenwald ist mit ca. 1050 mm am niederschlagsreichsten. Die Nördliche Fränkische Platte und das Obermain-Schollenland streifen jeweils nur mit einem kleinen Flächenanteil den Norden der Region. In diesem Bereich macht sich bereits der stauende Effekt der Höhen von Thüringer Wald und Frankenwald bemerkbar, so dass die Niederschläge bis auf ca. 950 mm im Jahr ansteigen.

5.2 Grundwasserneubildung

Im Allgemeinen wird unter der Grundwasserneubildung der Zustrom von infiltriertem Wasser zum Grundwasser verstanden, der als Grundwasserneubildungsrate in $l/(s \cdot km^2)$ bzw. in mm/a angegeben wird. Die Grundwasserneubildung hängt sowohl von den klimatischen Größen wie Niederschlag und Verdunstung als auch geologischen und bodenphysikalischen Faktoren sowie von der Art der Bodennutzung und der Geländeform ab. Aufgrund der Vielzahl der relevanten Parameter, die teilweise eine hohe kleinräumige Variabilität aufweisen und oft nicht genau erfasst werden können, ist eine exakte Bestimmung der Grundwasserneubildung meist nicht möglich (HÖLTING & COLDEWEY 2005). Die angegebenen Grundwasserneubildungsraten der einzelnen hydrogeologischen Einheiten basieren größtenteils auf den Auswertungen von BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1996), BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1993) und APEL & BÜTTNER (1995). In der aufgeführten Literatur wurden die Grundwasserneubildungen in einzelnen Teilgebieten der Region 4 mit indirekten Methoden, wie z.B. Niedrigwasserabfluss der oberirdischen Gewässer oder der langjährigen Wasserhaushaltsgleichung, quantifiziert. Die festgelegten Bilanzräume, die diesen Methoden zu Grunde liegen, bauen sich häufig aus mehreren hydrogeologischen Einheiten auf. Demzufolge gelten die abgeleiteten „unteren“ und „oberen“ Grenzwerte der Grundwasserneubildung für den gesamten Bilanzraum und nicht für eine bestimmte hydrogeologische Einheit. Die Angaben sind Richtwerte, aus denen sich Schwankungsbereiche der Grundwasserneubildung für einzelne hydrogeologische Einheiten ableiten lassen. Zur Bestimmung der Grundwasserneubildung aus dem Niedrigwasserabfluss wurden die Verfahren von NATERMANN (1951), WUNDT (1958), KILLE (1970), KÖPF & ROTHASCHER (1980) angewendet. Die verwendeten Methoden sind in den einzelnen Arbeiten und in Ak GWN FH-DGG (1977) detailliert beschrieben.

Paläozoikum (Frankenwald)

Die Grundwasserneubildung im Paläozoikum wurde aus Abflussmessungen an den Vorflutern Haßlach und Rodach abgeleitet. Trotz der relativ hohen Niederschläge ($> 800 \text{ mm/a}$) in den Einzugsgebieten berechnen sich für die allgemeinen Grundwasserneubildungsraten nur Werte zwischen $2,7$ und $4,8 \text{ l/(s} \cdot \text{km}^2)$ bzw. zwischen 85 und 151 mm/a . Dies hängt vor allem mit dem geringen Speichervermögen und den flächenhaft verbreiteten geringen Durchlässigkeiten der Kluffgrundwasserleiter zusammen, infolge dessen ein nicht unerheblicher Teil des Niederschlags als Zwischen- und Oberflächenabfluss verloren geht. Darüber hinaus ist sogar anzunehmen,

dass die bilanzierten Werte für diverse paläozoische Einheiten wie z.B. Tonschiefer und Quarzite noch zu hoch sind. In angrenzenden Gebieten wurden in diesen Gesteinspartien häufig Neubildungsraten von $< 1\text{--}2 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ bzw. $30\text{--}60 \text{ mm/a}$ beobachtet. Im Gegensatz zum Festgestein weisen die überlagernden Schutt- und Verwitterungsdecken ein deutlich höheres Speichervermögen auf. In der Regel erfolgt durch die geringen Mächtigkeiten eine schnelle Aufsättigung dieser Schichten, weshalb ein Großteil der versickernden Niederschläge bereits als Zwischenabfluss den Gerinnen zuströmt. In Talsenken, Mulden und auf ebenen Flächen wirkt sich dieser Speichereffekt der Lockergesteinsüberdeckung allerdings positiv auf die Grundwasserneubildung im Festgestein aus, da die Niederschläge zwischengespeichert und verzögert abgegeben werden können. In niederschlagsreichen kalten Wintern tritt dort infolge der langsam abtauenden Schneedecke ein zusätzlicher Speichereffekt ein.

Schichtstufen- und Bruchschollenland

Innerhalb der Region Oberfranken West können für den Buntsandstein mittlere Grundwasserneubildungsraten zwischen $2,8$ und $5,8 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ bzw. 90 und 180 mm/a angegeben werden. Die Höhe der Neubildung ist dabei abhängig von der faziellen Ausbildung des Buntsandstein. Im Ausstrich der Sandsteine sind generell höhere Grundwasserneubildungsraten zu erwarten als im Ausstrich der Tonsteine.

Nach BAYERISCHES LANDSAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1996) variieren die Grundwasserneubildungsraten für die geologische Einheit des Muschelkalk zwischen $3,0$ und $12,8 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ oder 100 und 404 mm/a . Die höchsten Werte wurden aus dem Abfluss des Vorfluters Lauterbach am Pegel Oberlauter ermittelt. Die hohen Grundwasserneubildungsraten von $> 6 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ deuten auf gute Durchlässigkeiten im Muschelkalk hin; sie lassen sich auf größere Kluft- bzw. Karstvolumen zurückführen.

Für die Ausstrichgebiete des Keuper sind verhältnismäßig niedrige Grundwasserneubildungsraten anzusetzen; sie schwanken zwischen $1,6$ und $3,2 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ bzw. 50 und 100 mm/a . Die Ursache für die geringen Neubildungsraten liegt zunächst in den geringen Niederschlagsmengen der Region. Darüber hinaus wird die geringe Neubildung durch das vermehrte Auftreten gering durchlässiger, zum Teil mehrere Meter mächtiger, tonig-schluffiger Lagen stark eingeschränkt.

Wasserundurchlässige Schichten des Rhätolias, Lias oder Dogger sowie quartäre Deckschichten wirken sich ungünstig auf die Grundwasserneubildung des Albvorlandes aus. Insbesondere die weit verbreiteten Liasschichten, der Opalinuston und Lößlehme verringern die Durchlässigkeit. Auch in Sandsteinschichten und Hangschuttfächern bleibt die Rate der Grundwasserneubildung wegen ihrer geringen Ausstrichbreite unbedeutend. Für die Grundwasserneubildung im Albvorland sind deshalb nur geringe Raten zwischen 2 und $3 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ anzusetzen.

Auf der Albhochfläche ist die Grundwasserneubildung deutlich höher. Im Malmkarst fehlen weiträumig wasserundurchlässige Deckschichten, so dass der Niederschlag, dort auch höher als im Albvorland, sehr gut versickert. Selbst in Gebieten mit kurzfristigem oberirdischem Abfluss nach heftigen Niederschlägen versickert der Niederschlag in nahen Trockentälern oder Dolinen praktisch vollständig. So ist die Grundwasserneubildung der Sickerwasserspende weitgehend gleichzusetzen. Nach APEL & BÜTTNER (1995) liegt die Grundwasserneubildungsrate für den Seichten Karst und das Übergangsgebiet zwischen Seichtem und Tiefem Karst im Bereich von 2 bis $8 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$. Zieht man zusätzlich den Zustrom in Betracht, steigen die Raten im Tiefen Karst auf 8 bis $15 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ an, da sich dort ein Großteil des Grundwasserabflusses aus dem Seichten Karst akkumuliert.

Talräume

Für die quartären Grundwasserleiter im Main- und Regnitztal sowie deren Nebentäler liegen keine speziellen Untersuchungen zur Abschätzung der Grundwasserneubildung vor. Generell setzt sich dort die Grundwasserregeneration aus zwei Komponenten zusammen:

- direkte Neubildung im obertägigen Verbreitungsgebiet des quartären Grundwasserleiters über Niederschläge
- randlicher Grundwasserzustrom und Infiltration von Oberflächenwässern

Die direkte Neubildung lässt sich über die klimatische Wasserbilanz berechnen. Die so ermittelte Sickerwasserrate nach RÖTZER (1996) (Kapitel 6.2.3) erbrachte infolge der groben Datenauflösung allerdings nur abschnittsweise plausible Werte. Dort kann sie annähernd mit der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag über dem Quartär gleichgesetzt werden, da im Talraum Oberflächen- und Zwischenabfluss keine wesentliche Rolle spielen. Sie liegt demnach zwischen 50 und 200 mm/a, was etwa einer mittleren Grundwasserabflussspende von $4 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ entspricht. Verschiedene Autoren liefern trotz unterschiedlicher methodischer Ansätze ähnliche Werte für die direkte Grundwasserneubildung. In den modellhaften Untersuchungen der TGU (1996, 1997) wurden für das Regnitztal im Bereich Erlangen-Möhrendorf im Mittel $5 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ berechnet. UDLUFT et al. (2003) ermitteln für unbebaute Abschnitte zwischen Hirschaid und Bamberg $5,3 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ im langjährigen Mittel. Nach den Schätzungen von BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1993) liegen die Neubildungsraten für das Maintal im Minimum zwischen 3 und $4 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$. Die Bilanzrechnungen von UDLUFT et al. (1997) ergaben im Mittel für das Obermaintal 5,4, das Maintal von Eitmann bis Bamberg 4,5 und das Regnitztal von Bamberg bis Forchheim $4,3 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$. Im unteren Wiesenttal wird von einer langjährigen mittleren Grundwasserneubildung von $6,2 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ ausgegangen (BAUR CONSULT 2000).

Der randliche Zustrom von Grundwasser erfolgt vor allem aus dem Festgesteinsrahmen. Der seitliche Randzufluss wird dabei vielerorts auch in höher gelegenen Terrassen und vereinzelt auch Flugsanddecken, wie z.B. im Regnitztal zwischen Bamberg und Hirschaid, zwischengespeichert und verzögert an das quartäre Hauptgrundwasser abgegeben. Die Grundwasserneubildung ist dort ebenso als Bilanzgröße wirksam. Über die räumliche Verbreitung und Bilanzierung des seitlichen Zustroms liegen keine Messdaten vor. Im Allgemeinen ist ein durchgängiger Zustrom anzunehmen, der sich dann entweder in einem höheren Fließgefälle oder schräg bzw. senkrecht zum Vorfluter ausgerichteten Grundwasserhöhengleichen andeutet (Blatt 2 und Kapitel 3.2.8). UDLUFT et al. (2003) geben im Regnitztal als östlichen Randzufluss auf der Strecke Bamberg–Hirschaid 150 bis 220 l/s an, was einem durchschnittlichen Zustrom von etwa 20 l/s pro km Rand ergibt. Von ähnlichen Größenordnungen gehen auch UDLUFT et al. (1997) im Main- und Obermaintal in Verbindung mit weit reichenden Auflockerungszonen entlang der Talhänge aus. Die TGU (1997) schätzt am Westrand des Quartär zwischen Erlangen und Möhrendorf einen Zustrom von 4,4 l/s pro km Rand aus dem Sandsteinkeuper. In den genannten Beispielen handelt sich allerdings um idealisierte, auf die numerische Modellierung ausgerichtete Annahmen. Da die Grundwasser erfüllten Talbereiche auch häufig Entlastungszonen für die umgebenden Festgesteinsaquifere darstellen, ist ebenso eine entsprechende Einspeisung von Grundwasser aus dem präquartären Festgesteinsuntergrund zu veranschlagen.

Die Infiltration von Oberflächengewässern kann lokal und insbesondere saisonal auch zur Grundwasserneubildung im Quartär beitragen. Zwischen Bamberg und Strullendorf sickern nach UDLUFT et al. (2003) bei Niedrigwasserbedingungen im Bereich der Unterläufe des Sendelbachs 3–5 l/s und des Strullendorfer Bachs 15–20 l/s dem quartären Grundwasserkörper zu. Ähnliche Verhältnisse sind z.B. auch für den Unterlauf des Leitenbachs N Hallstadt anzunehmen. Im Grundwasserströmungsmodell von BAUR CONSULT (2000) wird für den Unterlauf der Trubach (Wiesenttal) eine Infiltration von 77 l/s angesetzt.

6 Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung

6.1 Einführung

Die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung wirkt sich ganz wesentlich auf die Beurteilung einer möglichen Beeinträchtigung der Grundwasserqualität durch etwaige Schadstoffe aus. Grundwasserüberdeckung wird hierbei nach DIN 4049 definiert als der Boden- und Gesteinskörper über dem obersten zusammenhängenden, flächenhaft ausgebildeten Grundwasserstockwerk, dem eine wasserwirtschaftliche Bedeutung zukommt (HÖLTING et al. 1995).

Im Sickerwasser potenziell enthaltene Schadstoffe können, in starker Abhängigkeit von der Verweildauer, beim Durchdringen der Grundwasserüberdeckung durch Abbauprozesse mechanischer, physikalisch-chemischer oder mikrobieller Art soweit reduziert werden, dass sich der Eintrag ins Grundwasser entsprechend verringert. Wesentliche Faktoren der Verweildauer stellen die zu erwartende Sickerwassermenge und die Beschaffenheit der ungesättigten Zone über dem Grundwasser dar. Während die Sickerwassermenge im Wesentlichen aus der klimatischen Wasserbilanz, den Bodeneigenschaften und der Vegetation resultiert, werden die Fließvorgänge in der ungesättigten Zone vorwiegend durch deren petrografische Ausbildung und Mächtigkeit definiert.

Das hier angewandte Bewertungsverfahren nach Punkten basiert auf einer Beurteilung der relativen Reaktionsintensität durch Abschätzung der Sickerwasser-Verweilzeiten bei Berücksichtigung der Kationenaustauschkapazität. Die prinzipielle Vorgehensweise zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (dort für Karten im Maßstab 1:50 000) ist ausführlich in DIEPOLDER (1995) und HÖLTING et al. (1995) beschrieben. Dort finden sich auch Tabellen mit der Punktbewertung der berücksichtigten Parameter. Hohe Punktzahlen bedeuten eine lange Verweildauer des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung und damit eine hohe Schutzfunktion. Die Darstellung der Gesamtschutzfunktion in Karten erfolgt in fünf Klassen von „sehr gering“ bis „sehr hoch“.

In dieses Punktsystem fließen folgende Faktoren ein:

- Böden: Als Parameter dient die nutzbare Feldkapazität (nFK), das Maß für die Speicherfähigkeit an pflanzenverfügbarem Wasser, pauschal bezogen auf 1m Profiltiefe.
- Sickerwasserrate: Das Bewertungsverfahren beruht auf der Betrachtung von Schadstoff-Frachten. Höhere Sickerwassermengen bedeuten eine schnellere Vertikalverlagerung und somit geringere Reaktionszeiten. Erhöhte Sickerwasserraten führen also zu einer Verringerung der Schutzfunktion.
- Gesteinsart der Grundwasserüberdeckung unterhalb des Bodens: Wegen ihrer grundlegend verschiedenen geohydraulischen Gesteinseigenschaften werden Lockergesteine und Festgesteine unterschiedlich bewertet. In der tieferen ungesättigten Zone wird die Reaktionskinetik neben der Sickerwasser-Verweilzeit von der Kationenaustausch-Kapazität des Gesteins bestimmt. Diese korreliert mit der Permeabilität der Gesteine, die in Lockergesteinen vom Feinkornanteil und in Festgesteinen von den strukturellen Eigenschaften bestimmt wird. Grundlage der Bewertung der tieferen ungesättigten Zone bildet daher eine auf der Permeabilität und Länge der Sickerstrecke (= Mächtigkeit) beruhende Abschätzung der Sickerwasser-Verweilzeit. Dabei werden gering durchlässige Lockergesteine aufgrund ihrer großen inneren Oberfläche und damit großen Kationenaustausch-Kapazität relativ hoch bewertet. Tabellen mit Angaben von Punkten pro Meter für verschiedene Locker- und Festgesteine finden sich in DIEPOLDER (1995) bzw. HÖLTING et al. (1995).

- Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung unterhalb des Bodens (ab 1m Profiltiefe): Die Bewertung bezieht sich auf die Strecke bis zur Grundwasseroberfläche. In den gespannten Bereichen ist dies die Strecke bis zur Unterkante der Grundwasserdeckschicht (Grundwasserdeckfläche).
- Schwebende Grundwasserstockwerke: hangende Grundwasservorkommen mit Quellaustritten bekommen aufgrund der Verhinderung oder Verzögerung der Schadstoffverlagerung in den unterlagernden Grundwasserleiter für die Schutzfunktion einen pauschalen Bonus von 500 Punkten aufgeschlagen.
- Wirksame artesische Druckverhältnisse: flächenhaft abgrenzbare Bereiche mit deutlich artesischen Verhältnissen im betrachteten Grundwasserleiter erhalten wegen positiver Wirkung auf die Schutzfunktion einen pauschalen Zuschlag von 1500 Punkten.

Bei der Bewertung der Sickerstrecke wird nur die vertikale Wasserbewegung berücksichtigt, d.h. die Verweildauer der Sickerwässer in den Deckschichten bis zum Erreichen der Grundwasseroberfläche bzw. Deckfläche des betrachteten Grundwasserleiters. Etwaige Abbau- und Sorptionsvorgänge innerhalb des Aquifers gehen nicht in die Bewertung ein.

Der Boden (Bodenarten bis 1 m unter Geländeoberkante) und der Aufbau der weiteren ungesättigten Zone bis zum Erreichen des Grundwassers (frei oder gespannt) werden hinsichtlich der Beurteilung der Schutzfunktion zunächst getrennt bewertet und dann aufsummiert.

6.2 Erstellung der Karten

6.2.1 Vorgehen

Die flächenhafte Berechnung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung nach dem oben beschriebenen Verfahren erfolgte rechnergestützt durch Verschneidung der Informationsebenen, die mit den für die Bewertung notwendigen Einzelinformationen belegt sind. Diese wurden in Rasterzellen mit x-, y-, z-Koordinaten in einem äquidistanten 25 m-Gitterlinienabstand (= Zellgröße 25) dargestellt. Mit dem z-Wert, der je nach Thema verschiedene Informationen beinhaltet (z.B. Wert der nFK, Sickerwasserfaktor, Mächtigkeit etc.) wird der Punktwert für die Schutzfunktion durch Verschneidung nach dem in DIEPOLDER (1995) bzw. HÖLTING et al. (1995) beschriebenen Algorithmus berechnet. Im letzten Bearbeitungsschritt werden die berechneten numerischen Werte der einzelnen Rasterzellen den jeweiligen Klassen der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung zugeordnet.

6.2.2 Bewerteter Grundwasserleiter

Die Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung bezieht sich auf den in den hydrogeologischen Grundlagenkarten dargestellten Grundwasserleiter, bis zu dessen Grundwasseroberfläche, d.h. bis zu dessen Deckfläche bei gespannten Druckverhältnissen. Die bewerteten Grundwasserleiter sind als Beikarte auf der Karte der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (Blatt 4) dargestellt.

In der Region Oberfranken West ist die Abfolge der bewerteten Grundwasserleiter wie folgt:

In den Einheiten des Paläozoikum sowie des Perm im N des Untersuchungsgebietes wird ein großräumig zusammenhängendes, oberflächennahes Grundwasservorkommen vorausgesetzt (Kap.

3.2.1). Zahlreiche Quellaustritte und Brunnen dienen dort als Wasserfassungen der öffentlichen und privaten Wasserversorgung. Mit diesen Stützpunkten und angenommenen Flurabständen von 30 m unter den Bergkuppen wurden theoretische Grundwasserhöhengleichen konstruiert, die in die Bewertung der Schutzfunktion eingingen.

Daran grenzt der Mittlere und Untere Buntsandstein an, der lokal von Schichten des Oberen Buntsandstein und Muschelkalk überdeckt wird.

Mit dem Abtauchen des gesamten Schichtpakets nach SW wird der Muschelkalk als Grundwasserleiter bewertet. Er wird über weite Strecken vom tonig-mergeligen, sandigen, teils dolomitischen Unteren Keuper, in dem häufig gering leitende und Grundwasser führende Abschnitte wechseln, überdeckt.

Der Grenzdolomit wird mit seinem Zutagetreten als oberstes Schichtglied des Unteren Keuper als weiter südlich folgender Grundwasserleiter bewertet. Er wird größtenteils von den Estherien- und Myophorien-Schichten überlagert, in denen tonig-mergelige, gering leitende Gesteinsschichten vorherrschen.

Mit dem Schilfsandstein wird ein weiteres kleinräumiges, lokal bedeutendes Grundwasservorkommen bewertet. Dieses, teils überdeckt von den gering leitenden, vorwiegend tonig-mergelig ausgebildeten Lehrbergschichten, kommt im N und im SW der Planungsregion vor.

Im Hangenden folgt der Sandsteinkeuper als nächster betrachteter Grundwasserleiterkomplex. Er umfasst große Bereiche im W der Planungsregion. Nach den in Kapitel 3 erläuterten hydraulischen Verhältnissen erfolgt bei der Bewertung eine lokale Trennung in Blasensandstein i.w.S., Burgsandstein und Sandsteinkeuper ungegliedert. Diese sind gebietsweise von Schichten des Feuerletten, Rhätolias, Lias, Dogger und untergeordnet auch des Malm überdeckt.

Östlich von Main und Regnitz wird der Rhätolias als weiteres lokal genutztes Grundwasservorkommen bewertet. Die freien Bereiche des Rhätolias sind begrenzt auf den schmalen Ausbiss nahe des Mains und der Regnitz. Der größte Teil dieses Grundwasserleiters ist durch überwiegend gering durchlässige Schichten des Lias und Dogger Alpha bedeckt.

Am Albtrauf wird der Doggereisensandstein (Dogger Beta), zur Alb hin überdeckt mit dem relativ gering mächtigen Dogger Gamma bis Zeta, als weiteres Grundwasserstockwerk bewertet.

Im Bereich der Fränkischen Alb stellt der Malmkomplex mit seinen in unterschiedlicher Intensität geklüfteten bzw. verkarsten karbonatischen Gesteinen einen weiteren bewerteten Grundwasserleiter dar. Er birgt ein regional bedeutendes Karstgrundwasservorkommen mit seichten und tiefen Bereichen. Über weite Strecken fehlt eine Überdeckung.

Die quartären Lockersedimente der Täler, vor allem des Main-Regnitz-Tales, bilden den Abschluss der bewerteten Grundwasserleiter. Ein für diese erstellter Grundwassergleichenplan umfasst auch Bereiche des unteren Leitenbachtals und des unteren Wiesentals.

Insgesamt ergeben sich durch den komplexen Stockwerksbau und die groß- und kleinräumigen Schichtlagerungsverhältnisse in der Region (Abb. 3-1) recht unterschiedliche Bezugshorizonte für die Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung.

6.2.3 Sickerwasserspende und Sickerwasserfaktor

Als Grundlage für die Sickerwasserspende wurden die Karte „Gesamtabfluss unter Berücksichtigung der Nutzung und Bodenart“ des Deutschen Wetterdienstes (DWD 1996), die mit dem Modell HyMo-1 generiert wurde (digitale Rasterkarte mit 400-400 m Pixelweite), und die Konzeptbodenkarten des BAYERISCHEN GEOLOGISCHEN LANDESAMTS im Maßstab 1:25 000 verwendet. Die Daten des DWD umfassen den Gesamtabfluss, d.h. die Sickerwasserspende inklusive Oberflächenabfluss. Die Korrektur des Oberflächenabflusses erfolgte mit dem Simulationsmodell FLOTRA (WAGNER et al. 1997). Dieses dient zur Berechnung des Wasser- und Stofftransports in der wasserungesättigten Bodenzone und bietet die Option, den prozentualen Anteil des Oberflächenabflusses (Ao%) am Gesamtabfluss in Abhängigkeit von der Nutzungs- und der Bodenart zu berechnen. Die Klassifizierung der Sickerwasserspende zu Sickerwasserfaktoren erfolgt in 100-mm-Intervallen (DIEPOLDER 1995).

Wasserhaushaltsmodell HyMo-1 des DWD zur Berechnung der Sickerwasserspende

Messungen und Beobachtungen von 160 Klimastationen des DWD in der Zeit von 1961 bis 1991 bilden die Datenbasis für die Wasserhaushaltskarten von Bayern. Das Wasserhaushaltsmodell HyMo-1 des DWD (RÖTZER 1996) berechnet die einzelnen Elemente des Wasserhaushalts (u. a. die Sickerwassermenge) verschiedener Landnutzungstypen (Grünland, Acker, Wald, Gewässer, versiegelte Flächen) fortlaufend als Tageswerte über einen vorgegebenen Zeitraum.

Grundlage des Wasserhaushaltsmodells ist die Verdunstung nach Penman. Als meteorologische Kennwerte gehen Temperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit, Niederschlag und Sonnenscheindauer ein. Bodenkennwerte sind Feldkapazität, Welkepunkt, nutzbare Feldkapazität und Albedo. Darüber hinaus berücksichtigt ein Schneemodul Schneebildung und -schmelze.

Die Hangneigung beeinflusst bei der Berechnung des Wasserhaushalts die Niederschlagswerte: Im geneigten Gelände vergrößert sich die tatsächlich berechnete Oberfläche im Vergleich zur projizierten Fläche. Dabei wurde angenommen, dass Niederschläge im Mittel senkrecht auf den Untergrund fallen. Ein eventuell höherer Oberflächenabfluss auf den geneigten Flächen blieb unberücksichtigt. Die Oberflächenbeschaffenheit, welche im Wesentlichen den Oberflächenabfluss bestimmt, kann durch dieses Modell nicht wiedergegeben werden. Faktoren wie kapillarer Aufstieg und lateraler Zufluss gehen ebenfalls nicht in die Betrachtung ein.

Exposition und Hangneigung wirken über veränderte Strahlungseinflüsse gegenüber der Ebene auf die Evapotranspiration ein. Die Bestimmung der kurzwelligen Strahlungsbilanz wurde vom DWD nach dem Verfahren Verein Deutscher Ingenieure (VDI 1994) durchgeführt; die langwellige Strahlungsbilanz hingegen über ein einfaches Abschätzungsverfahren nach GEIGER (1961) ermittelt, da dem DWD die für das Verfahren nach VDI (1994) notwendigen Daten nicht zur Verfügung standen.

Auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen wurde die Bodenart in die Berechnung des Wasserhaushalts mit einbezogen. Grundlage hierfür war die Kartierung zum Agrarleitplan, die flächendeckend im Maßstab 1:25 000 in den Jahren 1975 bis 1982 erfolgte (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR BETRIEBSWIRTSCHAFT UND AGRARSTRUKTUR). Diese Karten beschreiben die Ertragsfähigkeit und Nutzungseignung der Ackerstandorte. Da Nutzungseignungen und Ertragsklassen von den unterschiedlichen Standorteigenschaften abhängig sind, konnten aus diesen beiden Parametern die erforderlichen Bodenkenndaten (Bodenart und Feldkapazität) abgeleitet werden.

6.2.4 Anteil des Bodens

Die Bewertung der Schutzfunktion des Bodens erfolgt über die Bestimmung seines Wasserspeichervermögens, d.h. der nutzbaren Feldkapazität (nFK) bis 1 m Tiefe. Dies ist die Summe der nutzbaren Feldkapazitäten aller Bodenhorizonte bis 1 m unter Geländeoberkante. Bei tiefgründigen Bodenentwicklungen von mehr als 1 m Profiltiefe bleiben die tieferen Bodenhorizonte unberücksichtigt.

Die nFK eines Horizonts stammt aus bodenphysikalischen Analysen. Liegen keine Analysenwerte vor, lässt sich die nFK nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA4 (AG BODEN 1994: 295) aus der Bodenart, der Lagerungsdichte und dem Anteil organischer Substanz abschätzen.

Um dem Einfluss der regional unterschiedlichen Klimasituationen auf Böden Rechnung zu tragen, wird der ermittelte nFK-Wert mit dem Sickerwasserfaktor multipliziert. Die so ermittelte Gesamt-nFK wird in 50-mm-Intervallen klassifiziert und mit Punktzahlen korreliert, die aus der Tabelle 47 der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA3 (AG BODENKUNDE 1982) abgeleitet wurden.

6.2.5 Anteil der tieferen Grundwasserüberdeckung

Die tiefere Grundwasserüberdeckung abzüglich des obersten Meters (Boden) beinhaltet die grundwasserfreien Bereiche über dem bewerteten Grundwasserleiter. Die Punktzahlen pro Meter der unterschiedlichen hydrogeologischen Einheiten werden in Anlehnung an DIEPOLDER (1995) ermittelt. Hierzu werden an den einzelnen Modellzellen die jeweiligen Punktwerte mit der Mächtigkeit der ungesättigten Zonen, der anstehenden Einheiten und dem Sickerwasserfaktor multipliziert und aufaddiert.

Berechnung der Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung

Die Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung der Grundwasserleiter mit Hilfe der Grundwassergleichenpläne (Paläozoikum, nicht bedeckter Buntsandstein, nicht bedeckter Muschelkalk, nicht bedeckter Sandsteinkeuper, Malm und Main-Regnitz-Quartär) ergab sich durch Subtraktion der Grundwasseroberfläche vom Digitalen Geländemodell (DGM50).

Ohne vorliegenden Grundwassergleichenplan wurde die Mächtigkeiten pauschal festgelegt. Für den Ausbiss des Grenzdolomit wurde ein Flurabstand von 2 m angenommen, für die Grundwasser führenden Nebentäler von Main und Regnitz von 1 m, d.h. dort wurde nur der Boden bewertet. Für die Ausstrichflächen von Schilfsandstein, Rhätolias und Dogger Beta wurden Flurabstände an Einzelinformationen (z.B. Quellaustritte, Bohrwasserstände etc.) orientiert.

In Bereichen, in denen oben genannte Grundwasserleiter überdeckt vorliegen, bilden die Basisflächen der darüber liegenden hydrogeologischen Einheiten die unteren Grenzen der Überdeckung. Alle relevanten Schichtbasisflächen wurden aus einem 3D-Schichtenmodell der Planungsregion abgeleitet (Kapitel 3.3). So können für jede Modellzelle die Mächtigkeiten der überdeckenden Einheiten aus dem 3D-Schichtstapel und dem DGM berechnet werden.

6.2.6 Einfluss besonderer hydrogeologischer Situationen

Wasser führende Bereiche in der Grundwasserüberdeckung sind in der Planungsregion weit verbreitet. Wegen fehlender Daten zu ihrer lateralen Erstreckung konnten sie bei der flächenhaften Bewertung jedoch nicht überall berücksichtigt werden. Dies betrifft beispielsweise die lokalen schwebenden Grundwasserstockwerke im Sandsteinkeuper, Rhätolias und Malm. Bei der Bewertung berücksichtigte Bereiche erhielten einen Zuschlag von 500 Punkten. So ist die Gesamtschutzfunktion erhöht, wenn z.B. Muschelkalk den Buntsandsteingrundwasserleiter oder Rhätolias den Sandsteinkeuper überdecken.

6.3 Datengrundlagen

6.3.1 Bodenkundlicher Überblick

Landschaftliche Gliederung

Nach der Standortkundlichen Landschaftsgliederung von Bayern (WITTMANN 1991) unterteilt sich die Region 4 in folgende Großlandschaften: Fränkisches Keuper-Lias-Land, Fränkische Alb, Obermain-Schollenland, Fränkische Platte und Frankenwald. Den größten Flächenanteil in der Region stellt das Fränkische Keuper-Lias-Land mit ca. 50%. Es umschließt im N Coburg und reicht bis an den NE von Lichtenfels heran. Im W und S erstreckt sich das Fränkische Keuper-Lias-Land weit über die Regionsgrenzen hinaus. Die Fränkische Alb grenzt im E an das Fränkische Keuper-Lias-Land und ist mit einem Flächenanteil von ca. 20 Prozent die zweitgrößte Landschaftseinheit in der Region. Nördlich bzw. nordöstlich der Fränkischen Alb liegt das Obermain-Schollenland. Es setzt sich weiter in nordwestlicher Richtung fort und umgreift den N des Fränkischen Keuper-Lias-Landes bis hin zu den Randgebieten der Fränkischen Platte, die im NW Coburg zungenförmig in das Regionsgebiet ragen. Mit nur 4 Prozent hat hier die Fränkische Platte den kleinsten Flächenanteil. Im äußersten NE der Planungsregion liegt der Frankenwald mit seinen bewaldeten Höhen und teilweise sehr steilen Taleinschnitten.

Terrestrische Bodenentwicklung

Böden der Fränkischen Alb

Von der Fränkischen Alb liegt die Nördliche Frankenalb mit den Teillandschaften Nördliche Frankenalb mit Kreideüberdeckung und Nördliche Frankenalb lößlehmarm bzw. lößlehmbeeinflusst in der Planungsregion 4.

Böden der Nördlichen Frankenalb mit Kreideüberdeckung

Lediglich am SE-Rand der Region trifft man auf der Albhochfläche Kreidevorkommen größerer Mächtigkeit an. Die daraus entstandenen Böden sind weitgehend karbonatfrei. Aus sandiger Kreide entwickelten sich Braunerden, die unter Wald meist podsoliert sind. Böden aus sandigen bis lehmig-sandigen Kreideablagerungen über schwer durchlässigen sandig-tonigen Schichten weisen oft Vernässungsmerkmale auf. Lehmige Deckschichten oder Lößlehmdeckschichten über tonigem oder lehmig-tonigem Kreidematerial sind zu Braunerden, Braunerden über Pelosolen und Pseudogley-Braunerden verwittert. Sie können im Unterboden teilweise Karbonat führend sein. Fließerden aus schluffig-lehmiger bis sandig-lehmiger Kreideverwitterung bilden Pseudogleye und Braunerde-Pseudogleye aus. Die Böden der Kreidesedimente verfügen im Durchschnitt über eine mittlere Schutzfähigkeit.

Böden der Nördlichen Frankenalb lößlehmmarm/lößlehmbeeinflusst

In Erosionslagen, wie Hangkanten und Kuppen, trifft man in der Nördlichen Frankenalb hauptsächlich Rendzinen und Terra fusca-Rendzinen aus Kalksteinfrostschutt des Malm an. Es handelt sich um die Verwitterungsprodukte ehemaliger Riffe aus dolomitischen Kalk und Dolomitstein. Kleinstmässig haben hier gering mächtige äolische Auflagen dem Abtrag widerstanden und konnten sich zu Braunerde-Rendzinen entwickeln. Die Flachgründigkeit und der häufig hohe Skelettanteil dieser Bodenformen bewirken eine geringe Wasserrückhaltefähigkeit. In erosiv weniger beeinflussten Lagen gehen aus Lößlehm über verwittertem anstehenden Karbonatschutt Braunerden oder flache Braunerden über Terra fusca hervor. Es handelt sich hierbei um Zweischichtprofile, die im Unterboden sehr skelettreich sind. Der Bodenkomplex der Pararendzinen, Braunerden und Braunerde-Terrae fuscae aus Fließerden oder Hangschutt aus Karbonatgestein, zum Teil unter Beteiligung gering mächtiger schluffiger Deckschichten, gestaltet Terrassenflächen und flach ausstreichende Unterhänge.

Böden im Süddeutschen Keuper, und Albvorland und Thüringisch-Fränkischen Bruchschollenland

Aufgrund der bodenkundlichen Konkordanz werden die Böden der landschaftlichen Teilräume Fränkisches Keuper-Lias-Land, Nördliche Fränkische Platte und Obermain-Schollenland gemeinsam beschrieben.

In der Fläche überwiegt der Bodentyp der Braunerde. Braunerden treten im Verbreitungsgebiet der Keupersandsteine und im Albvorland am häufigsten auf. So bilden sich in Gegenden mit fehlender bzw. nur geringer Deckschichtenaufgabe über den Sandsteinen sehr sandige und in der Regel saure Braunerden. In von Deckschichten beeinflussten bzw. in tongründigen Landschaften hingegen überwiegen basenreiche Braunerden.

Auch im Bereich des Sandsteinkeuper und Rhät (Blasen-, Burg- und Rhätsandstein) kommen in erster Linie Braunerden vor. Bei nur geringer Überdeckung oder gar fehlenden Deckschichten ist unter Nadelwaldnutzung eine Weiterentwicklung der Braunerden zu Podsolen möglich. Die zwischenlagernden Letten wirken häufig Wasser stauend und führen zur Ausbildung von Pseudogleyen. Auch Deckschichten über Feuerlettentonen weisen oft hydromorphe Merkmale auf. In exponierten und morphologisch randständigen Lagen fehlt über dem Feuerletten die Überdeckung; dort herrschen Pelosole vor. Vorzugweise in Mittel- und Unterhangbereichen sowie auf Verebnungen entstanden Braunerden und Pseudogley-Braunerden aus lößlehmdominierten Deckschichten über sandiger Verwitterung des Rhäts oder Feuerletten.

Die Bodenformen, die auf Gipskeuper entstehen, sind in Abhängigkeit vom Bodensubstrat und den lokalen Wasserverhältnissen sehr variabel. Den überwiegenden Anteil stellen hierbei Braunerden und Pseudogleye, die vor allem auf Myophorienschichten vorkommen, soweit hier Deckschichten vorhanden sind. Ansonsten finden sich Regosole aus Tonen und Pelosole auf diesen Schichten.

Auf den mergeligen Estheriensichten treten verbreitet Pararendzinen auf. Der Schilfsandstein streicht nur kleinflächig aus. Aus seinem Substrat entstehen vorwiegend Braunerden. Treten an den Hängen die Lehrbergschichten auf, so haben sich dort meist Tonregosole oder Pelosole entwickelt.

Im Albvorland ermöglichen die kalkfreien bzw. kalkarmen Tone des Lias Beta und Lias Delta die Genese von Pelosolen und Pelosol-Braunerden. Sind mächtigere äolische Beimengungen vorhanden, entstehen Braunerden. Die karbonathaltigen und -reichen Lias Gamma- und Lias Epsilon-Gesteine begünstigen die Ausbildung von Pararendzinen, kalkhaltigen Pelosolen und

Kalkbraunerden. Im flachwelligen Bereich, bei verhaltener Gebietsentwässerung, kommt es häufig zu Stauwassereinfluss.

Dogger Alpha und Dogger Beta zeigen in Bezug auf ihre bodentypologische Vielfalt ein unterschiedliches Bild. Der Opalinuston verfügt über eine mannigfaltige Bodenformenausbildung. Unterschiedliche Hangschutt- und Fließerdedecken sowie Schichtwasseraustritte bewirkten die Entstehung von Braunerden, (Hang-)Pseudogleyen, (Hang-)Gleyen und an exponierten Lagen auch von Pelosolen. Auf den häufig steilere Hänge bildenden Sandsteinen des Dogger Beta ist der Subtyp der Sauren Braunerde der am weitesten verbreitete Boden. Die im Liegenden vorhandenen Tone des Opalinustons sorgen an der Basis des Eisensandsteins oft für staunasse Böden. Substrate mit hohem Sandanteil oder flachgründige Böden haben eine geringe Schutzfunktion. Bei überwiegend lehmiger bzw. toniger Verwitterung oder bei Auflage lehmiger Deckschichten hingegen verfügen die Böden im Durchschnitt über eine gute bis sehr gute Schutzfähigkeit.

Flächenbedeutsame Muschelkalk- und Buntsandsteinvorkommen treten im nordöstlichen Obermain-Schollenland auf. Im Vergleich zu den Hauptverbreitungsgebieten des Buntsandstein in Odenwald, Spessart und Rhön ist er im schmalen Streifen des Bruchschollenlandes nur mit kleineren Vorkommen vertreten. Für die Bodenbildung relevant sind hier sowohl Substrate der Rand- wie auch der Beckenfazies.

Im Bereich der Randfazies sind Braunerde-Regosole, Braunerde-Podsole und Braunerden miteinander vergesellschaftet. Das Bodenausgangssubstrat sind deckschichtenfreie feinkiesige, feingrünsige Quarzsande, sowie lehmige bzw. schluffige Sande. Die Sande sind teilweise kaolinisiert, gelegentlich im Unterboden verdichtet und häufig stark gebleicht. Das Farbenspiel geht von weiß, gelblichweiß bis rosa. Auf flachen Hängen, in Mulden und Verebnungen besteht die Tendenz zur Ausbildung von Pseudogley-Braunerden und pseudovergleyten Braunerden. Durch die stark gebleichte Grundfarbe der Sande sind Hydromorphiemerkmale meist nur schwach zu erkennen. Auf Hängen mit geringer Neigung liegen Braunerden aus Deckschichten unterschiedlicher Herkunft über Lehmen und lehmigen bis kiesigen Sanden des Buntsandstein. Die Deckschichten entstammen der Permo-Trias, dem Kristallin, aber auch Lößlehm ist anzutreffen und umgelagerte Verwitterungsprodukte des Buntsandstein. Bodengesellschaften mit hohem Sandanteil haben eine geringere Wasserrückhaltefähigkeit und eine entsprechend niedrige Schutzfunktion. Mit zunehmendem Lehmanteil nimmt diese Schutzfähigkeit zu, bleibt aber im verlagerungsgefährdeten Bereich.

Im Bereich der Beckenfazies dominiert ebenfalls Sand als Bodenbildner. Unter Fichten- und Kieferwäldern gehen aus der sandigen Verwitterung des Buntsandstein oder aus den zum Teil vorhandenen sandigen Deckschichten Podsole und Übergangsformen bis zu Podsol-Braunerden hervor. Braunerden und Pseudogley-Braunerden, örtlich auch Regosole und Pelosole aus lehmiger bis toniger Verwitterung des Buntsandstein (Röttone), finden sich bevorzugt in Ebenen und an flachen Hangbereichen. Liegen gelegentlich Deckschichten auf, so handelt es sich meist um Kryolehme; lehmige Fließerden spielen eine eher untergeordnete Rolle. Überdecken sandige Schichten die lehmig-tonigen Verwitterungen, so entwickeln sich Braunerden und podsolige Braunerden; auf Verebnungen und flachen Hängen macht sich Stauwassereinfluss bemerkbar und es kommt zur Ausbildung von Pseudogley-Braunerden.

Aus skeletthaltiger, schluffig-toniger Mergelsteinverwitterung des Muschelkalk sind auf Hochflächen und in Muldenlagen Pararendzinen entstanden, die teilweise bis zur Braunerde-Pararendzina entwickelt sein können. Staunässe ist in der Regel nicht erkennbar. An Steilhängen, aber auch auf Hochflächen entwickelten sich aus sehr skelettreicher lehmig-toniger Kalksteinverwitterung des Muschelkalk flachgründige Pararendzinen, gelegentlich Rendzinen oder Braunerde-Pararendzinen.

Deckschichten sind selten. Diese wenig entwickelten oder auch skelettreichen Böden haben eine geringe Wasserrückhaltefähigkeit und damit eine sehr geringe Schutzfunktion. In erosionsgeschützten Lagen, wie Verebnungen oder flachstreichende Hangbereiche, sind mittel- bis tiefgründige Braunerden anzutreffen. Sie sind aus skeletthaltiger, lehmiger Deckschicht über lehmig-toniger Kalk- und Mergelsteinverwitterung des Muschelkalk entstanden. Die Lehm- und Tongehalte in diesen Substraten führen verbreitet zu einer guten Schutzfunktion der Böden.

Böden des Frankenwalds

Im Frankenwald, der im NE die Region beschließt, sind schwerpunktmäßig Substrate alter Ergussgesteine, Tonschiefersubstrate und quarzitischeschiefrige Substrate als Bodenausgangsgesteine zu nennen. Charakteristisch ist hierbei der häufig hohe Skelettanteil. Man kann schwach bis stark skeletthaltige (< 50 Volumen-%) und sehr stark bis extrem skeletthaltige Substrate (> 50 Volumen-%) unterscheiden. Die Leitbodengesellschaften sind demnach \pm steinige bis grusige Braunerden bis hin zu Podsol-Braunerden. Auf leicht gewellten Hochflächen und in Hangbereichen mittlerer Steilheit entwickelten sich die Braunerden aus steinärmeren, lehmigen, oft auch lößlehmhaltigen Deckschichten. In flachen Mittel- und Unterhangbereichen tritt im Unterboden häufig Staunässe auf.

Im Bereich alter Ergussgesteine finden sich außerdem Extremstandorte mit Rohböden und Rankern aus Block- und Felssubstraten. Sie liegen punktuell an Felsrippen, Prallhängen der Bachanschnitte, auf Blockschutthalden und an durch Solifluktion freigestellten Kuppen. Auf diesen Standorten kann sich nur in geschützten Spalten Feinerde akkumulieren und zu Braunerde weiter entwickeln.

Steile Taleinschnitte gliedern die Landschaft. Die Flanken dieser Täler sind teils mit Braunerden, teils mit Rankern oder Regosolen bedeckt. Sie bestehen aus sehr skelettreichen, lehmigen Steilhangsubstraten quarzitischeschiefrigen bzw. tonschiefrigen Ursprungs. In Tälern und Senken treten Gleye und deren Übergangsformen auf. Sie sind vom umliegenden Gesteinsmaterial geprägt. Das Spektrum reicht – je nach Einzugsbereich – von sandigen, kiesig- bzw. grusig-sandigen Talsedimenten bis hin zu lehmigen und schluffigen Substraten.

Rohböden und Ranker aus Block- und Felssubstraten sowie skelettreiche Bodengesellschaften haben eine sehr geringe Wasserrückhaltefähigkeit und damit die niedrigste Schutzfunktionsstufe. Mit zunehmendem Lehm- bzw. Lößlehmanteil steigt die Schutzfähigkeit an, bleibt aber im verlagerungsgefährdeten Bereich.

Semiterrestrische Bodenentwicklung

Grundwasserböden

In rezenten Talbereichen entwickelten sich unter Grundwassereinfluss aus karbonatfreien sandig-lehmigen bis schluffig-lehmigen Talsedimenten Gleye und Braunerde-Gleye, aus sandigen bis kiesig-sandigen Talsedimenten auch Gley-Braunerden, die stellenweise auch podsolig sind. Je nach Einzugsgebiet variiert das Substrat und kann außerdem grusiges Verwitterungsmaterial grobkörniger Granite beinhalten.

Anmoorgleye und humusreiche Gleye, stellenweise auch Niedermoorgleye aus grusigen, kiesigen oder sandigen teils steinigen Substraten trifft man in rezenten Tälern an, häufig auch in weiten Hangmulden, Wannern, flachen Unterhängen und Verebnungsflächen außerhalb der rezenten Talbereiche. Mit vergesellschaftet sind Gleye und Braunerde-Gleye mit Übergängen zu Pseudogleyen.

Auf Grund ihrer nutzbaren Feldkapazität ist die Verlagerungsgefährdung im Bereich dieser Grundwasserböden geringer. Sie haben eine mittlere Schutzfunktion.

Böden der Auenlandschaft

Auenböden entstehen in Fluss- und Bachtälern, die wiederkehrend überflutet werden, aus holozänen fluviatilen Sedimenten. Sie besitzen einen stark schwankenden Grundwasserspiegel, der häufig an den Wasserspiegel des Fließgewässers gekoppelt ist. Die Beschaffenheit der Sedimente und die damit verknüpfte Bodenbildung variiert entsprechend den geologischen Verhältnissen im jeweiligen Einzugsgebiet des transportierenden Gewässers.

Im Talbereich der Wiesent finden sich deshalb im Wechsel mit Karbonat freien auch Karbonat führende Auensedimente. Kalkpaternien, Gley-Kalkpaternien und Kalkvegen mit Übergängen zu Auenkalkgleyen aus karbonathaltigen, sandigen, schluffigen und lehmigen Flusssedimenten sind hier vergesellschaftet.

Im Schwemmbereich des Main (mit Roter Main, Weißer Main) und den Flusstälern von Unterer Steinach, Regnitz und Aisch sind die Auenböden karbonatfrei. Es handelt sich meist um skelettarme, sandige, lehmig-sandige, aber auch tonig-lehmige Fluss-Sedimente unterschiedlicher Entwicklungstiefe. Eng miteinander vergesellschaftet sind hier Vegen und ihre Übergangsformen, die Vega-Gleye.

Die Wasserrückhaltefähigkeit ist, bei nFK-Werten von 150 mm/dm bis über 250 mm/dm, mittel bis sehr hoch. Wegen des hoch anstehenden Grundwassers sind Flussauen, trotz ihrer guten bodenphysikalischen Eigenschaften, sensible Bereiche im Hinblick auf ihre Schutzfähigkeit.

6.3.2 Bewertung Deckschichten

Die durchschnittlichen Deckschichten-Zusammensetzungen wurden mittels Bohrprofilbeschreibungen, Literaturangaben und Geländebeobachtungen ermittelt. Jeder Deckschichten-Zusammensetzung wurde ein nach den Tabellen in DIEPOLDER (1995) bzw. HÖLTING et al. (1995) aus der Lithologie abgeleiteter Punktwert pro Meter (im Folgenden: Pkte/m) zugewiesen.

Zur Berechnung der Schutzfunktion der Deckschichten wurden an jedem Rasterpunkt jeweils die Punktwerte mit den Mächtigkeiten der jeweiligen Deckschichten und dem Sickerwasserfaktor multipliziert. Zur Bestimmung der Deckschichtenmächtigkeit lagen zum Teil nur lückenhafte Bohrdaten vor. Dann basiert die Berechnung auf Abschätzungen und pauschalen Annahmen.

In der Planungsregion sind präquartäre und quartäre Deckschichten unterschiedlicher Genese und Zusammensetzung zu unterscheiden. Präquartäre Deckschichten kommen auf der Nördlichen Frankenalb als Kreideablagerungen oder als Verwitterungsbildungen des Tertiär, sogenannten Alblehme vor. Quartäre Deckschichten sind Löss, Lößlehme und Kalktuffe, Flugsande, Anmoore, Flussablagerungen, umgelagerte Lehme und Schuttdecken verschiedener Zusammensetzungen und Genese. Zur Schutzfunktionsberechnung wurden die Deckschichten nach Substrateigenschaften zusammengefasst, ungeachtet von Genese und Stratigraphie.

Kreideablagerungen

Die limnisch-fluviatilen Ablagerungen der Oberen Kreide sind auf den Hochflächen der Nördlichen Frankenalb reliktdartig vorhanden. Sie füllen oft Hohlräume des Malmkarst in wenigen Metern Mächtigkeit, häufig < 1 m, aus. In tektonischen Mulden und Randtrögen sind die Kreidesedimente oft mächtiger und bestehen größtenteils aus Feinsand mit Buntton-Einschaltungen über mittel- bis grobkörnigen Quarzsandsteinen. Die Ablagerungen wurden als Deckschicht aus Lockergesteinen mit wechselnder Porendurchlässigkeit mit einem je nach Ausbildung und Mächtigkeit mäßigen bis geringen Filtervermögen eingestuft. Sie wurden entsprechend ihrer Zusammensetzung aus Sanden bis kiesigen Sanden und sandigen Kiesen nach DIEPOLDER (1995) mit 15 Pkte/m bewertet.

Deckschicht mit vorwiegend tonig-lehmiger Ausbildung (undifferenziert)

Alblehme, Löss, Lößlehme und umgelagerte Lehme aus tonigen bis schluffigen, teils sandigen Substraten wurden für die Deckschichtenbewertung zu Deckschichten mit vorwiegend tonig-lehmiger Ausbildung zusammengefasst.

Die Alblehme sind Verwitterungsreste aus Kreide- und Malmschichten, die unter tropischen Klimaten des Tertiär entstanden. Mit zunehmender Abtragung der Kreide und erneuter Verkarstung des Malm im Tertiär und Quartär wanderten die Alblehme immer weiter in die Talwannen und Vertiefungen der Albhochfläche. Dort stehen sie heute bevorzugt und in größerer Mächtigkeit an. Im Quartär wurden sie durch Solifluktion mit meist sandigen Kreidesedimenten, jüngeren Braunlehmen und älteren Lößlehmen vermischt. Seltener treten autochthone rötliche oder gelbbraune Malm-Verwitterungslehme und sandige Braunlehme aus Kreidesanden und -sandsteinen auf.

Löß-, Lößlehm- und Sandlößablagerungen kommen vor allem im Bereich von Main und Regnitz, im Albvorland sowie an den Nord- und Osthängen der Albhochfläche vor. Lokal erreichen sie mehrere Meter Mächtigkeit, auf der Albhochfläche maximal 3 m. Löss sind ockerbraune bis goldbraune, teilweise graubraune, locker gelagerte, kalkreiche, feinsandige Schluffe, die durch Frost- und Temperaturverwitterung der Gesteinsoberflächen während der Kaltzeiten entstanden. Sie wurden aus vegetationsarmen Schotterfluren und Kältewüsten ausgeblasen und in windgeschützten Lee-lagen und vegetationsreicheren Gebieten abgelagert und wieder festgelegt. In wärmeren Klimaten entkalkte und verlehnte der Löß und wurde zu Lößlehm. Reiner Rohlöß tritt fast nur auf der Albhochfläche auf. An Hängen ist der Löß mit Gesteinsschutt höher anstehender Schichten solifluidal durchmischt. Auf der Albhochfläche kommt neben Löß vor allem sandiger Lehm vor. Dieser besteht größtenteils aus Lößlehm und sandigen Verwitterungs- und Umlagerungsprodukten der erodierten Gesteinsserien, meist aus Kreideablagerungen.

Für die hydrogeologische Kartierung wurden die über das Untersuchungsgebiet weit verbreiteten Deckschichten mit vorwiegend tonig-lehmiger Ausbildung als Deckschichten aus Lockergesteinen mit sehr geringer bis äußerst geringer Porendurchlässigkeit eingestuft. Bei einer Mächtigkeit unter 3 m wurde die Verbreitung als geringmächtig und/oder lückenhaft beschrieben. Die über weite Bereiche vorkommenden tonigen bis schluffigen Deckschichten wurden pauschal mit 220 Pkte/m bewertet.

Deckschichten mit vorwiegend sandiger Ausbildung (undifferenziert)

Sandige Albüberdeckung aus Kreideverwitterung, lehmiger Sand des Albvorlandes, ältere Flussablagerungen bzw. Terrassensande der Regnitz und der Nebentäler sowie mächtige Flugsandflächen wurden für die Bewertung als Deckschichten mit vorwiegend sandiger Ausbildung zusammengefasst.

Löß- und Lößlehmablagerungen mit hohem Sandanteil sowie gelbbraune Alblehme mit häufig hohen Quarzanteilen der Kreide, Hornsteinen und Kieselrelikten des oberen Malm wurden wegen ihres hohen Sandanteils ebenfalls dieser Deckschichtengruppe zugeordnet. Die sandigen Deckschichten sind geringer verbreitet als die vorhergehenden tonig-schluffigen. Große Areale liegen vor allem in den Muldenlagen der Nördlichen Frankenalb. Dort handelt es sich größtenteils um sandige Verwitterungsprodukte der Kreide. Großflächige mächtige sandige Deckschichten treten besonders in den Terrassenbereichen der Regnitz westlich und südwestlich Bambergs auf.

Für diese Lockersedimente mit einer geringen bis mäßigen Porendurchlässigkeit und einem mittleren bis mäßigen Filtervermögen werden 90 Pkte/m (entspricht z.B. Sand, lehmig, stark schluffig) angesetzt.

Deckschicht mit stark wechselnder Zusammensetzung

Deckschichten mit stark wechselnder Zusammensetzung beinhalten das gesamte Korngrößen-spektrum von Ton bis Schluff, Sand, Kies bis Blöcke. In der Planungsregion handelt es sich meist um Block-, Hang- oder Solifluktionsschutt mit stark wechselnder Zusammensetzung oder um Löß der größtenteils aus Lößlehm vermischt und/oder unterlagert wird von Verwitterungs- und Umlagerungsprodukten der erodierten Gesteinsserien. Grobkörnige Deckschichten mit Mächtigkeiten < 3 m treten im Untersuchungsgebiet meist an Hängen und Steilkanten der Täler auf. Am Albrand liegen mächtige Kalkschuttdecken aus Malmkalkbruchstücken und sandigem Dogger Beta-Schutt mit einer lehmigen Matrix aus Lias- und Doggermaterial. Größere Schotterflächen finden sich im Mündungsgebiet der Nebentäler des Mains. Diese bedeckt oft ein Lößlehmschleier. Bergrutsche treten häufig an Steilhängen im Bereich von Quellen an Ton/Sandstein- oder Ton/Kalkstein-Grenzflächen auf. Auf aufgeweichten Tonen rutschen die Gesteinsmassen hangabwärts, häufig an der Dogger/Malm-Grenze und im Feuerletten.

Bei einer Mächtigkeit größer 3 m werden die Deckschichten als Deckschichten aus Lockergesteinen mit wechselnder Porendurchlässigkeit eingestuft. Oft sind die Deckschichten geringmächtiger als 3 m und werden dann als Deckschichten mit wechselnder Porendurchlässigkeit und geringmächtiger und/oder lückenhafter Verbreitung eingestuft. Sie werden mit 150 Pkte/m bewertet.

Flugsand

Flugsand ist aus Flussterrassen ausgewehter Fein- bis Mittelsand. Die Sandkörner sprangen bodennah, wurden so über vergleichsweise geringe Strecken verlagert, und bildeten Flugsandfelder oder Dünen in Flussnähe. Mächtigere Flugsanddecken sowie hohe Dünenrücken liegen auf den Terrassen von Main und Regnitz.

Insgesamt ist der Flugsand geringmächtig, durchschnittlich 1 m. Er wird dann als Deckschicht aus Lockergestein mit geringer bis mäßiger Porendurchlässigkeit und geringmächtiger und/oder lückenhafter Verbreitung eingestuft, ist er mächtiger als 3 m als Deckschicht aus Lockergestein mit geringer bis mäßiger Porendurchlässigkeit. Die größtenteils feinsandigen Deckschichten wurden mit 25 Pkte/m bewertet.

Bach- oder Flussablagerungen (mit untergeordnet polygenetischen Ablagerungen) mit hohem Feinkornanteil

Bach- oder Flussablagerungen mit hohem Feinkornanteil sind geringmächtige Talfüllungen, die sich vorwiegend aus Schottern und Auelehmen zusammensetzen. Die Schotterzusammensetzung wird vom jeweiligen Fließgewässer-Einzugsgebiet bestimmt. Im Albvorland sind größtenteils der Malm und Dogger, westlich von Main und Regnitz meist der Sandsteinkeuper und im Bruchschollenland der Buntsandstein Materiallieferanten. Im Frankenwald handelt es sich überwiegend um quarziti-sche Verwitterungsrückstände. Die Talfüllungen der Trockentäler auf der Albhochfläche bestehen aus Malmschutt, Lößlehm, Albverwitterungslehm und abgeschwemmten Kreidesedimenten.

Geringmächtige Deckschichten (< 3 m) werden in der Schutzfunktionskarte als Deckschicht aus Lockergestein mit wechselnder Porendurchlässigkeit und geringmächtiger und/oder lückenhafter Verbreitung eingestuft. Bei Mächtigkeiten von mehr als 3 m als Deckschicht aus Lockergestein mit wechselnder Porendurchlässigkeit. Die Bewertung erfolgte mit 90 Pkte/m.

Flussschotter und Sande mit hohem Feinkornanteil

Entlang des Maintals und dessen nördlichen Nebentälern, besonders an der Itz und an der Stein-ach im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets, finden sich Terrassen aus Flussschottern und -sanden mit hohem Feinkornanteil. Im Vergleich der zuvor genannten Bach- oder Flussablagerungen besitzen diese einen gering höheren Sandanteil. Deshalb werden die zum Teil mehrere Meter mächtigen Terrassen mit 75 Pkte/m bewertet. Die Flussschotter und -sande wurden genauso wie die Bach- oder Flussablagerungen mit hohem Feinkornanteil (s.o.) abhängig von ihrer Mächtigkeit als Deckschichten aus Lockergestein mit mittlerer bis sehr hoher Porendurchlässigkeit bzw. Deckschichten aus Lockergestein mit mittlerer bis sehr hoher Porendurchlässigkeit und geringmächtiger und/oder lückenhafter Verbreitung dargestellt.

Grundwasserfreie Flussschotter und -sande

Die vorwiegend sandig-kiesigen Terrassenschotter unterschiedlicher Mächtigkeiten aber ohne nennenswerte Grundwasserführung treten besonders an den Talrändern des Mains, weniger entlang der Regnitz, auf. Sie werden genauso wie die Flussschotter und -sande mit hohem Feinkornanteil (s.o.) eingestuft, erhalten aber wegen der höheren Durchlässigkeit und des geringeren Feinkornanteils nur 10 Pkte/m bei der Bewertung der Schutzfunktion.

Kalktuffe

Kalktuff bildet sich an Quellaustritten nahe der Dogger/Malm-Grenze durch Ausfällung des im Wasser gelösten Calciumkarbonats in Form von Kalktuff, Quelltuff und Quellschlamm. Die auch als Sinterkalk bezeichneten Deckschichten besitzen eine sehr geringe bis äußerst geringe Porendurchlässigkeit. Die Bewertung erfolgte mit 5 Pkte/m. Mächtige Kalktuffdeckschichten liegen in den Tälern zwischen Ützing und Serkendorf sowie Schwabthal und Stublang.

Anmoor

Hierbei handelt es sich um eine Deckschicht aus vorwiegend organischen Ablagerungen mit hohem Wasserspeichervermögen und geringer Durchlässigkeit. Sie wird mit 400 Pkte/m bewertet.

Künstliche Auffüllungen und Aufschüttungen

Großflächige künstliche Auffüllungen (z. T. versiegelt) treten vor allem in städtischen Gebieten, in Form von Halden, im Bereich des Bamberger Hafens sowie im Bereich des Main-Donau-Kanals auf (Bewertung 100 Pkte/m).

6.3.3 Bewertung Festgestein

Unterhalb von Boden, präquartären und quartären Deckschichten beginnt die tiefere Grundwasserüberdeckung des bewerteten Grundwasserleiters. Sie reicht bis zur Grundwasseroberfläche bzw. Grundwasserdeckfläche bei gespannten Verhältnissen und setzt sich aus dem „grundwasserfreien“ Teil der bewerteten Grundwasserleiter und den gegebenenfalls darüber liegenden hydrogeologischen Einheiten (Kap. 6.2.2 und Abb. 3-1) zusammen.

In Tabelle 6-1 sind die Punktwerte pro Meter Mächtigkeit der jeweiligen hydrogeologischen Einheit für die Berechnung der Schutzfunktion dargestellt. Diese wurden bei ausreichender Datendichte nach WAGNER (2000) über die Schichtenverzeichnisse von Bohrungen, ansonsten pauschal nach den Tabellen in DIEPOLDER (1995) ermittelt.

6.4 Aussagen zur Schutzfunktion

Die Karte der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung kann – entsprechend ihres kleinen Maßstabes 1:100 000 – nur überörtliche Gegebenheiten darstellen. Für kleinräumige Bewertungen und örtliche Planungen bleiben Spezialuntersuchungen unbedingte Voraussetzung.

Im Paläozoikum und Perm schützt die Überdeckung das Grundwasser meist nur in sehr geringem bis geringem Maß. Dies liegt vor allem an den fehlenden oder geringmächtigen bindigen Deckschichten und dem darunter liegenden Auflockerungsbereich mit sehr geringem Filtervermögen. Auch die Böden mit steinig bis grusigen, skelettreichen Ausbildungen tragen kaum zu einer Verbesserung der Schutzfunktion bei. Die zum Teil hohen Niederschläge (bis 1050 mm) verursachen zudem geringe Verweilzeiten der Sickerwässer in der Grundwasserüberdeckung, was die Schutzfunktion zusätzlich einschränkt.

Im Ausstrich des Unteren und Mittleren Buntsandstein fehlen über weite Strecken mächtige Deckschichten, so dass das wasserwirtschaftlich bedeutende Grundwasservorkommen weitgehend durch die grundwasserfreien Bereiche des Grundwasserleiters selbst geschützt wird. Diese Überdeckung weist in der Regel nur bei größeren Flurabständen eine gewisse Schutzfunktion auf, da infolge der Gesteinsausbildung (vorwiegend Sandsteine) und durchschnittlichen Wasserwegsamkeit generell mit einem geringen Filtervermögen zu rechnen ist. An Stellen mit einer Überdeckung durch den Oberen Buntsandstein und Muschelkalk ist die Schutzfunktion verbessert. Bei Ersterem wirken sich vor allem die gering durchlässigen Röttone und das zwischengelagerte schwebende Grundwasservorkommen im Rötquarzit positiv auf die Bewertung aus. Letzterer trägt in seiner Eigenschaft als Grundwasserleiter zusätzlich zur Verbesserung der Schutzfunktion bei. So ist die Schutzfunktion in Bereichen mit geringen Flurabständen und ohne Bedeckung sehr gering bis gering, in Bereichen hoher Flurabstände und Überdeckung durch hangende Einheiten mittel bis hoch.

Tab. 6-1: Bewertung (Punktzahlen) der Grundwasserüberdeckung nach den Tabellen in DIEPOLDER (1995), gegliedert nach hydrogeologischen Einheiten

Hydrogeologische Einheit	Gesteinsart, Klüftung, etc.	Bewertung	Punkte/ Meter
Paläozoikum	Tonschiefer, Sandstein und Quarzit mit variabler Klüftung	Pauschal	15
Buntsandstein	Sandstein mit Tonsteinlagen, mittel geklüftet	Pauschal	17
Muschelkalk	Kalkstein geklüftet, teilweise verkarstet	Pauschal	10
Unterer Keuper	Ton-, Mergel-, Sand- und Dolomitstein mit variabler Klüftung	Pauschal	17
Grenzdolomit	Dolomitstein geklüftet	Pauschal	14
Estherien- und Myophorien-Schichten	Ton-, Mergelstein, wenig geklüftet	Pauschal	40
Schilfsandstein	Sandstein, Tonstein, wenig bis mittel geklüftet	Pauschal	20
Lehrbergschichten	Ton-, Mergelstein, wenig geklüftet	Pauschal	40
Coburger und Blasensandstein	Sandstein mit Tonsteinlagen, wenig bis mittel geklüftet	S-Wert (304 Stützpunkte)	17
Burgsandstein	Sandstein mit Tonsteinlagen, wenig bis mittel geklüftet	S-Wert (959 Stützpunkte)	20
Sandsteinkeuper (ungegliedert)	Sandstein, Tonstein, wenig bis mittel geklüftet	Pauschal	18
Feuerletten	Ton-, Mergelstein, wenig geklüftet	Pauschal	40
Rhätolias	Sandstein, Tonstein, mittel geklüftet	Pauschal	17
Posidonienschiefer bis Turneri-Raricostaten-Schichten (Lias Alpha und Beta)	Tonstein, Mergelstein Kalkstein, mittel geklüftet	Pauschal	20
Jurensismergel bis Opalinuston (Lias Zeta und Dogger Alpha)	Tonstein, Mergelstein, wenig geklüftet	Pauschal	40
Doggereisensandstein	Sandstein, mittel geklüftet	Pauschal	15
Eisenoolithkalk und Ornatenton (Dogger Gamma bis Zeta)	Mergelstein, Mergelkalkstein, wenig geklüftet	Pauschal	30
Malm	Kalkstein, Dolomitstein, geklüftet und verkarstet	S-Wert (109 Stützpunkte)	5
Quartär (Talfüllung)	Schotter	S-Wert (3480 Stützpunkte)	25

In Bereichen, in denen der Muschelkalk-Grundwassersleiter obertägig ausstreicht, ist die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung meist als sehr gering einzustufen. Einerseits fehlen schützende Deckschichten weiträumig, andererseits weisen die klüftigen, örtlich auch verkarsteten Karbonatgesteine selbst keine nennenswerte Filterfunktion auf. Das Wasserrückhaltevermögen der zu meist skelettreichen Böden ist gering, weshalb sie auch die Schutzfunktion nicht aufwerten. Andere Verhältnisse zeigen sich beim bedeckten Muschelkalk. Hier werden bei ausreichend mächtiger Überdeckung mit Gesteinen des Unteren Keuper mittlere bis hohe Bewertungen erreicht. Lokal dürfen sich die schwebenden, meist kleinräumigen Grundwasserhorizonte im Unteren Keuper zusätzlich positiv auf die Bewertung der Schutzfunktion auswirken. Sie wurden hier aufgrund fehlender Detailkenntnisse allerdings nicht berücksichtigt.

Im Ausbissbereich des Grenzdolomits ist das Grundwasser wegen des geringen Flurabstands, der fehlenden Deckschichten und dem eigenen geringen Filtervermögen „gering“ geschützt. Der Grundwasserleiter wird über weite Gebiete von den Estherien- und Myophorienschichten des Gipskeuper überdeckt. Diese bieten schon bei relativ geringen Mächtigkeiten aufgrund der überwiegend tonig-mergeligen Ausbildung einen hohen Schutz für das Grundwasser im Grenzdolomit.

Das Grundwasser im unbedeckten Schilfsandstein ist wegen überwiegend geringer Flurabstände meist nur sehr gering geschützt. Mit zunehmender Überdeckung durch die Grundwasser gering leitenden Ton- und Tonmergelgesteine der Lehrbergsschichten steigt die Schutzfunktion auf „mittel“ an. Flächenmäßig sehr begrenzt fließen auch die Böden, meist Tonregosole oder Pelosole, mit bis zu 750 Punkten in die Schutzfunktionsbewertung ein und werten so die Schutzfunktion gebietweise auf.

Die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung zeigt im gesamten unbedeckten Sandsteinkeuper eine vom Flurabstand und der Bodenaufgabe kontrollierte Bewertung, da Deckschichten weitestgehend fehlen bzw. nicht kartiert wurden. Deshalb und wegen der gesteinspezifischen Bewertung des grundwasserfreien Bereichs reichen dort die Schutzfunktionsklassen nur von sehr gering bis mittel. In Gebieten, in denen der Grundwasserleiterkomplex von anderen hydrogeologischen Einheiten überdeckt ist, erhöht sich die Gesamtschutzfunktion zum Teil um mehrere Klassen. Bei Überdeckung mit dem Grundwassergeringleiter Feuerletten wird dann häufig eine hohe Schutzfunktion erreicht. Im Verbreitungsgebiet des Rhätolias über Feuerletten wird das Grundwasser im Sandsteinkeuper zusätzlich vor potenziellen Schadstoffeinträgen geschützt, da sich hier die schwebenden Grundwasservorkommen im Rhätolias positiv auf die Schutzfunktion auswirken. Insgesamt werden im überdeckten Sandsteinkeuper mittlere bis sehr hohe Schutzfunktionswerte erreicht.

Im Albvorland, östlich der Regnitz, steigt die Schutzfunktionsbewertung für das Grundwasser im Rhätolias mit zunehmender Mächtigkeit der Überlagerung und in Richtung der Frankenalb von sehr gering bis auf sehr hoch an. In Bereichen des unbedeckten Grundwasserleiters geht die Schutzfunktion nicht über „sehr gering“ bis „gering“ hinaus. Der Lias (Lias Beta bis Lias Epsilon) mit seinen lokal schwebenden Grundwasservorkommen sowie die hangende Abfolge vom Lias Zeta bis Dogger Alpha, in der in der Regel der Opalinuston ein hohes Rückhaltevermögen aufweist, führen sukzessive von einer mittleren zu einer sehr hohen Schutzfunktion.

Die Bewertung des Dogger-Eisensandsteins beschränkt sich auf den schmalen Ausbiss entlang der Steilstufe des Albraufes. Die unbedeckten Bereiche erreichen dabei infolge der gesteinspezifischen Merkmale des Leiters und der allgemein geringen Flurabstände lediglich eine sehr geringe bis geringe Schutzfunktion. Selbst in Bereichen, in denen der Eisensandstein vom Oberen Dogger (Gamma-Zeta), vor allem dem Ornatenton, bedeckt ist, erlangt die Schutzfunktion kaum höhere Bewertungen. Dies liegt hauptsächlich an der geringen Mächtigkeit der Überdeckung.

In der Nördlichen Frankenalb, im E der Planungsregion, ist die Schutzfunktion generell sehr gering. Grund sind die über weite Bereiche anstehenden verkarsteten Kalke und Dolomite des Malm, da die Gesteine selbst über keine nennenswerte Filterfunktion verfügen. Die größtenteils flachgründigen skelettreichen Böden der Malmhochfläche haben ein geringes Wasserrückhaltevermögen, das Niederschlagswasser kann schnell versickern und erfährt keine oder nur geringe Filterung. So reagieren Quellen häufig mit stark niederschlagsabhängigen Schüttungen und Beeinträchtigungen der Wasserqualität durch Trübung, Nitrat, Pflanzenschutzmittel oder durch bakterielle Verunreinigungen. Schluffige bis tonige bzw. lehmige Deckschichten (Kreide, Alblehm, Löß, Lößlehm), wirken sich auf die Schutzfunktion mit zunehmender Mächtigkeit günstig aus. Zusätzlich erhöhen dort tiefgründigere Böden das Wasserrückhaltevermögen. Schützende mächtigere Deckschichten kommen auf der Malmhochfläche, meist im Bereich der Mulden, vor. Bei ausreichender Überdeckung wird dort ein mittlerer Schutz erreicht. Bereiche mit örtlich erhöhter Gefährdung im Malmkarst sind Gebiete mit gestörten Bodenverhältnissen, Siedlungsgebiete, Straßen und abflusslose Senken. Insbesondere im Verbreitungsgebiet der gehäuft auftretenden auskartierten Dolinen können Gefährdungen auftreten. Schwebende Grundwasserstockwerke treten im Malmkarst in Bereichen mit stauenden Tonen und Mergellagen lokal auf, können jedoch in der Regel nicht flächendeckend abgegrenzt werden und wurden daher nicht als günstig bewertet.

Das quartäre Grundwasser im Main- und Regnitztal sowie deren Nebentälern ist wegen geringer Grundwasserflurabstände sehr gering bis gering geschützt. Im Bereich von Auenablagerungen tragen im Wesentlichen die Böden zur Schutzfunktion bei. So bedingen z.B. hohe nFK der Auenböden (150 mm/dm bis über 250 mm/dm) ein höheres Wasserrückhaltevermögen und damit eine gewisse Schutzfunktion. Niedrige Sickerwasserraten wurden vor allem in größeren Siedlungsgebieten berechnet, was dort zu einer mittleren Bewertungsstufe der Schutzfunktion führt.

7 Nutzung des Grundwassers

Die Region Oberfranken West zählt zu den Wassermangelgebieten Bayerns, was im Wesentlichen auf die klimatischen und geologischen Gegebenheiten zurückgeführt werden kann. Dies spiegelt sich u. a. auch in der Anzahl und Verteilung der Trinkwasserfassungen für die öffentliche Wasserversorgung wider. Die folgende Darlegung der bei den Wasserwirtschaftsämtern registrierten Anlagen zur Entnahme von Grundwasser gibt den Stand des Jahres 2005 wieder. An dieser Stelle sei auch auf eine umfassende Bilanz und Prognose zur Trinkwasserversorgung in Oberfranken verwiesen, die auf Grundlage wasserwirtschaftlicher Daten aus dem Jahre 2003 von der REGIERUNG VON OBERFRANKEN (i. Vorb.) erstellt und publiziert wurde.

Nach Erhebungen der Wasserwirtschaft betrug die aus den Grundwasserleitern entnommene Gesamtmenge zur Bereitstellung von Trinkwasser in der Region 4 im Jahr 2003 31,5 Mio. m³. Nach diesem ausgesprochenem Trockenjahr ging die Gesamtmenge 2004 wieder zurück auf 29,1 Mio. m³. Im Hinblick auf die allgemeine Wassermangelsituation in der Planungsregion werden für die zukünftige Versorgung zusätzliche Entnahmekapazitäten eingeplant. So betragen nach REGIERUNG VON OBERFRANKEN (i. Vorb.) die zusätzlichen Entnahmekapazitäten aus den erkundeten Grundwasserreservoirs Kemmern, Zapfendorf, unteres Wiesenttal, Steinachtal und Hollfelder Mulde ungefähr 8,8 Mio. m³ pro Jahr, für die WVU Strullendorf, Ebermannstadt und Staffelstein werden ca. 1,25 Mio. m³ pro Jahr veranschlagt.

Nach einer Auswertung der Datenbank INFO-Was der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung wurden in der Planungsregion Oberfranken West im Jahre 2005 316 Brunnen und 221 Quellauffassungen zur Bereitstellung von Trinkwasser genutzt. Des Weiteren sind etwa doppelt so viele Privatbrunnen erfasst, welche die verschiedenen Grundwasservorkommen zu unterschiedlichen Zwecken ebenso nutzen. Die folgende Beschreibung gliedert sich in erster Linie nach Art und Nutzung der Wasserfassung, in zweiter Linie nach Grundwasserleitern.

Öffentliche Trinkwasserbrunnen

In der Region liegt ein Schwerpunkt der Wasserversorgung auf der Nutzung quartärer Grundwässer in den Talzügen von Main, Regnitz und Wiesent. Für Letztere sind etwa 120 Flachbrunnen bekannt, die in mehreren Gewinnungsgebieten quartäres Grundwasser erschließen. Mit einer genehmigten Entnahmemenge von 3,88 Mio. m³ nehmen dabei die Stadtwerke Bamberg einen bedeutenden Platz unter den Wasserversorgungsunternehmen (WVU) ein. Weitere wichtige WVU, die Quartärgrundwasser im Regnitz- und Wiesenttal zur Trinkwassergewinnung fördern, sind die Städte Forchheim (2,4 Mio. m³) und Ebermannstadt (0,7 Mio. m³). An dieser Stelle sind auch die WVU (Stadtwerke Erlangen und Gemeinde Möhrendorf) zu nennen, die in der südlich anschließenden Planungsregion 7 beachtliche Grundwassermengen aus dem Regnitztalquartär fördern.

Aus dem Maintalquartär werden lokal größere Mengen an Grundwasser für die Trinkwasserbereitstellung entnommen (z.B. in Bad Staffelstein mit 0,65 oder in Michelau mit 0,4 Mio. m³). Außerhalb, im westlichen Umgriff der hier bearbeiteten Region, sind als WVU die Stadt Eltmann sowie die Zweckverbände (ZV) Zeil-Ebelsbach-Gruppe und Sand-Knetzgau-Wonfurt-Gruppe anzuführen, die im Gebiet Eltmann-Ebelsbach-Limbach lokal bedeutende Grundwassergewinnungsanlagen im Maintal betreiben.

Den allgemein hohen Ergiebigkeiten der quartären Grundwasserleiter stehen allerdings vielfache Nutzungseinschränkungen gegenüber, die sich einerseits durch die häufig verminderte Schützbarkeit des flachgründigen Grundwasservorkommens und andererseits durch die zahlreichen konkurrierenden Nutzungen zwangsläufig ergeben. So bergen die quartären Grundwasserkörper nicht nur wasserwirtschaftliches Potenzial, sondern betreffen aufgrund der dortigen Kies- und Sandvorkommen auch in besonderem Maße die Interessen der ansässigen Sand- und Kiesindustrie. Darüber hinaus stehen übergeordnete Baumaßnahmen, die Belange einzelner Gemeinden sowie zahlreiche Einzelinteressen (z.B. Landwirtschaft) nicht selten im Konflikt mit der wasserwirtschaftlichen Nutzung dieser Vorkommen. In gewissen Maßen einschränkend können sich aus qualitativer Sicht mancherorts auch die mit dem Grundwasser geförderten Uferfiltratanteile auswirken.

Der Sandsteinkeuper erreicht eine überregionale Bedeutung für die Trinkwassergewinnung. In der Planungsregion liegen in diesem Grundwasserleiterkomplex etwa 80 für die öffentliche Wasserversorgung registrierte Brunnen vor. Ein bedeutendes WVU hierbei ist im S die Gemeinde Strullendorf mit einer genehmigten Entnahmemenge von 0,87 Mio. m³/Jahr, die sich auf mehrere Entnahmestellen verteilt. Weitere größere WVU im S sind Neunkirchen a. Brand, der ZV Auracher Gruppe, der ZV Leithenberg Gruppe, die Marktgemeinde Hirschaid und der ZV Heroldsbacher Gruppe, jeweils mit mehreren Förderbrunnen und genehmigten Entnahmemengen zwischen 0,43 und 0,73 Mio. m³/Jahr. Im N stellt die Stadt Burgkunstadt mit einer genehmigten Jahresmenge von 0,57 Mio. m³ aus mehreren Brunnen das größte WVU dar, das den Sandsteinkeuper nutzt. Zu eventuellen Nutzungseinschränkungen könnten aus qualitativer Sicht z.B. die lokal erhöhten Urankonzentrationen im Grundwasser des Sandsteinkeuper führen. Nach REGIERUNG VON OBERFRANKEN (i. Vorb.) förderten demnach vereinzelt Brunnen Grundwässer, deren Urankonzentrationen bisweilen über 20 µg/l lagen.

Ein im N der Planungsregion für die Trinkwassernutzung bedeutender Grundwasserleiter ist der Untere und Mittlere Buntsandstein. Der Obere Buntsandstein spielt als Trinkwasserlieferant nur eine untergeordnete Rolle. In den Landkreisen Coburg und Kronach werden derzeit etwa 40 Brunnen zur Förderung von Grundwässern aus dem Grundwasserstockwerk des Unteren und Mittleren Buntsandstein betrieben. Die meisten davon liegen im sogenannten Neustädter Becken, welches ein beachtliches Grundwasserreservoir darstellt. Die Stadtwerke Coburg und die Stadt Neustadt sind mit Jahresentnahmemengen von 2,95 Mio. m³ bzw. 1,1 Mio. m³ die größten Nutzer. Die Stadtwerke Kronach betreiben zwei leistungsstarke Brunnen im selben Stockwerk mit einer Entnahmemenge von ca. 0,68 Mio. m³/Jahr. Gleiches WVU unterhält auch einen Förderbrunnen im Oberen Buntsandstein mit einer Jahresentnahmemenge von 0,25 Mio. m³.

Im Süden der Planungsregion erreicht vor allem der Rhätolias als Grundwasserleiter eine gewisse Bedeutung bei der Trinkwassergewinnung. In den Landkreisen Lichtenfels, Bamberg und Forchheim werden 22 Brunnen betrieben. Das größte WVU ist der ZV Eggolsheimer Gruppe mit einer genehmigten Entnahmemenge von 0,8 Mio. m³.

Der Eisensandstein des Dogger wird ebenfalls durch einige Trinkwasserbrunnen genutzt, im Landkreis Bamberg vor allem für die Wasserversorgung von Heiligenstadt (0,37 Mio. m³/Jahr).

Für die Trinkwasserversorgung des generell grundwasserärmeren Nordens der Planungsregion erreichen die Grundwasserleiter des Rotliegend mit ca. 8 Brunnen und des Frankenwälder Paläozoikum (Grauwacken, Tonschiefer) mit ca. 10 Brunnen eine vergleichsweise geringe Bedeutung. Sie werden jeweils von kleineren lokalen WVU genutzt. Um einem Wassermangel vorzubeugen, wurde vom Freistaat Bayern schon vor Jahren der Wasserspeicher Mauthaus errichtet. Dieser Oberflächenwasser-Speicher wird wasserwirtschaftlich vom WWA Kronach verwaltet und hat eine Versorgungskapazität von 12,6 Mio. m³/Jahr. Weiterhin zu nennen sind noch die Brunnenfassungen

der Stadt Bad Rodach, die Grundwasser aus dem Unteren Keuper und Oberen Muschelkalk für die Trinkwasserversorgung gewinnt.

Im Landkreis Bamberg sind noch WVU verzeichnet, die einige Brunnen zur Trinkwassergewinnung in sandigen Abschnitten des Gipskeuper (i.w. Schilfsandstein) und im Malm betreiben. Die dabei genehmigten Jahresentnahmemengen von 175 Tsd. m³ (Schlüsselfeld) bzw. von 82 Tsd. m³ (Laibarös) sind jedoch nur von lokaler Bedeutung.

Sonstige Förderbrunnen

Über die Brunnen zur öffentlichen Wasserversorgung hinaus wurden in der Planungsregion 4 530 Brunnen erfasst, die als Brauchwasserbrunnen, Brauereibrunnen, Bewässerungsbrunnen, als Brunnen für geothermische Nutzung oder als Brunnen für sonstigen privaten Gebrauch dienen. Dabei fällt in den letzten Jahren insbesondere eine Zunahme der geothermischen Nutzung des Grundwassers auf. Es werden verschiedenste Grundwässer der Region über zahlreiche Förder- und Schluckbrunnen von Grundwasserwärmepumpenanlagen erschlossen. Im Zeitraum bis 2005 waren etwa 230 Anlagen erfasst. Darüber hinaus nutzen seit längerem z.B. die Städte Bad Rodach und Bad Staffelstein das geothermische und balneologische Potenzial tieferer Grundwässer aus dem Buntsandstein zum Betrieb ihrer Thermalbäder.

Der am meisten genutzte Grundwasserleiter ist der Sandsteinkeuper mit ca. 215 registrierten Brunnen. Bedeutende Nutzungen sind z.B. mehrere Tiefbrunnen einer Folienfabrik in Forchheim mit einer Jahresentnahmemenge von 2,6 Mio. m³ und die Milchwerke Zapfendorf mit einer genehmigten Gesamtentnahme von über 1 Mio. m³/Jahr.

Quartäres Grundwasser der Talzüge von Main- und Regnitz sowie zum Teil auch deren Nebentäler wird ebenfalls stark von gewerblichen und privaten Brunnen genutzt. Um die 250 Brunnen sind hierbei, vor allem in Bamberg und Forchheim, bekannt. Insbesondere im Bereich des Bamberger Kessels und den anschließenden Haupttalstrecken wird das quartäre Grundwasser intensiv zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt. Allen voran steht hierbei der Anbau von Sonderkulturen im Dreieck Gundelsheim-Kemmern-Dörfleins.

Öffentliche Quelfassungen

Für die öffentliche Trinkwasserversorgung von Bedeutung sind neben den Förderbrunnen auch gefasste Quellaustritte. Mit nahezu 100 behördlich überwachten Fassungen liegt der Schwerpunkt in der Planungsregion 4 auf Quellen, die Grundwasser aus dem Doggersandstein erschließen. In Abhängigkeit von den Schüttungen liegen jedoch die Jahresentnahmemengen oft nur unter 100 Tsd. m³/Jahr, bei Einzelaustritten oft deutlich unter 50 Tsd. m³/Jahr. Daher dienen diese den zumeist kleineren Ortsversorgungen in den Landkreisen Lichtenfels, Bamberg und Forchheim. Für diese sind auch etwa 50 gefasste und öffentlich genutzte Quellaustritte aus dem Malm-Karst-Grundwasser registriert. Deutlich stärkere Schüttungen ermöglichen hier für Quellgruppen Jahresentnahmemengen von bis zu 1,2 Mio. m³ (Döriz- und Schwabthal-Quellen, Stadtwerke Lichtenfels); bei Einzelaustritten reichen die genehmigten Entnahmemengen bis zu 0,3 Mio. m³/Jahr (Sachsenmühlquelle, ZV Wiesentgruppe).

Im nördlichen Landkreis Kronach haben ca. 25 gefasste Quellaustritte aus paläozoischen Grauwacken, Tonschiefern und Quarziten eine hohe Bedeutung für die öffentliche Wasserversorgung kleinerer Ansiedelungen. Geringe Schüttungen gestatten in der Regel jedoch keine hohen Jahresentnahmemengen (z.B. Wagnersgrundquelle, Markt Tettau: 15 Tsd. m³/Jahr).

Im äußersten W wird der Gipskeuper über Quelfassungen im Schilfsandstein (Kleingressingen und Aschbach) zur Trinkwassernutzung erschlossen. Sie dienen zur ergänzenden Wasserversorgung von Ebrach und Schlüselfeld. Quelfassungen, die den Sandsteinkeuper erschließen und zu Trinkwasserzwecken genutzt werden bzw. mittlerweile auch aufgelassen sind, befinden sich vereinzelt im Steigerwald und am Südrand der Hassberge. Dazu gehören z.B. die Grundwassererschließungen zur Wasserversorgung der Gemeinden Unterhaid, Büchelberg, Heuchelberg (Stadt Schlüselfeld) und Priesendorf (ZV Weissberg-Gruppe).

Weitere Grundwasserleiter, die in geringerem Umfang über Quelfassungen genutzt werden, sind zum Beispiel der Mittlere Buntsandstein mit der Boller- und Teufelsquelle (50 Tsd. m³/Jahr) der Stadtwerke Rödental oder der Untere Muschelkalk in Weißenbrunn (80 Tsd. m³/Jahr).

Mit den etwa 160 Quellen, die in der Planungsregion 4 aufgrund von Verkehrswegebau, Verschlechterung der Qualität und Nachlassen der Schüttung für die öffentliche Wasserversorgung in den letzten Jahren aufgegeben wurden, zeichnet sich allerdings ein negativer Trend in der Nutzung derartiger Grundwasserressourcen ab. Infolge einer weiterhin intensiven Bewirtschaftung der Naturräume und des fortschreitenden Flächenverbrauchs wird sich diese Entwicklung vermutlich auch in Zukunft fortsetzen.

8 Dargestellte Karteninhalte

Die als Übersichtsdarstellung konzipierte Hydrogeologische Karte 1:100 000 der Planungsregion 4 Oberfranken West umfasst vier Blätter in Form von Inselkarten, auf denen die wesentlichen Ergebnisse der hydrogeologischen Bearbeitung, erstellt auf Basis der Hydrogeologischen Karte 1:50 000, zusammengefasst sind. Gleichzeitig werden Hydrogeologische Karten und Profilschnitte im Maßstab 1:50 000 digital vorgehalten. Die verfügbaren Blattsschnitte und zugehörigen Profilschnitte sind der Abb. 8-1 zu entnehmen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die hydrogeologischen Informationen auf drei Blätter (Kapitel 8.2 bis 8.4) verteilt. Das vierte Blatt beschreibt die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (Kapitel 8.5). Um eine räumliche Interpretation der Verhältnisse zu ermöglichen, ist dem Kartensatz eine Tafel mit hydrogeologischen Profilschnitten (Kapitel 8.6) beigelegt.

Als topographische Grundlage aller Kartenblätter dienen ATKIS[®]-DTK200 Rasterdaten des Bayerischen Landesamts für Vermessung und Geoinformation. Infolge ihrer Vergrößerung auf den Maßstab 1:100 000 verstärken sich die Unschärfen, insbesondere hinsichtlich der relativen Lagegenauigkeit von Punktdaten in Bezug auf die dargestellte Infrastruktur. Zusätzlich zum als Orientierungshilfe gedachten topographischen Hintergrund enthalten alle Kartenblätter den Verlauf der Profillinien sowie den für hydrogeologische Standardkarten üblichen TK50-Blattschnitt.

8.1 Kartengrundlagen

Zur blattschnittfreien Erstellung der Hydrogeologischen Karte 1:50 000 wurde vielfältiges und im Detailgrad unterschiedliches geologisches Kartenmaterial verwendet. In Tab. 8-1 und Abb. 8-1 sind alle verwendeten Kartengrundlagen dargestellt. Zunächst wurde auf Karten im Maßstab 1:25 000 zurückgegriffen, dabei in erster Linie auf die amtlichen Karten des ehemaligen Bayerischen Geologischen Landesamtes, in zweiter Linie auf Karten aus Dissertationen, Diplomkartierungen der Universitäten Erlangen-Nürnberg und Würzburg sowie auf historische Karten. Darüber hinaus erfolgten Neukartierungen im Maßstab 1:25 000 für die Blattsschnitte Pfarrweisach, Coburg und Neustadt b. Coburg, deren Manuskriptkarten hier ebenso Eingang fanden. Zur Schließung eventueller Lücken wurden noch Geologische Übersichts- und Sonderkarten im Maßstab 1:200 000 bzw. 1:100 000 herangezogen.

8.2 Klassifikation der hydrogeologischen Einheiten

In Blatt 1 der Hydrogeologischen Karte 1:100 000 ist die Lage, Verbreitung und hydrogeologische Klassifikation der an der Oberfläche vorkommenden hydrogeologischen Einheiten dargestellt. Als hydrogeologische Einheit wird ein Gesteinskörper bezeichnet, der aufgrund seiner Beschaffenheit im Rahmen einer festgelegten Bandbreite einheitliche hydraulische und hydrogeochemische Eigenschaften aufweist. Die Karte enthält damit in erster Linie Informationen über grundlegende hydrogeologische Sachverhalte, auf denen u. a. die Abgrenzung einzelner Grundwasserleiter beruht.

Bei der Kartenerstellung wurde grundsätzlich zwischen großräumig ausgebildeten Gesteinsverbänden (Flächenfarben) und überlagernden diskontinuierlichen Lockergesteinsdeckschichten (Schraffuren) unterschieden. Die von Lockergesteinen aufgebauten Porengrundwasserleiter sind entsprechend ihrer von der Durchlässigkeit und der Mächtigkeit des Grundwasser erfüllten Raums abhängigen Ergiebigkeit (bzw. Transmissivität) in drei Klassen eingeteilt, die durch blaue Flächenfarben in drei Abstufungen dargestellt sind.

Tab. 8-1: Kartengrundlagen zur Erstellung der Hydrogeologischen Karte 1:50 000 und 1:100 000 mit Bezugsnummern zur Abbildung 8-1 (GLA = Bayerisches Geologisches Landesamt, GK = Amtliche Geologische Karte, BGR = Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

Nr.	Autor (Jahr); Kartenart	Nr.	Autor (Jahr); Kartenart
1	v. Horstig (1982); GLA-GK25	23	Koschel (1970); GLA-GK25
2	Beyschlag & Pröscholt (1894); Hist.GK25 Freudenberger & Zitzmann (1994); BGR-GK200	24	Prodromos et al. (1972); GLA-GK25
3	Loretz (1882); Hist.GK25 Motamed (1980); Dipl.Kart.	25	Meyer (1972c); GLA-GK25
4	Puff (Stand 2003); priv.GK25	26	Emmert (1985); GLA-GK25
5	v. Horstig (1979); GLA-GK25	27	Knoch (1982); Dipl.Kart. Meyenhöfer (1981); Dipl.Kart. Stamatis (1981); Dipl.Kart. Wehr (1981); Dipl.Kart. Emmert (1991); GLA-GK100
6	v. Horstig (1966); GLA-GK25	28	Steinbrenner (1980); Dipl.Kart. Türk (1978); Dipl.Kart. Steuer (1973); Dipl.Kart. Scherzer (1978); Dipl.Kart. Emmert (1991); GLA-GK100
7	Beyschlag & Kgl. Bayer. Oberbergamt (1894); Hist.GK25 Freudenberger & Zitzmann (1994); BGR-GK200 Borg (1986); Dipl.Kart.	29	Lang (1970); GLA-GK25
8	Leitz (Stand 2003); priv.GK25	30	Meyer (1979); GLA-GK25
9	Hahn (1974); GLA-GK25	31	Gottwald (1959); GLA-GK25
10	Freudenberger & Zitzmann (1994); BGR-GK200 Bantz (1965); Dipl.Kart. Schreiber (1954); Dipl.Kart.	32	Wippert (1955); GLA-GK25
11	Emmert & v. Horstig (1972); GLA-GK25	33	Emmert (1965); GLA-GK25
12	v. Horstig & Stettner (1976); GLA-GK25	34	Haarländer (1969); GLA-GK25
13	Fesl (Stand 2003); Diss.Kart.	35	Haarländer (1964); GLA-GK25
14	Hoffmann (1970); GLA-GK25	36	Haarländer (1963); GLA-GK25
15	Schirmer (1966); Diss.Kart.	37	Krumbeck (1956); GLA-GK25
16	Hegenberger (1968); GLA-GK25	38	Müller (1959); GLA-GK25
17	Gudden (1955); GLA-GK25	39	Exler (1957); GLA-GK25
18	Czwiolong (1985); Dipl.Kart. Klinger (1985); Dipl.Kart. May (1985); Dipl.Kart. Pitschka (1985); Dipl.Kart.	40	Berger (1973); GLA-GK25
19	Janetzko & Roloff (1970); GLA-GK25	41	Haarländer (1966b); GLA-GK25
20	Hegenberger (1967); GLA-GK25	42	Krumbeck (1968); GLA-GK25
21	Meyer (1972b); GLA-GK25	43	Dorn (1958); GLA-GK25
22	Bourboulis (1969); Dipl.Kart. Lindner (1984); Dipl.Kart. Opfermann (1983); Dipl.Kart. Helbig (1991); Dipl.Kart. Freudenberger & Zitzmann (1994); BGR-GK200 Emmert (1991); GLA-GK100.	44	v. Goetze, Meyer & Treibs (1975); GLA-GK25
		45	Haarländer (1966a); GLA-GK25
		46	v. Hänel (1974); GLA-GK25

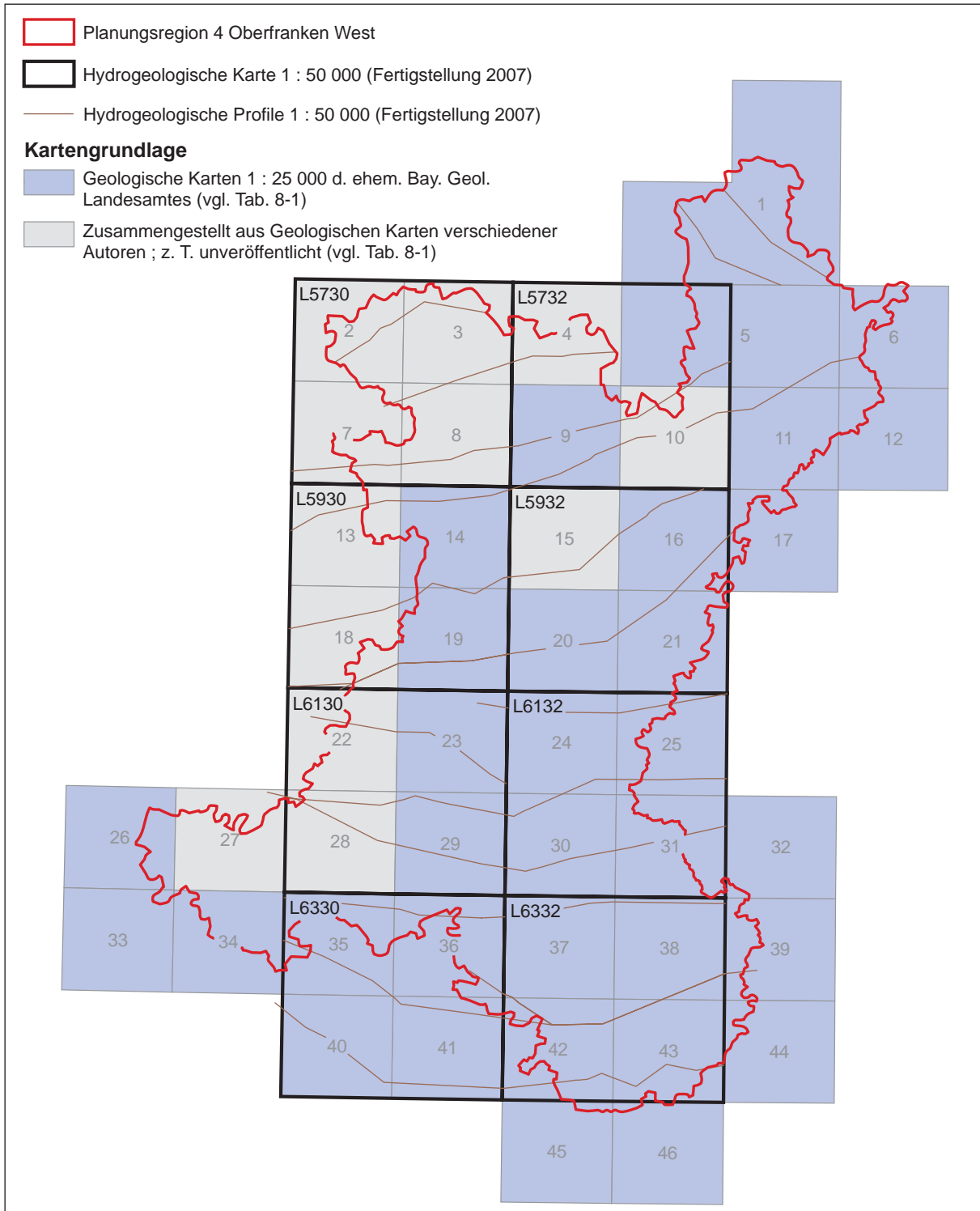


Abb. 8-1: Kartengrundlagen zur Erstellung der Hydrogeologischen Karte 1:50 000 und 1:100 000 mit Darstellung der verfügbaren Profil- und Blattsnitte der Hydrogeologischen Karte 1:50 000 im Rahmen der hydrogeologischen Landesaufnahme der Planungsregion 4 Oberfranken West.

Die auf der Karte durch grüne Farbgebung unterschiedlicher Tönung vorgenommene Kennzeichnung der Gebirgsdurchlässigkeit der Kluft-(Poren-)Grundwasserleiter sowie des violetten Farbtons der Karstgrundwasserleiter ist dagegen nur als genereller Hinweis auf die potenzielle Grundwasserführung zu verstehen, da morphologisch höher liegende Teile der Einheiten in der Regel grundwasserfrei sind. Die interpolierte Mächtigkeit des wassererfüllten Raums dieser Einheiten lässt sich den Profilen entnehmen (Kap. 8.5). Grundwassergeringleiter sind durch braune Farbtöne gekennzeichnet. Eine gesonderte Darstellung des oberflächennahen Auflockerungsbereiches, in dem auch die ansonsten gering durchlässigen Festgesteine in begrenztem Maße Grundwasser führen, war auf der Karte aus Maßstabsgründen nicht möglich. Deckschichten, d.h. meist auf kleinere Areale beschränkte Lockersedimente, die nur selten nennenswerte schwebende Grundwasservorkommen enthalten, wurden entsprechend ihrer hydraulischen Eigenschaften mit unterschiedlichen Linienstraffuren eingezeichnet.

Die grobe Klassifizierung der hydrogeologischen Einheiten im Sinne einer Globallegende wird durch Kurzbeschreibungen der regionalen hydrogeologischen Eigenschaften in der Tabelle zur Schichtenfolge ergänzt. In dieser Lokallegende ist auch die stratigraphische Stellung, Gesteinsbeschaffenheit und Mächtigkeit der nach hydrogeologischen Gesichtspunkten differenzierten Einheiten der Planungsregion erläutert. Anhand der in der Tabelle sowie in der Karte eingetragenen Kennziffern können die hydrogeologischen Einheiten identifiziert werden.

8.3 Grundwasserhöhengleichen

Das Blatt 2 der Hydrogeologischen Karte 1:100 000 der Planungsregion Oberfranken West enthält eine Darstellung der Verbreitung wesentlicher Grundwasserstockwerke, für die Grundwasserhöhengleichen konstruiert wurden einschließlich eines Großteils der hierfür verwendeten Stützpunkte. Die Grundwasserhöhengleichen sind dabei nicht nur für das oberste zusammenhängende Grundwasserstockwerk dargestellt, sondern in Abhängigkeit der Kenntnislage teilweise auch für die tieferen Stockwerke.

Als Spezialfall ist an dieser Stelle der Grundwasserleiterkomplex Sandsteinkeuper zu nennen, für den nach derzeitigem Kenntnisstand der faziellen und hydraulischen Gegebenheiten ein fünfteiliger Grundwassergleichenplan entwickelt wurde. Für den Raum um Coburg, wo eine deutliche hydraulische Trennung zwischen Burgsandstein und Blasensandstein i.w.S. offensichtlich erschien, wurden separate Gleichenpläne erstellt. Des Weiteren bezieht sich nahezu der gesamte Grundwassergleichenplan nördlich und westlich des Mains auf den Burgsandstein, da auch hier aufgrund einiger Hinweise eine hydraulische Trennung zum liegenden Blasensandstein i.w.S. vorliegen dürfte. Alle weiteren Grundwasserhöhengleichen vermitteln die hydraulischen Verhältnisse im Gesamtkomplex des Sandsteinkeuper. Insgesamt wurden auch jene Gebiete farblich abgesetzt, in denen der Sandsteinkeuper bzw. Burgsandstein unter einer mächtigeren weitflächigen Überdeckung liegt.

Mit den Ergebnissen einiger Tiefbohrungen und -brunnen konnten für die Bereiche des tieferen Muschelkalk um Rodach und des tieferen Buntsandstein bis etwa auf Höhe Mürsbach Grundwasserhöhengleichen konstruiert werden, die nur als Trendlinien aufzufassen sind.

Für einige Grundwasserstockwerke wurden aufgrund ihrer geringeren flächenhaften Verbreitung und Mächtigkeit sowie der lückenhaften Datenlage keine Grundwasserhöhengleichen konstruiert. Dies gilt insbesondere für die Grundwasserleiter im Unteren Keuper, Gipskeuper, Rhätolias und Dogger.

Weitere Angaben zur Konstruktion und Datengrundlage sowie zu den Aussagen der Grundwasserhöhengleichen hinsichtlich der Grundwasserfließrichtung und des Gefälles sind den entsprechenden Abschnitten in den Beschreibungen der einzelnen Grundwasserleiter im Kapitel 3 zu entnehmen.

Bei den Stützpunkten sind vorwiegend Quellen, Brunnen, Grundwassermessstellen und sonstige Bohrungen mit verwertbaren Angaben zum Grundwasserstand dargestellt. Zum Teil enthält die Karte auch die zur Konstruktion der Grundwassergleichen herangezogenen Hilfspunkte (z.B. die Niveaus von Vorflutern).

8.4 Hydrogeologische Grunddaten

Blatt 3 der Hydrogeologischen Karte 1:100 000 „Hydrogeologische Grunddaten“ beinhaltet neben der Darstellung der Hydrogeologischen Einheiten wichtige Punkt- und Flächendaten zu wasserwirtschaftlichen Fragestellungen. Die Attributierung der Daten erfolgte auf der Basis der hydrogeologischen Kartieranleitung (BAYERISCHEN LANDESAMT FÜR UMWELT 2007).

In der Karte ist die Lage der hydrogeologisch relevanten Objekte des BIS-BY des BayLFU (Bohrungen, Brunnen, Grundwassermessstellen, Quellen) mittels klassifizierter Punktsymbole dargestellt. Bei sehr hoher Punktdichte wurden die dargestellten Punkte zum Teil ausgedünnt, um eine lesbare Kartendarstellung zu gewährleisten. Die detaillierte Klassifizierung erfolgte anhand der „ArcInfo-basierten Generallegende für Hydrogeologische Karten – Markerset Hydrogeologie“ (DIEPOLDER & SCHMIDBAUER 2000). Die Verbreitung von Dolinen wurde aus den topographischen Karten im Maßstab 1:25 000 des Bayerischen Landesamts für Vermessung digitalisiert bzw. aus den entsprechenden ATKIS®25 übernommen. Eine Differenzierung nach Art und Zustand wurde nicht vorgenommen.

Koordinaten und Informationen zu Abflussmessstellen an Oberflächengewässern stellte das ehemalige Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft zur Verfügung. Auch Geometrien und beschreibende Attribute der ausgewiesenen Wasserschutzgebiete wurden in digitaler Form übernommen und entsprechen dem Stand vom August 2005. In der Karte dargestellt sind jeweils die Grenzen der Schutzzone IIIa (einschließlich I und II) und, sofern ausgewiesen, der Zone IIIb. Der Deutsche Wetterdienst lieferte Daten über Klimastationen innerhalb der Regionsgrenzen.

Da die Umgrenzungen der Wasserschutzgebiete dem Bearbeitungsstand August 2005 entsprechen, wurden nach diesem Zeitpunkt festgelegte bzw. im Genehmigungsverfahren befindliche Schutzgebiete nicht dargestellt. Dies führt dazu, dass bei einigen mittlerweile zur Wasserversorgung genutzten Brunnen in der Kartendarstellung die Schutzgebietsabgrenzung fehlen kann.

8.5 Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung

Die Karte der „Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung“ beinhaltet das Ergebnis der flächenhaften Anwendung des Bewertungsschemas zur Abschätzung der Gesamtschutzfunktion von Boden und tieferer ungesättigter Zone gegenüber Schadstoffeintrag in das Grundwasser. Grundlagen, Herleitung und Einschränkungen des Bewertungsverfahrens sind ausführlich in DIEPOLDER (1995) sowie HÖLTING et al. (1995) beschrieben. Einzelheiten zur Bewertung der berücksichtigten Parameter sowie zur angewandten Berechnungsmethodik und zum Interpolationsverfahren werden im Kapitel 6 „Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung“ erläutert.

In der Karte sind fünf unterschiedliche Klassen der Schutzfunktion dargestellt, d.h. Gebiete, in denen größenordnungsmäßig gleiche Sickerwasser-Verweilzeiten zu erwarten sind. Damit sind Bereiche gegeneinander abgegrenzt, in denen eine größenordnungsmäßig gleiche Intensität mechanischer, physikochemischer und mikrobieller Prozesse erwartet wird, die zu einer Reduzierung der Schadstofffracht des Sickerwassers führen können. Die Farbgebung folgt dabei der allgemein üblichen Darstellung der Gefahrenklassen, von Rot für die höchste Gefährdungsstufe, d.h. geringste Schutzfunktion (Sickerwasser-Verweilzeit wenige Tage bis ca. 1 Jahr), über Gelb zu Dunkelgrün für die höchste Schutzfunktionsklasse (Sickerwasser-Verweilzeit mehr als 25 Jahre). Bei der Darstellung der Schutzfunktionsklassen wurde das aus der Verrechnung von Rasterdaten resultierende Rasterbild beibehalten. Dadurch lassen sich auch kleinräumige Veränderungen infolge der Variation einzelner Parameter (z.B. Deckschichten, Böden, Sickerwasserrate) erkennen.

Um die Bewertung der Schutzfunktion für den Anwender nachvollziehbar zu machen, wurde die Verbreitung der diskontinuierlichen Lockergesteinsdeckschichten mittels Schraffuren analog zur Karte der hydrogeologischen Einheiten (Kapitel 8.1) dargestellt. Die Abfolge der Deckschichten über der Grundwasseroberfläche des jeweils bewerteten Grundwasserleiters wird durch Kennzahlen entsprechend der Tabelle „Schichtenfolge“ beschrieben. Die Abgrenzung und Verbreitung der Grundwasserleiter ist in einer Nebenkarte skizziert. In der Hauptkarte sind die jeweiligen Grenzliniengeometrien hervorgehoben.

Auf eine Eintragung der auftretenden Böden, klassifiziert nach der Speicherefähigkeit, wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet – hierzu wird auf die einzelnen Blätter der Konzeptbodenkarten im Maßstab 1:25 000 verwiesen. Die Schutzfunktionskarte enthält, analog zur Karte „Hydrogeologische Grunddaten“, die ausgewiesenen Trinkwasserschutzgebiete in Form grenzkolorierter Umrisse.

Bei der Darstellung der Schutzfunktionsklassen ist maßstabsbedingt und entsprechend der verfügbaren Informationsdichte nur eine Wiedergabe der großräumigen Verhältnisse möglich. Für kleinräumige Bewertungen und Planungen bleiben Spezialuntersuchungen unbedingte Voraussetzung. Örtliche Besonderheiten, die zu einer (nicht quantifizierbaren) Verringerung der Schutzfunktion führen können, sind jedoch durch spezielle Symbole kenntlich gemacht. Hierzu zählen insbesondere Störungen, wo infolge der Gesteinszerrüttung bessere Durchlässigkeiten und damit geringere Sickerwasser-Verweilzeiten zu erwarten sind, Gebiete, in denen die schützenden Schichten der Grundwasserüberdeckung vollständig abgetragen sind (Grundwasserblänken) sowie schutzfunktionsrelevante landschaftsspezifische Phänomene (z.B. Dolinen und Dolinenfelder im Verbreitungsgebiet von Karbonat-Gesteinen).

8.6 Hydrogeologische Profilschnitte

Um die vertikale Abfolge der Grundwasserstockwerke und Trennhorizonte zu illustrieren, und damit eine räumliche Interpretation der Verhältnisse zu ermöglichen, ist dem Kartensatz eine Tafel mit vier hydrogeologischen Profilschnitten beigelegt. Die Profilschnitte verlaufen unter Berücksichtigung geeigneter Stützpunkte und soweit möglich des Schichteinfallens etwa in W–E-Richtung. Sie sind anhand tieferer Bohrungen konstruiert und 10-fach überhöht dargestellt. Alle Profile wurden digital und 3D-Koordinaten-referenziert nach dem Verfahren von Kus et al. (2006) in einem Geoinformationssystem erstellt.

Bereits vorhandene geologische Schnitte, Angaben zu Schichtmächtigkeiten und Stockwerks-Bau sowie Streichlinien-Karten in Erläuterungen zu passenden Geologischen Karten im Maßstab 1:25 000 wurden, soweit vorhanden, für die Profilerstellung herangezogen.

Maßstabsbedingt und aufgrund der unzureichenden Datengrundlage ist die Verzahnung unterschiedlicher Gesteine innerhalb der einzelnen Einheiten in den Profilen nicht darstellbar. Die eingetragenen Lithologiesymbole repräsentieren lediglich eine idealisierte Beschreibung der durchschnittlichen Zusammensetzung der jeweiligen Einheit bzw. deren Variationsbreite. Dementsprechend sind auch genaue Aussagen zur Mächtigkeit der Grundwasservorkommen nicht möglich. Die vertikale Ausdehnung der Grundwasservorkommen ist mittels blauer Farbgebung nur schematisch wiedergegeben und in der Regel bis zum höchstmöglichen Niveau, dem Grundwasserdruckspiegel, dargestellt. Dort, wo bindige Schichten den Grundwasserkörper bereichsweise abdecken, ist die tatsächliche Mächtigkeit des Grundwasser erfüllten Raums geringer. Trotz 10-facher Überhöhung der Profile konnten schwebende Grundwasservorkommen sowie geringmächtige Deckschichten maßstabsbedingt nur bei mächtigerer Ausbildung dargestellt werden.

9 Literatur

- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE HYDROGEOLOGIE (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung. – Geol. Jb. **G2**: 3–157, Hannover.
- AG BODENKUNDE [Hrsg.] (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 3. Aufl.: 331 S., Hannover.
- AG BODEN [Hrsg.] (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 4. Aufl.: 392. S., Hannover.
- APEL, R. (1972): Hydrogeologie. – In: Mayer, R. K., Viol, G. & Zorn, H.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 5933 Weismain: 87–107, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- APEL, R. (1974): Hydrogeologie. – In: Hahn, L.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 5732 Sonnefeld: 70–90, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- APEL, R. (1979): Hydrogeologische Verhältnisse. – In: von Horstig, G.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 5633 Sonneberg und zum Blatt Nr. 5634 Teuschnitz: 58–68, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- APEL, R. (1982): Hydrogeologie. – In: von Horstig, G.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zu Blatt Nr. 5434 Leutenbrunn, Blatt Nr. 5533 Spechtsbrunn, Blatt Nr. 5534 Lehesten (Bayerische Anteile): 33–41, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- APEL, R. & BÜTTNER, G. (1995): Nördliche Frankenalb – Hydrogeologie. – 119 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- AK GWN FH-DGG (1977): Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate. – Arbeitskreis Grundwasserneubildung der Fachsektion Hydrogeologie der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Geol. Jb., **C19**: 98 S., Hannover.
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & WEIBER, R. (2003): Multivariate Analysemethoden. – 10. Aufl.: 819 S., Berlin-Heidelberg-New York.
- BANTZ, H.-U. (1965): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5733 Kronach. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Erlangen-Nürnberg (unveröff.).
- BAUR CONSULT (2000): Grundwassermodell Wasserwerk Zweng – Zwischenbericht, Hassfurt (unveröff.).
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1980): Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchung Donau und Main – Hydrogeologie, – 44 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1993): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Main – Hydrogeologie. – 138 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000. – 4. Aufl.: 329 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

- BAYRISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1985): Grundwassergleichenkarte von Bayern 1:500 000, Stand 1985. – Schriftenreihe Bayer. L.-Amt Wasserwirtschaft, 20: 37 S.; München.
- BAYRISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1996): Die Grundwasserneubildung in Bayern. Berechnet aus den Niedrigwasserabflüssen der oberirdischen Gewässer. – Inform.-Ber. Bayer. Landesamtes f. Wasserwirtschaft, **5/96**: 65 S., München.
- BGU, BÜRO FÜR GEOTECHNIK UND UMWELT (2003): Abschlußbericht zur Bohrung Brunnen 4 der Wassererschließung Seigendorf, Markt Hirschaid. – Würzburg (unveröff.).
- BERGER, K. (1973): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6330 Uehlfeld. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- BEYSCHLAG, F. & KGL. BAYER. OBERBERGAMT (1894): Geologische Karte von Bayern und Thüringen 1:25 000, Blatt Nr. 5730 Heldburg. – Berlin (Kgl. Preuss. Geol. L.-Anstalt).
- BEYSCHLAG, F. & PRÖSCHOLT, H. (1894): Geologische Karte von Bayern und Thüringen 1:25 000 Blatt, Nr. 5630 Rodach. – Berlin (Kgl. Preuss. Geol. L.-Anstalt).
- BIRZER, F. (1974): Der Mineralwasserspiegel im Sandsteinkeuper des Gebietes zwischen Pegnitz und Schwabach. – Geol. Bl. NO-Bayern, **22**: 148–156, Erlangen.
- BORG G. (1986); Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5730 Heldburg. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Universität Bochum (unveröff.).
- BOURBOULIS, A. (1969): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 6030 Eltmann. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Erlangen-Nürnberg (unveröff.).
- BÜTTNER, G., PAMER, R. & WAGNER, B. (2003): Hydrogeologische Raumgliederung von Bayern. – GLA Fachberichte, **20**: 88 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- BÜTTNER, G. (1995): Hydrogeologische Verhältnisse. – In: Emmert U. & Stettner, G.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6036 Weidenberg: 149–173, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- BÜTTNER, G. & SCHWARZMEIER, J. (1997): Der Mittlere Muschelkalk in der Bohrung Weyer aus lithologischer und stratigraphischer Sicht. – Naturwissenschaftliches Jahrbuch Schweinfurt **15**: 47–76, Schweinfurt.
- CWZIELONG, V. (1985): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5930 Ebern SE-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- DAFNER UMWELTECHNIK GMBH (1996): Hydrogeologisches Gutachten zum Tiefbrunnen 2 und 3 der Wasserversorgung Seigendorf, Markt Hirschaid. – Weilersbach (unveröff.).
- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (1996): Agrar- und Umweltklimatologischer Atlas von Bayern 1:1 000 000. – Weihenstephan.
- DIEPOLDER, G. W. (1995): Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung, Grundlagen – Bewertung – Darstellung in Karten. – GLA Fachberichte, **13**: 5–79, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

- DILL, H. (1988): Sedimentpetrographie des Stockheimer Rotliegendbeckens, Nordostbayern. – Geol. Jb., **D88**: 3–67, Hannover.
- DOBNER, A. (1975): Der Porenraum und die Permeabilität oberfränkischer Sandsteine. – Diss. Univ. München: 99 S., München.
- DOBNER, A. (1980): Hydrogeologie des Maintales. – In: Bayerisches Geologisches Landesamt [Hrsg]: Wasserwirtschaftlicher Rahmenuntersuchung Donau und Main – Hydrogeologie: 27–41, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- DOBNER, A. (1984): Fluviale Kiese und Sande Maintal.– Geologica Bavarica **86**: 395–405, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- DORN, P. (1958): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6333 Gräfenberg. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- DÜMMER, M. (1982): Zur Hydrogeologie des Raumes Nürnberg – Bad Windsheim/Mfr.. – Diss. Univ. München: 280 S., München.
- DVWK (1999): Methoden für die Beschreibung der Grundwasserbeschaffenheit. – Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., **125**: 241 S., Bonn.
- EBERLEIN, W. (1987): Inhalt, Zugänglichkeit und Lebensdauer der Quartären Sand- und Kieslagerstätten im Regnitztal zwischen Nürnberg-Fürth und Bamberg-Strullendorf. – Diss. Univ. Erlangen-Nürnberg: 174. S., Erlangen-Nürnberg.
- EISSELE, K. (1966): Über Grundwasserbewegung in klüftigem Buntsandstein. – Jh. geol. L.-Amt Baden-Württemberg, **8**: 105–111, Freiburg i. Br.
- EMMERT, U. (1964): Keuper. – In: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000, 2. Aufl.: 91–120, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- EMMERT, U. (1965): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6228 Wiesentheid. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- EMMERT, U. & VON HORSTIG, G. (1972): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 5734 Wallenfels. – 240 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- EMMERT, U. (1985): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6128 Ebrach. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- EMMERT, U. (1991): Geologische Karte Naturpark Steigerwald 1:100 000. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- EXLER, H.J. (1957): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6234 Pottenstein. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- FAUTH, H., HINDEL, R., SIEWERS, U. & ZINNER, J. (1985): Geochemischer Atlas Bundesrepublik Deutschland – Verteilung von Schwermetallen in Wässern und Bachsedimenten. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

- FESL, S. (Stand 2003): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5830 Pfarrweisach. – Manuskriptkarte Univ. Bochum (unveröff.).
- FREYBERG, B. (1955): Die Entstehung des Bamberger Kessels. – Geologische Blätter für Nordost-Bayern, **5**: 155-164, Univ. Erlangen-Nürnberg.
- FREUDENBERGER, W. & ZITZMANN, A. (1994): Geologische Übersichtskarte 1:200 000 CC 6326 Bamberg. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- FREUDENBERGER, W. (1996): Trias. – In: BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT [Hrsg.]: Erläuterung zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000. 4. Aufl.: 64–89, München.
- FREUDENBERGER, W., FRITZER, T. & GEIGER, A. (2000): Der Keuper in Kernbohrungen bei Coburg. – Geologica Bavarica, **105**: 137–200, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- FURTAK, H. & LANGGUTH, HR. (1967): Zur hydrogeochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. – Mem. IAH-Kongress, **VII** (1965): 89–96, Hannover.
- GEORGOTAS, N. & UDLUFT, P. (1978): Sinn und Fränkische Saale. – In: QUENTIN, K.-E. ANDREAS, G., GEORGOTAS, N. & SCHNITZER, W.-A. (1978): Das Mainprojekt. – Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 314 S., München.
- GEY MEBUS, A., ANDRES, G. & BACKHAUS, G. (1986): Flächenhafte Neubildung des Grundwassers im Sandsteinkeuper durch die „leaky“ Trennschicht des Feuerletten im Gebiet nördlich von Nürnberg. – Geol. Jb., **C47**: 3–55, Hannover (in Kommission: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung - Nägele u. Obermiller).
- VON GOETZE, F., MEYER, R.K.F. & TREIBS, W. (1975): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6334 Betzenstein. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- GOLDEN SOFTWARE (2002): Surfer[®]8 Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers - User's Guide. – 640 S., Golden Software, Inc., Golden, Colorado (USA).
- GOTTWALD, H. (1959): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6133 Muggendorf. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- GUDDEN, H. (1955): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 5834 Kulmbach. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- GUDDEN, H. (1981): Über Thermal-Mineralwasser-Bohrungen im Coburger Umland. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., **63**: 229–252, Stuttgart.
- HAARLÄNDER, W. (1963): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6231 Adelsdorf. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- HAARLÄNDER, W. (1964): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6230 Höchststadt a.d. Aisch. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- HAARLÄNDER, W. (1966a): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6432 Erlangen Süd. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).

- HAARLÄNDER, W. (1966b): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6331 Röttenbach. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- HAARLÄNDER, W. (1969): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6229 Schlüsselfeld. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- VON HÄNEL, R. (1974): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6433 Lauf a.d. Pegnitz. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- HAHN, L. (1974): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 5732 Sonnefeld. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- HAMMERL, J. & SCHILLING, B. (2002): Die Böden Bayerns – Handbuch für die Böden des Keuper-Lias-Landes in Franken. – 45 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- HEGENBERGER, W. (1967): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 5932 Uetzing. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- HEGENBERGER, W. & SCHIRMER, W. (1967): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt-Nr. 5932 Ützing. – 156 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- HEGENBERGER, W. (1968): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 5833 Burgkunstadt. – 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-Nürnberg.
- HELBIG, S. (1991): Geologische Kartierung 1:25 000, u. a. auf Blatt Nr. 6030 Eltmann. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- HÖLTING, B. HAERTLÉ, T., HOHBERGER, K.-H., NACHTIGALL K. H., VILLINGER, E., WEINZIERL, W. & WROBEL, J.-P. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. – Geol. Jb., **C63**: 5–24, Hannover.
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W.G. (2005): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. – 326 S., München (Elsevier).
- HOFFMANN, D. (1970): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 5831 Seßlach. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- HORNIK, K. (2005): The R FAQ. <http://CRAN.R-project.org/doc/FAQ/>, ISBN 3-900051-08-9.
- VON HORSTIG, G. (1966): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 5635 Nordhalben. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- VON HORSTIG, G. & STETTNER, G. (1976): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 5735 Schwarzenbach am Wald – München (Bayer. Geol. L.-Amt).

- VON HORSTIG, G. (1979): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 5633 Leutenberg (Bayer. Anteil), Blatt Nr. 5634 Teuschnitz. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- VON HORSTIG, G. (1979): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 5633 Sonneberg und zum Blatt Nr. 5634 Teuschnitz. – 58 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- VON HORSTIG, G. (1982): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 5434 Leutenberg, Blatt Nr. 5533 Spechtsbrunn, Blatt Nr. 5534 Lehesten. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- HUBER, B. (1992): Der Einfluß des Trennflächengefüges auf die Grundwasserströmung in Kluffgrundwasserleitern. – Hydrogeologie und Umwelt, **5**: 293 S., Würzburg.
- ISAAKS, E. & SRIVASTAVA, R. (1989): An Introduction to Applied Geostatistics. – 561 S., New York-Oxford (Oxford University Press).
- JANETZKO, P. & ROLOFF, A. (1970): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 5931 Ebensfeld. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- JENSON, S. K. & DOMINGUE, J. O. (1988): Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **54 (11)**: 1593–1600, Sioux Falls.
- KANZ, W., SCHNITZER, W. A. & TÜRK, H.-P. (1978): Karst und Grundwasser im Malm der Nördlichen Frankenalb. – In: QUENTIN, K.-E. ANDREAS, G., GEORGOTAS, N. & SCHNITZER, W.-A. (1978): Das Mainprojekt. – Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 219–239, München.
- KILLE, K. (1970): Das Verfahren MoMnQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren, langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe monatlicher Niedrigwasserabflüsse. – Z. dt. geol. Ges., Sonderheft Hydrogeologie Hydrochemie: 89–95, Hannover.
- KLINGER, B. (1985): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5930 Ebern SW-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- KLUMP, N. (1982): Geologisch-hydrogeologische Veränderungen im Zuge der Baumaßnahmen des Main-Donau-Kanals zwischen Bamberg und Nürnberg unter besonderer Berücksichtigung umweltrelevanter Probleme. – Erlanger Geologische Abhandlungen, Heft **110**: 65 S., Erlangen.
- KNOCH, G. (1982): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 6129 Burgwindheim NW-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- KGL. BAYER. OBERBERGAMT MÜNCHEN (1892): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Steinach (Kronach) – Kgl. Preuss. Geolog. Landesanstalt (1895, Lieferung 72), Berlin.
- KÖPF, E. & ROTHASCHER, A. (1980): Das natürliche Grundwasserdargebot in Bayern im Vergleich zu den Hauptkomponenten des Wasserkreislaufes. – Schriftenreihe Bayer. L.-Amt Wasserwirtschaft, **13**: 14 S., München.
- KÖRBER, H. (1962): Die Entwicklung des Maintals. – Würzburger Geographische Arbeiten, **10**, Univ. Würzburg: 170 S., Würzburg.

- KOHONEN, T. (2001): Self-Organizing Maps. – Springer Series in Information Sciences, 3. Aufl., Vol. **30**: 501 S., Berlin.
- KOSCHEL, R. (1970): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25.000 Blatt 6031 Bamberg Nord. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- KOSCHEL, R. (1970): Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Blatt 6031 Bamberg Nord. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- KRAUSPE, A. (1970): Die Grundwässer des mittleren Keupers und Quartärs im westlichen Mittelfranken. – Diss. Univ. Berlin: 204 S., Berlin.
- KRUMBECK, L. (1956): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6232 Forchheim. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- KRUMBECK, L. (1968): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6332 Erlangen Nord. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- KUS, G., PAMER, R. & WAGNER, B. (2006): Digitale Erstellung und Vernetzung (hydro-)geologischer Profilschnitte innerhalb bestehender Datenstrukturen. – *Wiss. Mitt. Inst. Geo.*, **31**: 303–310, Freiberg (Technische Universität Bergakademie Freiberg Institut für Geologie).
- LAGALLY, U. (1984): Fluviale Kiese und Sande Regnitztal und Nebentäler. – *Geologica Bavarica* **86**: 405–410, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- LANG, M. (1970): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6131 Bamberg Süd. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- LANG, M. (1970): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25.000, Blatt 6131 Bamberg Süd. – 150 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- LANGGUTH, H.R. & VOIGT, R. (2004): Hydrogeologische Methoden. – 1005 S., Berlin-Heidelberg-New York (Springer).
- LEITZ, F. (1995): Hydrogeologisches Gutachten zum Grundwassererkundungsgebiet 4.03 (4.005) Buttenheim-Eggolsheim, Landkreise Bamberg und Forchheim. – Gutachten, Redwitz a.d. Rodach (unveröff.).
- LEITZ, F. (Stand 2003): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5731 Coburg. – Manuskriptkarte, Redwitz (unveröff.).
- LINDNER, C. (1984): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 6030 Eltmann SW-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- LINHARDT, E. & ZARBOK, P. (2005): Geochemischer Atlas natürlicher Haupt-, Neben- und Spurenelemente der Gesteine Bayerns. – *GLA-Fachberichte*, **24**: 188 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- LORETZ, H. (1882): Geologische Karte von Bayern und Thüringen 1:25 000, Blatt Nr. 5631 Meeder. – Berlin (Kgl. Preuss. Geol. L.-Anstalt).

- LORETZ, H. (1885): Erläuterung zur geologischen Spezialkarte von Preussen und den Thüringischen Staaten, Blatt Meeder. – 35 S., Berlin (Kgl. Preuss. Geol. L.-Anstalt).
- LORETZ, H. (1895): Geologische Karte von Bayern und Thüringen 1:25 000 Blatt Nr. 5733 Kronach. – Berlin (Kgl. Preuss. Geol. L.-Anstalt).
- Loretz, H. (1895): Erläuterung zur geologischen Spezialkarte von Preussen und den Thüringischen Staaten, Blatt Coburg. – 50 S., Berlin (Kgl. Preuss. Geol. L.-Anstalt).
- MALLET, J.-L. (2002): Geomodelling. – 599 S., Oxford University Press, Oxford.
- MÄRZ, K. (1977): Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Buntsandstein und Muschelkalk Nordbayerns. – Hydrochem. hydrogeolog. Mitt., **2**: 170 S., München.
- MATTHESS, G. (1970): Beziehung zwischen geologischem Bau und Grundwasserbewegung in Festgesteinen. – Abh. Hess. L.-Amt f. Bodenforsch., **58**: 105 S., Wiesbaden.
- MATTHESS, G. (1972): Durchlässigkeit und Brunneneigebigkeit im Hessischen Buntsandstein im Vergleich zu anderen Gesteinen. – Proceedings Stuttgart, Dt. Gesellschaft für Erd- und Grundbau: T3-E 1 – T3-E 12.
- MAY, H. (1985): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5930 Ebern NE-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- MEYENHÖFER, U. (1981): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 6129 Burgwindheim NE-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- MEYER, R. K .F. (1972a): Stratigraphie und Fazies des Frankendolomits (Malm), Teil 1. Nördliche Frankenalb. – Erlanger geol. Abh., **91**: 28 S., Erlangen.
- MEYER, R.K.F. (1972b): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 5933 Weismain. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- MEYER, R.K.F. (1972c): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6033 Hollfeld. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- MEYER, R.K.F. (1979): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6132 Buttenheim. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- MEYER, R. K .F. & SCHMIDT-KALER, H. (1996): Jura. – In: BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000. 4. Aufl.:90–111, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- MOTAMED, G. (1980): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5631 Meeder. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Erlangen-Nürnberg (unveröff.).
- MÜLLER, K. W. (1959): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6233 Ebermannstadt. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- MÜLLER, W. (1970): Die hydrogeologischen Verhältnisse im mittleren Keuper südlich Nürnbergs. – Diss. Univ. München: 90 S., München.

- NATERMANN, E. (1951): Die Linie des langfristigen Grundwassers (AuL) und die Trockenwetterabflüsse (TWL). – Wasserwirtschaft, S. 12ff., Sonderh., Stuttgart.
- OPFERMANN, C. (1983): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 6030 Eltmann SE-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- PITSCHKA, B. (1985): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5930 Ebern NW-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- PLAIL, H. (1985): Quartär und Hydrogeologie im unteren Wiesenttal. – Dipl.-Arbeit Univ. Erlangen-Nürnberg (unveröff.).
- POLL, K. (1978): Grundwasser und Grundwasserchemismus des Regnitztalzuges und seiner Einzugsgebiete. – In: QUENTIN, K.-E. ANDREAS, G., GEORGOTAS, N. & SCHNITZER, W.-A. (1978): Das Mainprojekt. – Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 190–205, München.
- POLL, K. (1978): Fränkische Rezat und Rednitz. – In: QUENTIN, K.-E. ANDREAS, G., GEORGOTAS, N. & SCHNITZER, W.-A. (1978): Das Mainprojekt. – Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 50–65, München.
- PRODROMOS, A., FYTROLAKIS, N., HEGENBERGER, W., MEYER, R.K.F. & STRASSNER, C. (1972): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6032 Scheßlitz. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- PUFF, P. (Stand 2003): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5632 Neustadt b. Coburg. – Manuskriptkarte, Jena (unveröff.).
- QUENTIN, K.-E., ANDREAS, G., GEORGOTAS, N. & SCHNITZER, W.-A. (1978): Das Mainprojekt. – Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 314 S., München.
- REGIERUNG VON OBERFRANKEN (i.Vorb.): Bilanz und Prognose zur Trinkwasserversorgung in Oberfranken. – Bayreuth.
- RÖDIGER, T. (2005): Charakterisierung und Modellierung des Buntsandsteinfließsystem im Osten des Thüringer Beckens. – Diss. Univ. Jena: 210 S., Jena.
- RÖTZER, T. (1996): Neuartige Karten der Phänologie und des Wasserhaushalts von Bayern unter Berücksichtigung möglicher künftiger Klimaverhältnisse. – Diss. Univ. München: 181 S., München.
- SAMMON, J. W. (1969): A nonlinear mapping for data structure analysis. – IEE Transactions on Computers, **C-18/5**: 401–409, Los Alamos.
- SCHÄFER, U. (1992): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5631 Meeder. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Erlangen-Nürnberg (unveröff.).
- SCHERZER, T. (1978): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 6130 Burgebrach SE-Quadrant. –Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).

- SCHIRMER, W. (1966): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5832 Lichtenfels. – Diss. Univ. Erlangen: 116 S., Erlangen.
- SCHIRMER, W. (1978): Aufbau und Genese der Talaue. – In: QUENTIN, K.-E. ANDREAS, G., GEORGOTAS, N. & SCHNITZER, W.-A. (1978): Das Mainprojekt. – Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, **7**: 145–154, München.
- SCHMITT, P. (1982): Herkunft und Beschaffenheit oberflächennaher Grundwässer und mineralstoffreicher Tiefenwässer im Muschelkalk-Keupergebiet des Grabfeldgaaes (Ufr.). – Diss. Univ. München, **VII**: 235 S., München.
- SCHÖNWIESE, C.D. (2000): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. – 3. Aufl.: 298 S., Berlin-Stuttgart (Borntraeger).
- SCHREIBER, S. (1954): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 5733 Kronach. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Erlangen-Nürnberg (unveröff.).
- SCHRÖDER, B. (1978): Fränkische Schweiz und Vorland. – Sammlung Geologischer Führer **50**: 86 S., Berlin-Stuttgart (Borntraeger).
- SCHUBUTH, H. (1973): Beziehung zwischen Grundwasserabfluss und tektonischem Bau im Buntsandstein des Mainvierecks zwischen Lohr und Aschaffenburg im Spessart. – Diss. Univ. Frankfurt a. M.: 185 S., Frankfurt.
- STAMATIS, G. (1981): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 6129 Burgwindheim SE-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- STEINBRENNER, U. (1980): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 6130 Burgebrach NW-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- STEUER, C. (1973): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 6130 Burgebrach SW-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- TGU, TECHNOLOGIEBERATUNG GRUNDWASSER UND UMWELT GMBH (1996): Grundwassermodell für die Wasserfassung West der Erlanger Stadtwerke AG. – Gutachten, Erfurt (unveröff.).
- TGU, TECHNOLOGIEBERATUNG GRUNDWASSER UND UMWELT GMBH (1997): Grundwassermodell Erlangen-Möhrendorf. – Gutachten, Aschaffenburg (unveröff.).
- TRINKWV (2001): Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001 (BGBl. I S. 959), geändert durch Artikel 363 der Verordnung vom 31. Oktober 2006 (BGBl. I S. 2407).
- TÜRK, H.-P. (1978): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 6130 Burgebrach NE-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- UDLUFT, P. (1971): Hydrogeologie des Oberen Sinntales, ein Beitrag zur Kenntnis der bayerischen Rhön. – *Geologica Bavarica*, **64**: 365–384, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- UDLUFT, P. (1979): Das Grundwasser Frankens und angrenzender Gebiete. – *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, **31**: 5–128, Graz.

- UDLUFT, P., SCHÄFER, U., WINTER, J. & BGU, BÜRO FÜR GEOTECHNIK UND UMWELT (1997): Hydrogeologisches Gutachten in: Landschaftsökologische und hydrogeologisch-hydrologische Rahmenuntersuchung zum Abbau von Sand und Kies im oberfränkischen Main- und Regnitztal. – Schriftenreihe der Bayerischen Sand- und Kiesindustrie, **10/97**, München.
- UDLUFT, P. & BGU, BÜRO FÜR GEOTECHNIK UND UMWELT (2003): Hydrogeologisches Gutachten zum beantragten Wasserschutzgebiet Süd der Stadtwerke Bamberg. – Gutachten, Würzburg (unveröff.).
- WAGNER, B. (2000): Kurzanleitung zum Programm SWERT zur Bestimmung des Punktwerts der Grundwasserüberdeckung von Bohrungsprofilen und stratigraphischen Einheiten. – 4 S., (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (unveröff.).
- WAGNER, B., TÖPFNER, C., LISCHIED, G., SCHOLZ, M., KLINGER, R. & KLAAS, P. (2003): Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns. – GLA Fachberichte, **21**: 250 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- WAGNER, B., DIEPOLDER, G., SCHÄFER, B. & SCHMIDBAUER, S. (2007): Hydrogeologische Karte von Bayern – Anleitung zur digitalen Verarbeitung und Vorhaltung der Daten der Hydrogeologischen Landesaufnahme. – 47 S., Kartieranleitung (Bayer. Landesamt für Umwelt) (unveröff.).
- WEHR, R. (1981): Geologische Kartierung 1:25 000 auf Blatt Nr. 6129 Burgwindheim SW-Quadrant. – Diplomarbeit (Teil 1: Kartierung) Univ. Würzburg (unveröff.).
- WIPPERN, J. (1955): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6134 Waischenfeld. – München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- WROBEL, J.-P. (1980): Wechselbeziehungen zwischen Baggerseen und Grundwasser in gut durchlässigen Schottern. – GWF-Wasser/Abwasser, **121/4**: 165–173, München.
- WUNDT, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. – In: Graumann, R.: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung. – Forsch. Dtsch. Landeskunde., **104**: 47–54, Remagen.

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1-1: Hydrogeologische Teilräume Bayerns mit Lage der Region Oberfranken West.
- Abb. 3-1: Schematisierte Abfolge der hydrogeologischen Einheiten in der Planungsregion Oberfranken West.
- Abb. 3-2: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte altpaläozoischer Einheiten des Frankenwaldes.
- Abb. 3-3: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im Unteren und Mittleren Buntsandstein.
- Abb. 3-4: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im Gipskeuper.
- Abb. 3-5: Quellstollen im Bereich des dolomitischen Mittleren Burgsandsteins (Hohenmühle, Viereth).
- Abb. 3-6: Grundwassergleichen des Sandsteinkeuper im Grenzbereich der Regionen 4 und 7 (schwarze Punkte: Belegpunkte wie z.B. Brunnen, Quellen etc.; orange Punkte: Hilfspunkte wie z.B. Gewässerhöhe).
- Abb. 3-7: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im Sandsteinkeuper.
- Abb. 3-8: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im Rhätolias.
- Abb. 3-9: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte des Malm.
- Abb. 3-10: Untersuchte Haupt- und Nebentäler in der Region 4 und angrenzenden Regionen.
- Abb. 3-11: Höhenlage der Quartärbasis im Bamberger Kessel und nördlichen Regnitztal (Relief 5-fach überhöht).
- Abb. 3-12: Prozentualer Anteil hydraulisch relevanter Korngruppen am grundwassererfüllten Gesamtprofil der Haupt- und Nebentäler.
- Abb. 3-13: Grundwassergleichen im Maintalquartär nach der Stichtagsmessung vom 21.09. bis 22.09.2004; Topographie aus der TK50 des Bayerischen Landesamtes für Vermessung und Geoinformation.
- Abb. 3-14: Grundwassergleichen im Regnitztalquartär nach der Stichtagsmessung vom 21.09. bis 22.09.2004; Topographie aus der TK50 des Bayerischen Landesamtes für Vermessung und Geoinformation.
- Abb. 3-15: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im Quartär der Haupttäler.
- Abb. 3-16: Strukturgeologisches 3D-Modell der Region 4 mit allen modellierten Schichtoberflächen, Geländeoberfläche und Störungen.
- Abb. 3-17: Verbreitung und Lage der Schichtbasisfläche Sandsteinkeuper (links) und Malm (rechts) in der Planungsregion 4 sowie verwendetes Störungsnetzwerk.
- Abb. 4-1: Lage der Entnahmestellen der Grundwässer aus der Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge (weiß), Tonschieferfolge (gelb) und den Quarziten (orange) des Paläozoikum.

- Abb. 4-2: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Paläozoikum im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAKE & LANGGUTH (1967); blau: Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge (43); rot: Tonschiefer (28); grün: Quarzite (6).
- Abb. 4-3: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus der Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge (links) und den Tonschiefern (rechts) im Stiff-Diagramm (Probenahmestellen: Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge 43; Tonschiefer 28).
- Abb. 4-4: Lage der Entnahmestellen im Rotliegend (orange), Oberen (gelb) und Unteren/Mittleren (weiß) Buntsandstein und Muschelkalk (violett).
- Abb. 4-5: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Rotliegend im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAKE & LANGGUTH (1967) (10 Probenahmestellen).
- Abb. 4-6: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Rotliegend im Stiff-Diagramm (10 Probenahmestellen).
- Abb. 4-7: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Buntsandstein im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAKE & LANGGUTH (1967); blau: Oberer Buntsandstein (11); rot: Unterer/Mittlerer Buntsandstein (56).
- Abb. 4-8: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Oberen (links) und dem Unteren/Mittleren (rechts) Buntsandstein im Stiff-Diagramm; (Probenahmestellen: Oberer Buntsandstein 11; Unterer-Mittlerer Buntsandstein 56).
- Abb. 4-9: Lage der Entnahmestellen im Unteren Keuper (weiß), Grenzdolomit (orange) und Gipskeuper (gelb).
- Abb. 4-10: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Unteren Keuper (blau) und Gipskeuper (rot) im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAKE & LANGGUTH (1967). (Probenahmestellen: Unterer Keuper 16; Gipskeuper 13).
- Abb. 4-11: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Unteren Keuper (links) und Gipskeuper (rechts) im Stiff-Diagramm (Probenahmestellen: Unterer Keuper 16; Gipskeuper 13).
- Abb. 4-12: Lage der Entnahmestellen im Sandsteinkeuper; silikatisch-karbonatische Wässer (weiß), Austauschwässer (gelb) und Mineralwässer (orange).
- Abb. 4-13: Schematische Verbreitung der Fazies im Sandsteinkeuper mit Darstellung der Gesamthärte der untersuchten Grundwässer des silikatisch-karbonatischen Typs sowie der Mineral- und Austauschwässer.
- Abb. 4-14: Chemische Zusammensetzung der Grundwassertypen nach Tabelle 4-1 (kms1 – kms 5) und der Austauschwässer des Sandsteinkeuper im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAKE & LANGGUTH (1967); Anzahl der Probenahmestellen jeweils in Klammern.
- Abb. 4-15: Chemische Zusammensetzung der silikatisch-karbonatischen Grundwässer (links) und der Austauschwässer (rechts) des Sandsteinkeuper im Stiff-Diagramm (Probenahmestellen: silikatisch-karbonatische Grundwässer 217 ; Austauschwässer 23).
- Abb. 4-16: Lage der Entnahmestellen der silikatischen (weiß) und karbonatisch-sulfatischen (gelb) Grundwässer sowie der Austauschwässer (orange) des Rhätolias.

- Abb. 4-17: Chemische Zusammensetzung der silikatischen (blau) und karbonatisch-sulfatischen (rot) Grundwässer sowie der Austauschwässer des Rhätolias (violett) im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (Probenahmestellen: silikatisch 32, karbonatisch-sulfatisch 24, Austauschwässer 6).
- Abb. 4-18: Chemische Zusammensetzung der silikatischen (links) und karbonatisch-sulfatischen (rechts) Grundwässer des Rhätolias im Stiff-Diagramm (Probenahmestellen: silikatisch 32, karbonatisch-sulfatisch 24).
- Abb. 4-19: Chemische Zusammensetzung der Austauschwässer des Rhätolias im Stiff-Diagramm (6 Probenahmestellen).
- Abb. 4-20: Lage der Entnahmestellen der Grundwässer aus dem Dogger (weiß) und Lias (gelb).
- Abb. 4-21: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Dogger im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (121 Probenahmestellen).
- Abb. 4-22: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Dogger im Stiff-Diagramm (121 Probenahmestellen).
- Abb. 4-23: Lage der Entnahmestellen der Grundwässer aus dem Seichten (weiß) und Tiefen (gelb) Malmkarst.
- Abb. 4-24: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Seichten (rot) und Tiefen (blau) Malmkarst im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (Probenahmestellen: Seichter Malmkarst 116, Tiefer Malmkarst 68).
- Abb. 4-25: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Seichten (links) und Tiefen (rechts) Malmkarst im Stiff-Diagramm (Probenahmestellen: Seichter Malmkarst 116, Tiefer Malmkarst 68).
- Abb. 4-26: Lage der Entnahmestellen der Grundwässer aus dem Quartär.
- Abb. 4-27: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Quartär im Piper-Diagramm mit der klassifikatorischen Teilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967); (27 Probenahmestellen).
- Abb. 4-28: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer aus dem Quartär im Stiff-Diagramm (27 Probenahmestellen).
- Abb. 4-29: Fehlerquadratsumme in Abhängigkeit von der Zahl der Cluster.
- Abb. 4-30: Prozentuale Zuordnung der Messstellen der verschiedenen Einheiten zu den sechs Clustern.
- Abb. 4-31: Darstellung der Messstellen in der Selbstorganisierenden Karte. Farblich kodiert sind jeweils die Parameterwerte in Prozent des jeweiligen Maximalwertes.
- Abb. 4-32: Darstellung der Messstellen in der Selbstorganisierenden Karte. Farblich kodiert sind jeweils die Parameterwerte in Prozent des jeweiligen Maximalwertes (Abb. 4-31).
- Abb. 4-33: Lage der Messstellen der verschiedenen hydrogeologischen Einheiten in der selbstorganisierenden Karte.
- Abb. 8-1: Kartengrundlagen zur Erstellung der Hydrogeologischen Karte 1:50 000 und 1:100 000 mit Darstellung der verfügbaren Profil- und Blattsschnitte der Hydrogeologischen Karte 1:50 000 im Rahmen der hydrogeologischen Landesaufnahme der Planungsregion 4 Oberfranken West.

Verzeichnis der Tabellen

- Tab. 3-1: Stützpunkte zur Konstruktion der Grundwassergleichen einzelner Grundwasserleiter
- Tab. 3-2: Quartärmächtigkeiten, Flurabstände und Grundwassermächtigkeiten in den Nebentälern aus Bohrdaten
- Tab. 4-1: Mögliche Typen der silikatisch bis karbonatischen Sandsteinkeuperwässer
- Tab. 4-2: Mineralreiche Grundwässer aus dem Coburger Sandstein und Blasensandstein (kmBL + C), untergeordnet Lehrbergschichten (kmL), in den Forschungsbohrungen Marbach und Daschendorfer Forst
- Tab. 4-3: Aufteilung des verwendeten Datensatzes nach hydrogeologischen Einheiten (Grundwässer)
- Tab. 4-4: Zuordnung der Proben der Einheiten mit jeweils mindestens 10 Messstellen nach der Diskriminanzanalyse (angegeben ist jeweils der Prozentsatz, bezogen auf die Gesamtzahl der Proben pro Einheit (rechte Spalte); Werte zwischen 10% und 50% sind blau hervorgehoben, Werte > 50% sind rot und fett gedruckt)
- Tab. 6-1: Bewertung (Punktzahlen) der Grundwasserüberdeckung nach den Tabellen in DIEPOLDER (1995), gegliedert nach hydrogeologischen Einheiten
- Tab. 8-1: Kartengrundlagen zur Erstellung der Hydrogeologischen Karte 1:50 000 und 1:100 000 mit Bezugsnummern zur Abbildung 8-1 (GLA = ehemaliges Bayerisches Geologisches Landesamt, GK = Amtliche Geologische Karte, BGR = Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

Verzeichnis der Abkürzungen und Maßeinheiten

Abkürzungen

Ao	Oberflächenabfluss
BayLfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
BG	Bestimmungsgrenze
BIS-BY	Bodeninformationssystem Bayern
CO ₂	Kohlendioxid
DGM50	Digitales Geländemodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
E	Ost
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Globales Positionssystem
HK50	Hydrogeologische Karte im Maßstab 1:50 000
HK100	Hydrogeologische Karte im Maßstab 1:100 000
INFOWas	Informationssystem Wasser
k _r -Wert	Durchlässigkeitsbeiwert
Mio.	Millionen
m u. GOK	Meter unter Geländeoberkante
m ü. NN	Meter über Normalnull
n	Anzahl
N	Nord
nFk	nutzbare Feldkapazität
NG	Nachweisgrenze
NN	Normal Null (Meeresspiegel)
S	Süd
TIN	triangulated irregular network (Dreiecksvermaschung)
Tsd.	Tausend
TK50	Topographische Karte im Maßstab 1:50 000
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
W	West
WVU	Wasserversorgungsunternehmen
ZV	Zweckverband

Vorsätze zur Bezeichnung von Vielfachen und Teilen der Einheit

k	Kilo (10^3)
d	Dezi (10^{-1})
c	Centi (10^{-2})
m	Milli (10^{-3})

Maßeinheiten

a	Jahr
s	Sekunde
g	Gramm
μg	Mikrogramm
l	Liter
m	Meter
m^2	Quadratmeter
km^2	Quadratkilometer
m^3	Kubikmeter
meq	Millimol Äquivalentkonzentration
mol	Mol (Einheit der Stoffmenge)
%	Prozent
‰	Promill
°C	Grad Celsius
°dH	Grad Deutsche Härte
Pkte/m	Punkte pro Meter

Anhang

Anhang 1:

Grundwasserbeschaffenheit – Verzeichnis der analysierten Parameter, Analysemethoden, Nachweis- und Bestimmungsgrenzen sowie Teilprobenbehandlung

Anhang 2:

Grundwasserbeschaffenheit – Verzeichnis der statistischen Maßzahlen der physiko-chemischen Parameter der in der Planungsregion 4 Oberfranken West untersuchten Grundwasserproben, geordnet nach hydrogeologischen Einheiten

Anhang 3:

Grundwasserbeschaffenheit – Verzeichnis der Spannweitendiagramme der physiko-chemischen Parameter der in der Planungsregion 4 Oberfranken West untersuchten Grundwasserproben

Anhang 4:

Durchlässigkeitsbeiwerte – Verzeichnis der k_f -Werte der untersuchten hydrogeologischen Einheiten in der Planungsregion 4 Oberfranken West; ermittelt aus Pumpversuchen für Einheiten mit mehr als 10 Einzeldaten

Anhang 1:

Grundwasserbeschaffenheit – Verzeichnis der analysierten Parameter, Analysemethoden, Nachweis- und Bestimmungsgrenzen sowie Teilprobenbehandlung

Anhang 1-1: Verzeichnis der untersuchten Parameter, Analysemethoden, Nachweis- und Bestimmungsgrenzen sowie der Teilprobenbehandlung der hydrochemischen Standardanalysen.

Parameter	Einheit	Meß- methode	Teil- probe	Nachweis- grenze (NG)	Bestimmungs- grenze (BG)
Geländeparameter					
Wassertemperatur	[°C]	WTW	0		
pH-Wert (Gelände)		WTW	0		
elektr. Leitfähigkeit	[µS/cm]	WTW	0		
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	WTW	0		0,1
O ₂ -Sättigung	[%]	WTW	0		0,1
CO ₂ frei	mg/l	Titration	0		
Laborwerte					
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	IC	1	0,33	0,99
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	IC	1	0,48	1,45
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	IC	1	0,29	0,86
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	IC	1	1,4	4,2
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	IC	1	0,32	0,97
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	IC	1	2,37	7,1
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	IC	1	1,08	3,25
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	Titration	3	1,72	5,16
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	ICP/OES	2	0,01308	0,05232
K ⁺ Kalium	[mg/l]	ICP/OES	2	0,05739	0,22955
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	IC	2	0,66	1,97
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	ICP/OES	2	0,02724	0,10897
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	ICP/OES	2	0,02558	0,10231
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	ICP/OES	2	0,00269	0,01078
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	ICP/MS	2	0,000004	0,000015
Si Silicium	[mg/l]	OES	2	0,32	1,27
Gesamtmineralisation	[mg/l]	berechnet			
Gesamthärte	[°dH]	berechnet		0,00971	0,0388
Karbonathärte	[°dH]	berechnet		0,08	0,24
Sättigungsindex		berechnet			
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	Titration			
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	berechnet		0,03	0,08

Parameter	Einheit	Meß- methode	Teil- probe	Nachweis- grenze (NG)	Bestimmungs- grenze (BG)
Ag Silber	[µg/l]	ICP/MS	2	0,003	0,013
Al Aluminium	[µg/l]	ICP/MS	2	0,211	0,846
As Arsen	[µg/l]	ICP/MS	2	0,013	0,051
Au Gold	[µg/l]	ICP/MS	2	0,007	0,03
B Bor	[µg/l]	ICP/MS	2	0,368	1,472
Ba Barium	[µg/l]	ICP/MS	2	0,029	0,116
Be Beryllium	[µg/l]	ICP/MS	2	0,013	0,05
Bi Wismut	[µg/l]	ICP/MS	2	0,002	0,008
Cd Cadmium	[µg/l]	ICP/MS	2	0,002	0,009
Ce Cer	[µg/l]	ICP/MS	2	0,001	0,006
Co Cobalt	[µg/l]	ICP/MS	2	0,001	0,004
Cr Chrom	[µg/l]	ICP/MS	2	0,048	0,191
Cs Cäsium	[µg/l]	ICP/MS	2	0,0003	0,001
Cu Kupfer	[µg/l]	ICP/MS	2	0,013	0,053
Hg Quecksilber	[µg/l]	ICP/MS	2	0,007	0,027
La Lanthan	[µg/l]	ICP/MS	2	0,0003	0,001
Li Lithium	[µg/l]	ICP/MS	2	0,011	0,043
Mo Molybdän	[µg/l]	ICP/MS	2	0,015	0,06
Ni Nickel	[µg/l]	ICP/MS	2	0,035	0,14
Pb Blei	[µg/l]	ICP/MS	2	0,005	0,021
Rb Rubidium	[µg/l]	ICP/MS	2	0,001	0,006
Sb Antimon	[µg/l]	ICP/MS	2	0,002	0,007
Se Selen	[µg/l]	ICP/MS	2	0,396	1,583
Sn Zinn	[µg/l]	ICP/MS	2	0,008	0,03
Sr Strontium	[µg/l]	ICP/MS	2	0,009	0,036
Th Thorium	[µg/l]	ICP/MS	2	0,002	0,01
Tl Thallium	[µg/l]	ICP/MS	2	0,001	0,004
U Uran	[µg/l]	ICP/MS	2	0,0005	0,002
V Vanadium	[µg/l]	ICP/MS	2	0,007	0,027
Y Yttrium	[µg/l]	ICP/MS	2	0,0003	0,001
Zn Zink	[µg/l]	ICP/MS	2	0,025	0,1

Messmethoden:

- IC Ionenchromatographie
 ICP/MS Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma
 ICP/OES Optisches Emissionsspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma
 WTW WTW-Feldmeßgeräte

Teilproben:

- 0 Vor-Ort-Messungen
 1 100 ml, steril filtriert in Polyethylenflasche
 2 100 ml, steril filtriert und angesäuert [HNO₃ (Suprapur)] in Polyethylenflasche
 3 1 000 ml, unfiltriert in Polyethylenflasche

Anhang 2:

Grundwasserbeschaffenheit – Verzeichnis der statistischen Maßzahlen der physiko-chemischen Parameter, geordnet nach hydrogeologischen Einheiten

Die folgenden Tabellen geben für die unterschiedlichen hydrogeologischen Einheiten die statistischen Maßzahlen der einzelnen physiko-chemischen Parameter der Grundwasserbeschaffenheit an. Bei geringem Probenumfang ($N < 10$) werden die einzelnen Perzentilwerte nicht angegeben, sondern nur Minimum, Median und Maximum. Die jeweiligen Nachweis- und Bestimmungsgrenzen (NG bzw. BG) der einzelnen Parameter sind in Anhang 1 aufgelistet.

Anhang 2-1: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus der Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge

2-1 Grauwacke-Tonschiefer-Wechselfolge										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	43	0	6,3	7,6	8,1	8,8	9,4	10,5	12,6
pH-Wert (Gelände)		43	0	4,20	4,80	5,70	6,27	7,17	7,39	7,80
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	42	0	11,0	79,1	100,8	126,0	203,0	280,6	453,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	34	0	2,20	5,29	7,58	9,60	10,10	11,90	12,80
O ₂ -Sättigung	[%]	20	0	25,0	47,7	77,5	87,5	100,0	100,4	104,0
CO ₂ frei	[mg/l]	43	0	0,9	5,4	7,7	14,5	28,2	60,0	121,4
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	24	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	39	0	< BG	1,72	2,55	4,15	9,19	27,24	51,60
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	28	28	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	40	7	< NG	< NG	< BG	4,27	8,05	22,25	30,80
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	41	40	< NG	< NG	< BG	< NG	< NG	< NG	< BG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	41	0	7,20	10,75	15,24	19,37	26,13	37,00	44,70
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	28	28	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	40	3	< NG	< BG	9,6	19,2	61,2	94,7	164,1
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	38	0	1,478	2,512	3,223	4,793	8,050	10,60	21,67
K ⁺ Kalium	[mg/l]	38	0	< BG	0,300	0,436	0,590	0,800	0,933	1,770
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	41	41	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	40	0	2,670	4,424	9,335	11,65	18,25	21,60	33,39
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	41	0	1,422	2,379	3,546	5,200	6,608	8,600	10,15
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	40	21	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0400	0,0815	0,9700
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	30	2	< NG	0,00004	0,00053	0,00262	0,02712	0,1649	0,3712
Si Silicium	[mg/l]	39	0	1,64	2,87	3,29	4,11	4,57	5,01	7,00
Gesamtmineralisation	[mg/l]	40	0	38,30	48,74	65,88	100,0	140,3	200,7	325,0
Gesamthärte	[°dH]	41	0	0,919	1,36	1,93	2,92	4,20	5,17	11,0
Karbonathärte	[°dH]	40	3	< NG	< BG	0,44	0,88	2,81	4,35	7,53
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		39	0	-6,81	-5,49	-4,52	-3,51	-1,91	-1,42	-0,77
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	43	0	0,02	0,12	0,18	0,33	0,64	1,36	2,76
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	40	4	< NG	< BG	0,158	0,315	1,003	1,551	2,689
Ag Silber	[µg/l]	23	22	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,043
Al Aluminium	[µg/l]	30	1	< NG	5,091	9,865	18,75	151,4	644,2	1690
As Arsen	[µg/l]	30	18	< NG	< NG	< NG	< NG	0,372	1,712	7,346
Au Gold	[µg/l]	23	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
B Bor	[µg/l]	28	1	< NG	2,050	2,955	4,644	9,275	15,76	33,72
Ba Barium	[µg/l]	29	3	< NG	3,05	13,7	54,3	77,2	102	189
Be Beryllium	[µg/l]	30	15	< NG	< NG	< NG	< NG	0,079	0,652	1,250
Bi Wismut	[µg/l]	30	24	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,030	0,480
Cd Cadmium	[µg/l]	30	5	< NG	< NG	< BG	0,026	0,085	0,282	0,620
Ce Cer	[µg/l]	20	0	0,014	0,032	0,067	0,146	0,316	0,728	0,935
Co Cobalt	[µg/l]	30	5	< NG	< NG	< NG	0,007	0,025	0,199	2,160
Cr Chrom	[µg/l]	29	17	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,305
Cs Cäsium	[µg/l]	30	7	< NG	< NG	< BG	0,0120	0,0400	0,0936	0,1880
Cu Kupfer	[µg/l]	30	2	< NG	0,262	0,339	0,587	0,913	1,569	2,281
Hg Quecksilber	[µg/l]	30	27	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	1,260
La Lanthan	[µg/l]	26	4	< NG	< NG	0,0073	0,0255	0,0545	0,2590	0,4000
Li Lithium	[µg/l]	29	0	0,546	0,914	1,280	1,937	3,398	6,670	10,25
Mo Molybdän	[µg/l]	29	14	< NG	< NG	< NG	< BG	0,133	0,402	0,840
Ni Nickel	[µg/l]	29	3	< NG	< NG	< NG	0,310	1,412	5,540	7,858
Pb Blei	[µg/l]	30	18	< NG	< NG	< NG	< NG	0,195	0,623	2,280
Rb Rubidium	[µg/l]	30	0	< BG	0,219	0,270	0,412	0,771	1,492	2,898
Sb Antimon	[µg/l]	28	18	< NG	< NG	< NG	< NG	0,056	0,133	0,285
Se Selen	[µg/l]	30	25	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	4,035
Sn Zinn	[µg/l]	30	17	< NG	< NG	< NG	< NG	0,055	0,167	0,400
Sr Strontium	[µg/l]	27	0	17,0	28,5	44,2	58,5	88,1	110	272
Th Thorium	[µg/l]	30	22	< NG	< NG	< NG	< NG	0,038	0,332	1,930
Tl Thallium	[µg/l]	30	27	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,005	0,350
U Uran	[µg/l]	30	5	< NG	< NG	0,0048	0,0295	0,0678	0,3518	0,8950
V Vanadium	[µg/l]	30	26	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,490
Y Yttrium	[µg/l]	26	1	< NG	0,0150	0,0568	0,0830	0,2318	0,4085	0,7000
Zn Zink	[µg/l]	30	0	0,586	1,316	2,277	6,575	19,51	31,63	82,35

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-2: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Tonschiefer

2-2 Tonschiefer										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	28	0	6,9	7,4	8,0	8,5	9,5	10,9	12,5
pH-Wert (Gelände)		28	0	5,32	5,87	6,46	7,25	7,40	7,60	8,20
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	27	0	84,0	101,4	154,5	231,0	344,5	422,6	522,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	23	0	0,40	3,08	9,00	10,20	10,85	11,82	13,60
O ₂ -Sättigung	[%]	11	0	4,0	10,1	90,0	96,9	99,5	100,0	100,0
CO ₂ frei	[mg/l]	28	0	2,6	4,4	7,9	13,0	23,9	27,5	29,0
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	16	12	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	26	0	< BG	1,63	2,09	3,51	7,92	9,75	13,80
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	17	16	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	28	3	< NG	< BG	< BG	5,38	11,18	18,85	31,70
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	28	28	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	27	0	7,61	16,34	24,15	33,81	46,36	64,96	105,90
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	17	17	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	28	0	< BG	16,7	33,3	92,3	118,0	155,3	165,6
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	26	0	1,445	1,688	2,387	3,429	4,928	5,700	7,600
K ⁺ Kalium	[mg/l]	27	0	< BG	< BG	< BG	0,570	0,768	0,978	1,300
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	28	28	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	28	0	6,100	8,297	17,77	32,84	58,32	66,41	81,29
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	27	0	1,367	2,732	3,785	4,900	8,049	9,940	11,90
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	28	10	< NG	< NG	< NG	0,0265	0,1073	0,5887	1,500
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	14	1	< NG	0,00004	0,00012	0,00030	0,00126	0,01078	0,02067
Si Silicium	[mg/l]	28	0	1,50	1,86	2,23	2,99	4,13	4,87	5,23
Gesamtmineralisation	[mg/l]	28	0	54,24	70,82	108,9	179,4	277,0	346,2	381,0
Gesamthärte	[°dH]	28	0	1,64	2,03	3,50	5,54	9,27	12,3	13,5
Karbonathärte	[°dH]	28	0	< BG	0,76	1,53	4,23	5,41	7,13	7,60
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		28	0	-5,03	-4,16	-2,86	-1,36	-0,92	-0,73	-0,57
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	28	0	0,06	0,10	0,18	0,30	0,54	0,63	0,66
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	28	0	< BG	0,273	0,544	1,513	1,932	2,546	2,714
Ag Silber	[µg/l]	14	14	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Al Aluminium	[µg/l]	16	1	< NG	1,355	2,240	4,788	6,757	10,60	13,51
As Arsen	[µg/l]	17	12	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	1,414	3,630
Au Gold	[µg/l]	14	14	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
B Bor	[µg/l]	16	0	< BG	1,641	2,786	3,996	7,295	8,467	22,17
Ba Barium	[µg/l]	17	6	< NG	< NG	< NG	13,8	35,8	52,9	105
Be Beryllium	[µg/l]	17	9	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,420
Bi Wismut	[µg/l]	17	14	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,010	0,020
Cd Cadmium	[µg/l]	15	6	< NG	< NG	< NG	< BG	0,012	0,029	0,292
Ce Cer	[µg/l]	12	0	0,018	0,024	0,030	0,047	0,070	0,084	0,101
Co Cobalt	[µg/l]	15	6	< NG	< NG	< NG	0,010	0,017	0,072	0,431
Cr Chrom	[µg/l]	17	8	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,379	0,841
Cs Cäsium	[µg/l]	17	3	< NG	< NG	0,0010	0,0200	0,1800	0,3734	0,5350
Cu Kupfer	[µg/l]	16	0	0,131	0,174	0,222	0,338	0,844	1,116	1,327
Hg Quecksilber	[µg/l]	17	17	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
La Lanthan	[µg/l]	15	0	0,0030	0,0044	0,0065	0,0100	0,0175	0,0200	0,0300
Li Lithium	[µg/l]	16	0	0,898	1,316	1,399	1,841	4,208	6,239	7,477
Mo Molybdän	[µg/l]	15	5	< NG	< NG	< NG	0,060	0,193	0,303	0,358
Ni Nickel	[µg/l]	15	6	< NG	< NG	< NG	0,550	2,632	3,555	7,020
Pb Blei	[µg/l]	17	14	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,233	0,590
Rb Rubidium	[µg/l]	16	2	< NG	0,050	0,209	0,371	0,901	0,983	1,666
Sb Antimon	[µg/l]	17	11	< NG	< NG	< NG	< NG	0,050	4,756	11,11
Se Selen	[µg/l]	17	12	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	2,035
Sn Zinn	[µg/l]	16	8	< NG	< NG	< NG	< BG	0,099	0,127	0,154
Sr Strontium	[µg/l]	17	0	32,6	43,6	53,4	92,1	105	139	169
Th Thorium	[µg/l]	17	12	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,078	0,300
Tl Thallium	[µg/l]	17	15	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
U Uran	[µg/l]	15	2	< NG	0,0024	0,0110	0,0400	0,1365	0,3146	2,886
V Vanadium	[µg/l]	17	17	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Y Yttrium	[µg/l]	16	0	0,0150	0,0235	0,0295	0,0695	0,1103	0,1600	0,4620
Zn Zink	[µg/l]	15	1	< NG	< BG	0,830	2,280	7,875	8,901	13,70

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-3: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Rotliegend

2-3 Rotliegend										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	10	0	9,2	9,3	9,5	9,7	10,0	10,2	10,7
pH-Wert (Gelände)		10	0	6,30	6,35	6,50	7,00	7,41	7,68	7,81
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	10	0	158,0	210,2	253,8	358,5	438,3	549,9	558,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	8	0	2,40	---	---	5,85	---	---	10,20
O ₂ -Sättigung	[%]	6	0	22,0	---	---	52,5	---	---	57,0
CO ₂ frei	[mg/l]	10	0	5,7	6,9	8,5	17,8	21,9	34,4	35,2
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	8	8	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	9	0	4,30	---	---	15,23	---	---	24,72
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	8	8	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	10	0	7,95	8,81	11,30	23,69	26,26	30,06	35,90
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	10	10	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	10	0	10,33	10,94	15,18	20,45	28,06	29,14	29,65
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	8	8	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	10	0	37,2	57,5	92,9	128,7	188,4	240,8	250,2
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	9	0	5,513	---	---	8,934	---	---	12,79
K ⁺ Kalium	[mg/l]	10	0	1,259	1,270	1,315	1,872	1,992	2,047	2,400
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	10	10	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	10	0	19,16	20,91	28,36	41,99	58,86	63,72	65,22
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	8	0	2,153	---	---	5,820	---	---	12,30
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	10	6	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,0273	0,0930
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	8	3	< NG	---	---	0,00033	---	---	0,00414
Si Silicium	[mg/l]	10	0	5,09	5,64	6,30	6,74	7,52	7,79	8,24
Gesamtmineralisation	[mg/l]	10	0	117,5	185,6	203,4	272,0	332,3	425,8	430,1
Gesamthärte	[°dH]	10	0	3,20	5,41	5,83	7,44	9,85	14,4	15,1
Karbonathärte	[°dH]	10	0	1,71	2,64	4,26	5,91	8,65	11,05	11,48
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		10	0	-2,91	-2,59	-2,28	-1,35	-0,64	-0,54	-0,47
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	10	0	0,13	0,16	0,19	0,41	0,50	0,78	0,80
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	10	0	0,611	0,942	1,522	2,111	3,087	3,946	4,100
Ag Silber	[µg/l]	8	7	< NG	---	---	< NG	---	---	0,032
Al Aluminium	[µg/l]	7	2	< NG	---	---	12,62	---	---	78,79
As Arsen	[µg/l]	8	0	0,335	---	---	1,786	---	---	12,40
Au Gold	[µg/l]	8	8	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
B Bor	[µg/l]	8	1	< NG	---	---	54,04	---	---	90,35
Ba Barium	[µg/l]	7	0	304	---	---	453	---	---	820
Be Beryllium	[µg/l]	8	5	< NG	---	---	< NG	---	---	0,287
Bi Wismut	[µg/l]	8	8	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
Cd Cadmium	[µg/l]	8	3	< NG	---	---	< BG	---	---	0,020
Ce Cer	[µg/l]	7	0	0,022	---	---	0,031	---	---	0,252
Co Cobalt	[µg/l]	8	4	< NG	---	---	0,010	---	---	0,061
Cr Chrom	[µg/l]	8	6	< NG	---	---	< NG	---	---	0,413
Cs Cäsium	[µg/l]	8	0	0,0660	---	---	0,1205	---	---	0,2140
Cu Kupfer	[µg/l]	8	0	0,482	---	---	1,080	---	---	7,729
Hg Quecksilber	[µg/l]	8	8	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
La Lanthan	[µg/l]	7	1	< NG	---	---	0,0080	---	---	0,0400
Li Lithium	[µg/l]	8	0	1,482	---	---	16,42	---	---	55,00
Mo Molybdän	[µg/l]	8	1	< NG	---	---	0,559	---	---	1,615
Ni Nickel	[µg/l]	8	4	< NG	---	---	0,154	---	---	3,768
Pb Blei	[µg/l]	8	5	< NG	---	---	< NG	---	---	0,346
Rb Rubidium	[µg/l]	8	0	1,466	---	---	2,509	---	---	3,446
Sb Antimon	[µg/l]	8	6	< NG	---	---	< NG	---	---	0,134
Se Selen	[µg/l]	8	6	< NG	---	---	< NG	---	---	< BG
Sn Zinn	[µg/l]	8	4	< NG	---	---	< BG	---	---	0,218
Sr Strontium	[µg/l]	8	0	96,2	---	---	183	---	---	464
Th Thorium	[µg/l]	8	8	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
Tl Thallium	[µg/l]	8	7	< NG	---	---	< NG	---	---	< BG
U Uran	[µg/l]	8	0	0,0400	---	---	2,326	---	---	5,365
V Vanadium	[µg/l]	8	1	< NG	---	---	1,103	---	---	8,895
Y Yttrium	[µg/l]	8	1	< NG	---	---	0,0415	---	---	0,5800
Zn Zink	[µg/l]	7	0	0,799	---	---	2,774	---	---	14,34

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-4: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Mittleren (und Unteren) Buntsandstein

2-4 Mittlerer (und Unterer) Buntsandstein										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	56	0	5,0	7,2	7,8	9,1	10,0	10,8	12,4
pH-Wert (Gelände)		56	0	4,60	5,25	5,70	6,67	7,10	7,69	8,20
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	56	0	40,0	87,1	118,3	236,2	321,3	545,5	1135,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	56	0	3,50	5,80	7,07	8,60	10,60	11,65	14,30
O ₂ -Sättigung	[%]	56	0	12,2	51,6	65,8	77,5	93,3	104,2	122,0
CO ₂ frei	[mg/l]	56	0	0,9	6,2	9,7	16,7	27,0	44,9	63,4
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	56	56	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	54	0	1,79	2,72	4,24	7,43	16,28	30,07	59,80
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	56	56	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	53	7	< NG	< NG	< BG	5,57	11,51	24,10	43,56
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	56	56	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	56	0	< BG	7,37	14,23	22,47	26,74	44,58	98,84
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	51	51	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	56	1	< NG	6,7	10,7	48,2	140,0	203,2	397,8
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	54	1	< NG	1,688	2,337	3,030	5,786	14,33	27,95
K ⁺ Kalium	[mg/l]	55	1	< NG	2,040	3,105	3,729	4,490	6,224	7,540
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	56	56	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	56	0	1,790	6,153	10,22	22,58	38,67	61,37	109,2
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	56	0	0,748	1,861	2,671	5,029	10,70	19,49	53,79
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	55	45	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0200	0,1413
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	56	6	< NG	0,00009	0,00045	0,00301	0,01507	0,05599	0,6071
Si Silicium	[mg/l]	55	0	2,60	3,12	3,63	4,30	4,89	5,26	6,68
Gesamtmineralisation	[mg/l]	55	0	40,11	52,93	73,36	150,9	243,5	407,3	800,0
Gesamthärte	[°dH]	56	0	0,422	1,39	1,96	4,47	8,25	13,1	25,8
Karbonathärte	[°dH]	56	1	< NG	0,31	0,49	2,21	6,43	9,32	18,26
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		55	0	-6,77	-5,08	-4,44	-2,60	-1,31	-0,59	0,06
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	56	0	0,02	0,14	0,22	0,38	0,61	1,02	1,44
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	56	2	< NG	0,111	0,175	0,790	2,295	3,330	6,521
Ag Silber	[µg/l]	52	46	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,144
Al Aluminium	[µg/l]	56	15	< NG	< NG	< NG	7,828	46,45	185,6	1198
As Arsen	[µg/l]	56	7	< NG	< NG	0,156	0,543	1,647	4,192	6,500
Au Gold	[µg/l]	52	45	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,119
B Bor	[µg/l]	56	30	< NG	< NG	< NG	< NG	13,13	25,17	40,41
Ba Barium	[µg/l]	56	0	6,31	64,1	118	211	366	680	925
Be Beryllium	[µg/l]	56	7	< NG	< NG	< BG	0,084	0,526	0,848	3,357
Bi Wismut	[µg/l]	56	48	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,021
Cd Cadmium	[µg/l]	56	19	< NG	< NG	< NG	< BG	0,073	0,149	0,267
Ce Cer	[µg/l]	52	1	< NG	0,009	0,023	0,122	0,402	1,388	4,960
Co Cobalt	[µg/l]	56	5	< NG	< BG	0,020	0,042	0,095	0,964	21,99
Cr Chrom	[µg/l]	56	18	< NG	< NG	< NG	< BG	0,333	0,526	2,023
Cs Cäsium	[µg/l]	56	15	< NG	< NG	< NG	0,0400	0,3400	0,9145	3,433
Cu Kupfer	[µg/l]	53	0	0,162	0,347	0,702	1,436	2,675	6,663	23,00
Hg Quecksilber	[µg/l]	56	45	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,760
La Lanthan	[µg/l]	56	7	< NG	< NG	0,0020	0,0110	0,0443	0,1470	1,262
Li Lithium	[µg/l]	56	0	0,379	1,227	1,540	2,572	13,87	23,66	48,45
Mo Molybdän	[µg/l]	56	30	< NG	< NG	< NG	< NG	0,078	0,148	0,526
Ni Nickel	[µg/l]	56	10	< NG	< NG	0,443	1,114	3,561	6,464	11,29
Pb Blei	[µg/l]	56	26	< NG	< NG	< NG	< BG	0,096	0,221	1,083
Rb Rubidium	[µg/l]	56	0	0,151	2,328	3,621	4,438	8,250	10,70	32,40
Sb Antimon	[µg/l]	56	43	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,024	0,070
Se Selen	[µg/l]	53	43	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG
Sn Zinn	[µg/l]	52	33	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,071	0,351
Sr Strontium	[µg/l]	56	0	4,18	21,5	25,0	45,4	113	282	548
Th Thorium	[µg/l]	56	34	< NG	< NG	< NG	< NG	0,054	0,906	2,630
Tl Thallium	[µg/l]	56	50	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,090
U Uran	[µg/l]	56	8	< NG	< NG	0,0365	0,1325	2,521	4,347	14,23
V Vanadium	[µg/l]	56	11	< NG	< NG	< BG	0,129	0,338	0,935	2,064
Y Yttrium	[µg/l]	55	0	< BG	0,0068	0,0215	0,1170	0,3370	0,7508	3,177
Zn Zink	[µg/l]	56	0	< BG	0,495	1,521	4,386	11,62	26,62	149,9

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-5: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Oberen Buntsandstein

2-5 Oberer Buntsandstein										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	11	0	5,4	6,5	7,2	7,7	9,1	10,1	10,4
pH-Wert (Gelände)		12	0	4,40	5,67	6,81	7,36	7,53	7,69	8,29
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	11	0	89,4	96,4	406,0	590,0	612,5	636,0	1020,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	11	0	6,20	6,40	8,00	10,00	10,50	10,80	11,60
O ₂ -Sättigung	[%]	10	0	56,0	69,8	75,3	85,0	94,8	98,4	101,0
CO ₂ frei	[mg/l]	12	0	0,0	4,5	5,9	10,1	16,7	33,4	37,0
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	11	11	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	12	0	2,53	2,62	3,39	4,33	5,78	8,40	14,20
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	11	11	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	12	2	< NG	< NG	< BG	4,88	8,35	25,81	42,24
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	12	12	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	12	0	16,63	18,01	22,30	30,13	53,20	72,18	225,00
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	10	10	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	12	1	< NG	11,9	25,1	309,7	355,6	374,5	437,5
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	11	0	1,661	1,795	1,952	2,837	3,346	4,236	4,541
K ⁺ Kalium	[mg/l]	11	0	0,884	1,210	1,645	1,980	3,172	3,772	3,933
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	12	12	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	11	0	4,024	6,633	43,33	79,40	87,69	91,98	148,5
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	11	0	2,133	2,916	14,47	27,75	33,40	34,01	53,51
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	12	11	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	11	5	< NG	< NG	< NG	0,00131	0,00521	0,01155	0,1039
Si Silicium	[mg/l]	12	0	2,89	2,99	3,19	3,50	3,75	3,87	4,59
Gesamtmineralisation	[mg/l]	10	0	48,47	120,8	483,4	504,7	523,6	581,4	885,8
Gesamthärte	[°dH]	11	0	1,05	1,60	10,5	18,2	18,5	20,0	33,1
Karbonathärte	[°dH]	12	1	< NG	0,55	1,15	14,21	16,32	17,19	20,08
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		10	0	-4,57	-3,51	-0,54	-0,40	-0,22	0,12	0,59
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	12	0	0,00	0,10	0,14	0,23	0,38	0,76	0,84
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	12	1	< NG	0,194	0,413	5,075	5,828	6,139	7,171
Ag Silber	[µg/l]	11	11	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Al Aluminium	[µg/l]	11	4	< NG	< NG	< NG	7,928	43,90	488,7	1136
As Arsen	[µg/l]	10	0	0,069	0,105	0,120	0,144	0,163	0,195	0,227
Au Gold	[µg/l]	11	11	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
B Bor	[µg/l]	11	7	< NG	< NG	< NG	< NG	5,194	10,08	86,77
Ba Barium	[µg/l]	11	0	39,8	49,2	78,0	83,9	153	230	320
Be Beryllium	[µg/l]	10	3	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,116	0,382
Bi Wismut	[µg/l]	11	11	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Cd Cadmium	[µg/l]	11	5	< NG	< NG	< NG	< BG	0,020	0,082	0,327
Ce Cer	[µg/l]	11	0	0,061	0,072	0,085	0,173	0,880	1,386	2,374
Co Cobalt	[µg/l]	10	0	< BG	0,005	0,016	0,032	0,041	0,053	0,146
Cr Chrom	[µg/l]	11	0	< BG	0,202	0,290	0,434	1,329	1,812	2,402
Cs Cäsium	[µg/l]	11	7	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0200	0,0530	0,0580
Cu Kupfer	[µg/l]	11	0	0,234	0,402	0,431	0,606	4,325	5,193	5,463
Hg Quecksilber	[µg/l]	11	11	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
La Lanthan	[µg/l]	11	3	< NG	< NG	< NG	0,0100	0,1540	0,2880	0,7150
Li Lithium	[µg/l]	11	0	1,246	1,605	2,909	6,613	14,39	19,71	37,08
Mo Molybdän	[µg/l]	11	4	< NG	< NG	< NG	0,088	0,200	0,223	0,270
Ni Nickel	[µg/l]	10	2	< NG	< NG	0,406	0,651	1,204	1,602	2,901
Pb Blei	[µg/l]	11	4	< NG	< NG	< NG	0,023	0,220	0,363	0,440
Rb Rubidium	[µg/l]	11	0	0,230	0,387	0,541	1,776	3,224	3,973	3,992
Sb Antimon	[µg/l]	11	5	< NG	< NG	< NG	0,008	0,017	0,021	0,028
Se Selen	[µg/l]	11	10	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
Sn Zinn	[µg/l]	11	8	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,030
Sr Strontium	[µg/l]	10	0	23,5	37,9	47,9	72,1	165	455	566
Th Thorium	[µg/l]	11	7	< NG	< NG	< NG	< NG	0,321	0,451	0,682
Tl Thallium	[µg/l]	11	10	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,004
U Uran	[µg/l]	11	1	< NG	0,0370	0,8375	1,285	2,199	4,533	10,79
V Vanadium	[µg/l]	11	7	< NG	< NG	< NG	< NG	0,075	0,429	2,128
Y Yttrium	[µg/l]	11	1	< NG	< BG	0,0223	0,0500	0,2335	0,4010	2,808
Zn Zink	[µg/l]	11	1	< NG	0,111	0,174	1,242	3,637	12,27	18,12

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-6: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Unteren Keuper

2-6 Unterer Keuper										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	16	0	6,1	6,7	7,0	8,6	9,7	10,9	11,1
pH-Wert (Gelände)		16	0	7,00	7,10	7,10	7,29	7,49	7,57	7,60
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	16	0	519,0	600,0	648,5	739,0	812,5	909,5	961,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	16	0	2,50	3,00	4,00	4,95	5,40	6,30	8,40
O ₂ -Sättigung	[%]	10	0	36,0	37,8	46,1	47,0	51,5	62,0	71,0
CO ₂ frei	[mg/l]	16	0	10,6	13,6	24,9	27,3	35,6	44,4	52,8
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	10	10	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	16	0	3,22	4,72	8,42	15,36	40,25	62,70	75,50
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	10	10	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	16	0	< BG	< BG	14,43	36,50	45,78	64,14	97,20
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	16	16	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	16	0	23,64	28,84	30,56	40,26	60,75	95,00	117,70
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	2	2	< NG	---	---	---	---	---	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	16	0	151,0	307,5	346,4	375,1	434,4	485,1	542,0
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	16	0	3,607	4,620	5,822	6,854	9,250	10,10	11,70
K ⁺ Kalium	[mg/l]	16	0	< BG	1,374	1,813	2,334	4,316	6,950	14,50
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	15	15	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	16	0	56,55	68,00	81,61	91,14	104,0	114,6	131,0
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	15	0	21,80	26,27	34,17	38,57	51,20	55,20	63,00
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	15	7	< NG	< NG	< NG	0,0154	0,0299	0,0448	0,0540
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	10	5	< NG	< NG	< NG	0,00006	0,00080	0,00096	0,00204
Si Silicium	[mg/l]	16	0	2,99	3,89	4,10	4,59	5,56	5,98	6,87
Gesamtmineralisation	[mg/l]	16	0	436,1	501,4	531,7	615,5	756,0	853,2	905,5
Gesamthärte	[°dH]	16	0	15,5	17,0	19,2	21,7	26,3	30,4	34,9
Karbonathärte	[°dH]	16	0	6,93	14,11	15,90	17,21	19,93	22,26	24,87
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		16	0	-1,13	-0,72	-0,40	-0,35	-0,26	-0,22	-0,16
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	16	0	0,24	0,31	0,57	0,62	0,81	1,01	1,20
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	16	0	2,475	5,040	5,678	6,148	7,119	7,950	8,882
Ag Silber	[µg/l]	10	5	< NG	< NG	< NG	< NG	0,044	0,053	0,085
Al Aluminium	[µg/l]	9	2	< NG	---	---	9,092	---	---	1051
As Arsen	[µg/l]	10	1	< NG	< BG	< BG	0,089	0,114	0,265	0,296
Au Gold	[µg/l]	10	8	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,031
B Bor	[µg/l]	10	6	< NG	< NG	< NG	< NG	15,55	80,59	90,69
Ba Barium	[µg/l]	9	0	28,6	---	---	86,3	---	---	143
Be Beryllium	[µg/l]	10	2	< NG	< NG	< BG	< BG	0,052	0,058	0,062
Bi Wismut	[µg/l]	10	10	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Cd Cadmium	[µg/l]	10	6	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	< BG
Ce Cer	[µg/l]	8	0	0,040	---	---	0,098	---	---	0,456
Co Cobalt	[µg/l]	10	0	0,008	0,012	0,014	0,031	0,045	0,050	0,055
Cr Chrom	[µg/l]	9	0	< BG	---	---	1,356	---	---	2,537
Cs Cäsium	[µg/l]	10	8	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG
Cu Kupfer	[µg/l]	10	0	0,299	0,402	0,474	0,720	0,998	2,028	2,634
Hg Quecksilber	[µg/l]	10	9	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,137
La Lanthan	[µg/l]	10	3	< NG	< NG	< NG	0,0218	0,0960	0,7114	0,8770
Li Lithium	[µg/l]	10	0	5,227	6,726	8,296	9,006	9,169	9,504	9,539
Mo Molybdän	[µg/l]	9	0	0,080	---	---	0,113	---	---	0,180
Ni Nickel	[µg/l]	10	4	< NG	< NG	< NG	0,146	0,599	0,769	1,022
Pb Blei	[µg/l]	10	3	< NG	< NG	< BG	0,123	0,155	1,895	2,393
Rb Rubidium	[µg/l]	10	0	0,342	0,455	0,613	0,962	1,262	1,889	2,355
Sb Antimon	[µg/l]	10	4	< NG	< NG	< NG	< BG	0,025	0,028	0,040
Se Selen	[µg/l]	10	5	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	< BG
Sn Zinn	[µg/l]	10	10	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Sr Strontium	[µg/l]	10	0	104	112	113	144	205	250	262
Th Thorium	[µg/l]	10	5	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,516	0,533
Tl Thallium	[µg/l]	10	9	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
U Uran	[µg/l]	10	0	0,3730	0,3829	0,4330	0,5935	0,9035	1,634	1,726
V Vanadium	[µg/l]	10	6	< NG	< NG	< NG	< NG	0,148	0,186	0,449
Y Yttrium	[µg/l]	10	2	< NG	< NG	< BG	0,0268	0,0573	0,1675	0,2080
Zn Zink	[µg/l]	10	0	0,372	0,453	0,791	1,778	3,656	5,894	7,514

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-7: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Gipskeuper

2-7 Gipskeuper										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	13	0	6,8	8,1	9,0	10,1	10,6	11,0	12,0
pH-Wert (Gelände)		13	0	7,10	7,20	7,20	7,30	7,30	7,38	7,40
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	13	0	450,0	492,0	599,0	704,0	878,0	1026,2	1180,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	13	0	1,30	2,74	4,60	4,70	5,40	6,32	9,40
O ₂ -Sättigung	[%]	8	0	11,6	---	---	45,3	---	---	88,7
CO ₂ frei	[mg/l]	13	0	9,7	11,8	15,0	19,4	25,5	35,6	39,6
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	8	8	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	13	0	6,30	7,26	9,74	11,61	21,20	29,89	44,30
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	8	8	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	13	0	< BG	6,08	6,80	9,28	20,10	27,76	29,69
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	13	13	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	13	0	25,10	30,61	43,00	58,45	170,60	346,02	484,00
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	8	8	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	13	0	226,0	236,7	281,0	314,8	375,3	474,1	565,0
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	13	0	4,911	5,940	6,383	8,500	9,500	13,70	20,12
K ⁺ Kalium	[mg/l]	13	3	< NG	< NG	1,500	1,884	2,328	3,186	3,600
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	13	13	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	13	0	61,00	67,37	79,00	89,66	103,4	160,8	200,0
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	13	0	25,00	26,82	31,00	36,78	47,79	58,72	74,00
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	13	8	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0510	0,0592	0,0680
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	8	7	< NG	---	---	< NG	---	---	0,07447
Si Silicium	[mg/l]	12	0	3,97	4,21	4,33	4,93	5,08	5,21	6,64
Gesamtmineralisation	[mg/l]	13	0	440,4	461,0	526,5	643,4	770,2	878,8	1181
Gesamthärte	[°dH]	13	0	14,5	16,3	18,8	22,7	26,7	31,2	45,0
Karbonathärte	[°dH]	13	0	10,37	10,86	12,89	14,45	17,22	21,76	25,93
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		13	0	-0,77	-0,64	-0,48	-0,40	-0,31	-0,27	-0,19
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	13	0	0,22	0,27	0,34	0,44	0,58	0,81	0,90
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	13	0	3,704	3,880	4,604	5,161	6,150	7,769	9,261
Ag Silber	[µg/l]	7	4	< NG	---	---	< NG	---	---	0,023
Al Aluminium	[µg/l]	8	5	< NG	---	---	< NG	---	---	16,52
As Arsen	[µg/l]	8	1	< NG	---	---	1,544	---	---	3,650
Au Gold	[µg/l]	7	7	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
B Bor	[µg/l]	8	0	22,09	---	---	33,18	---	---	116,0
Ba Barium	[µg/l]	8	0	22,8	---	---	68,8	---	---	611
Be Beryllium	[µg/l]	8	4	< NG	---	---	< BG	---	---	< BG
Bi Wismut	[µg/l]	8	7	< NG	---	---	< NG	---	---	0,510
Cd Cadmium	[µg/l]	8	7	< NG	---	---	< NG	---	---	0,160
Ce Cer	[µg/l]	7	0	< BG	---	---	0,011	---	---	0,174
Co Cobalt	[µg/l]	8	3	< NG	---	---	0,026	---	---	0,090
Cr Chrom	[µg/l]	8	0	< BG	---	---	0,260	---	---	1,530
Cs Cäsium	[µg/l]	8	7	< NG	---	---	< NG	---	---	0,0700
Cu Kupfer	[µg/l]	8	0	0,388	---	---	1,129	---	---	3,288
Hg Quecksilber	[µg/l]	8	7	< NG	---	---	< NG	---	---	1,920
La Lanthan	[µg/l]	8	5	< NG	---	---	< NG	---	---	0,0530
Li Lithium	[µg/l]	8	0	14,17	---	---	20,15	---	---	28,99
Mo Molybdän	[µg/l]	8	1	< NG	---	---	0,255	---	---	2,990
Ni Nickel	[µg/l]	8	3	< NG	---	---	0,261	---	---	1,361
Pb Blei	[µg/l]	8	7	< NG	---	---	< NG	---	---	< BG
Rb Rubidium	[µg/l]	8	0	0,574	---	---	0,999	---	---	1,301
Sb Antimon	[µg/l]	8	0	0,009	---	---	0,015	---	---	1,160
Se Selen	[µg/l]	8	2	< NG	---	---	< BG	---	---	11,09
Sn Zinn	[µg/l]	8	5	< NG	---	---	< NG	---	---	0,175
Sr Strontium	[µg/l]	8	0	304	---	---	527	---	---	2364
Th Thorium	[µg/l]	8	5	< NG	---	---	< NG	---	---	2,733
Tl Thallium	[µg/l]	8	7	< NG	---	---	< NG	---	---	0,530
U Uran	[µg/l]	8	1	< NG	---	---	1,805	---	---	8,694
V Vanadium	[µg/l]	8	1	< NG	---	---	2,756	---	---	6,655
Y Yttrium	[µg/l]	8	4	< NG	---	---	0,0150	---	---	0,0460
Zn Zink	[µg/l]	8	0	0,146	---	---	1,249	---	---	13,42

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-8: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus den Austauschwässern des Sandsteinkeupers

2-8 Sandsteinkeuper Austauschwässer										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	24	0	9,4	10,4	11,2	12,0	13,7	14,3	14,6
pH-Wert (Gelände)		24	0	7,50	7,70	7,78	8,15	8,70	9,10	9,20
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	24	0	457,0	485,4	517,0	653,5	708,8	878,6	1183,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	24	0	0,10	0,20	0,20	0,80	1,33	2,51	7,30
O ₂ -Sättigung	[%]	23	0	1,0	1,8	2,2	7,4	13,0	24,2	70,0
CO ₂ frei	[mg/l]	20	0	0,0	0,0	0,0	1,3	5,3	7,1	10,6
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	23	15	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	2,04
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	24	0	2,40	3,68	5,23	12,30	18,88	29,88	210,00
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	23	21	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	24	13	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	5,57	19,32
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	24	24	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	24	0	13,21	14,75	25,40	37,29	68,76	139,33	165,45
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	23	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	24	0	234,9	268,4	278,0	305,1	379,8	430,1	482,0
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	24	0	48,06	58,66	104,5	119,9	161,5	175,5	209,4
K ⁺ Kalium	[mg/l]	24	2	< NG	0,942	1,814	2,432	3,619	4,988	8,576
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	24	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	67,89
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	24	0	1,080	1,330	2,217	7,750	23,01	32,92	37,74
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	24	0	0,580	1,031	1,671	7,086	15,95	18,14	44,27
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	22	20	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0385
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	23	2	< NG	0,00026	0,00076	0,00223	0,00694	0,01894	0,05390
Si Silicium	[mg/l]	24	0	3,57	4,27	4,98	5,35	5,72	6,74	7,02
Gesamtmineralisation	[mg/l]	23	0	413,2	431,1	452,3	560,4	645,5	718,2	961,1
Gesamthärte	[°dH]	24	0	0,285	0,441	0,972	2,83	6,90	9,15	13,3
Karbonathärte	[°dH]	24	0	10,78	12,32	12,76	14,00	17,43	19,74	22,12
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		23	0	-0,79	-0,66	-0,53	-0,44	-0,38	-0,27	-0,22
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	21	0	0,00	0,00	0,00	0,04	0,12	0,18	1,64
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	24	0	3,850	4,400	4,555	5,000	6,224	7,049	7,900
Ag Silber	[µg/l]	17	13	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,035	0,047
Al Aluminium	[µg/l]	23	21	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	1,288
As Arsen	[µg/l]	23	4	< NG	< NG	0,513	1,035	1,796	4,314	5,543
Au Gold	[µg/l]	17	16	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
B Bor	[µg/l]	23	0	49,38	71,81	127,1	168,3	285,6	436,5	576,3
Ba Barium	[µg/l]	23	0	5,32	11,3	18,8	54,7	79,8	128	190
Be Beryllium	[µg/l]	23	18	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG
Bi Wismut	[µg/l]	23	18	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,100
Cd Cadmium	[µg/l]	23	19	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,110
Ce Cer	[µg/l]	17	10	< NG	< NG	< NG	< NG	0,012	0,036	0,297
Co Cobalt	[µg/l]	23	5	< NG	< NG	< BG	0,009	0,015	0,058	0,131
Cr Chrom	[µg/l]	23	9	< NG	< NG	< NG	< BG	0,604	1,236	1,600
Cs Cäsium	[µg/l]	23	11	< NG	< NG	< NG	0,0100	0,0190	0,0270	0,0400
Cu Kupfer	[µg/l]	23	0	0,113	0,212	0,417	0,616	1,113	1,552	3,410
Hg Quecksilber	[µg/l]	23	20	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,416	0,650
La Lanthan	[µg/l]	23	16	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0040	0,0100	0,1090
Li Lithium	[µg/l]	23	0	29,86	36,52	68,36	90,36	133,5	148,7	166,6
Mo Molybdän	[µg/l]	23	1	< NG	0,275	0,426	0,780	0,985	1,993	6,530
Ni Nickel	[µg/l]	23	14	< NG	< NG	< NG	< NG	0,228	0,690	2,302
Pb Blei	[µg/l]	23	15	< NG	< NG	< NG	< NG	0,027	0,102	0,160
Rb Rubidium	[µg/l]	23	0	0,580	0,648	0,839	1,597	2,247	2,683	5,282
Sb Antimon	[µg/l]	23	19	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,106	0,200
Se Selen	[µg/l]	23	14	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	1,677	8,250
Sn Zinn	[µg/l]	23	16	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,074	0,252
Sr Strontium	[µg/l]	23	0	18,2	28,1	74,3	216	411	786	1162
Th Thorium	[µg/l]	23	8	< NG	< NG	< NG	0,080	0,434	3,044	7,854
Tl Thallium	[µg/l]	23	21	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,410
U Uran	[µg/l]	23	1	< NG	0,3546	0,5160	0,8960	4,433	9,603	30,91
V Vanadium	[µg/l]	23	11	< NG	< NG	< NG	< BG	0,527	1,565	5,429
Y Yttrium	[µg/l]	23	11	< NG	< NG	< NG	0,0120	0,0195	0,0230	0,0610
Zn Zink	[µg/l]	23	3	< NG	0,126	0,959	2,265	5,975	13,01	14,75

< NG = kleiner Nachweigsrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-9: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Sandsteinkeuper silikatisch-karbonatisch

2-9 Sandsteinkeuper silikatisch-karbonatisch										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	203	0	6,0	8,2	8,9	10,0	11,0	11,9	18,8
pH-Wert (Gelände)		203	0	5,20	7,10	7,20	7,30	7,40	7,57	7,90
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	187	0	105,0	474,4	611,5	720,0	800,0	858,4	1342,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	194	0	0,20	1,76	4,70	6,70	8,40	9,68	11,96
O ₂ -Sättigung	[%]	163	0	1,8	16,2	46,2	63,0	78,3	92,0	113,1
CO ₂ frei	[mg/l]	189	0	0,9	9,9	14,1	21,1	29,0	37,0	68,0
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	153	151	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	1,03
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	198	0	2,50	5,23	8,82	16,00	25,53	38,31	179,00
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	153	149	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	197	20	< NG	< NG	5,37	18,50	40,62	59,45	94,97
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	189	189	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	196	0	< BG	21,24	27,73	35,97	44,42	67,65	173,00
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	140	140	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	190	0	12,2	201,9	307,7	366,7	421,0	456,9	545,5
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	190	0	0,600	4,444	5,480	7,247	11,26	30,44	67,74
K ⁺ Kalium	[mg/l]	190	22	< NG	< NG	1,302	2,244	4,018	7,200	15,00
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	189	189	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	199	0	8,164	42,96	60,83	75,32	83,62	92,06	141,9
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	199	0	2,701	15,42	31,40	40,87	46,90	51,97	66,50
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	189	134	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,0500	0,5000
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	153	98	< NG	< NG	< NG	< NG	0,00120	0,00897	0,3415
Si Silicium	[mg/l]	188	0	3,26	4,62	5,13	5,63	6,43	7,23	10,37
Gesamtmineralisation	[mg/l]	188	0	67,36	407,9	512,6	595,2	660,0	716,8	838,1
Gesamthärte	[°dH]	199	0	1,77	10,3	16,2	20,2	22,6	24,7	31,0
Karbonathärte	[°dH]	190	0	0,56	9,26	14,12	16,83	19,32	20,97	25,03
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		182	0	-4,91	-0,90	-0,56	-0,43	-0,31	-0,18	0,25
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	190	0	0,02	0,23	0,33	0,48	0,68	0,84	1,68
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	190	0	0,200	3,310	5,042	6,011	6,900	7,487	8,939
Ag Silber	[µg/l]	138	104	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,034	0,146
Al Aluminium	[µg/l]	153	108	< NG	< NG	< NG	< NG	2,190	12,20	331,9
As Arsen	[µg/l]	153	5	< NG	0,355	0,593	1,157	2,089	4,570	35,16
Au Gold	[µg/l]	137	111	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,106
B Bor	[µg/l]	153	21	< NG	< NG	5,071	21,15	50,54	127,6	430,9
Ba Barium	[µg/l]	153	1	< NG	85,8	181	366	712	1078	1744
Be Beryllium	[µg/l]	153	95	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,330
Bi Wismut	[µg/l]	152	129	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,011	0,750
Cd Cadmium	[µg/l]	152	93	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,079	0,806
Ce Cer	[µg/l]	137	27	< NG	< NG	0,006	0,028	0,077	0,224	3,381
Co Cobalt	[µg/l]	153	30	< NG	< NG	0,005	0,035	0,077	0,169	2,576
Cr Chrom	[µg/l]	153	26	< NG	< NG	< BG	0,230	0,640	1,688	4,724
Cs Cäsium	[µg/l]	153	92	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0100	0,0400	16,75
Cu Kupfer	[µg/l]	153	0	0,134	0,434	0,657	1,029	1,928	3,639	40,57
Hg Quecksilber	[µg/l]	151	127	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,500
La Lanthan	[µg/l]	153	69	< NG	< NG	< NG	< BG	0,0100	0,0458	0,3410
Li Lithium	[µg/l]	153	0	1,138	3,446	6,718	16,95	38,11	66,30	171,4
Mo Molybdän	[µg/l]	153	33	< NG	< NG	< BG	0,097	0,325	0,881	22,53
Ni Nickel	[µg/l]	153	65	< NG	< NG	< NG	0,345	1,298	1,950	35,09
Pb Blei	[µg/l]	152	76	< NG	< NG	< NG	< NG	0,082	0,378	5,292
Rb Rubidium	[µg/l]	153	0	0,255	0,523	0,758	1,118	1,981	3,295	16,27
Sb Antimon	[µg/l]	153	48	< NG	< NG	< NG	0,009	0,016	0,028	0,400
Se Selen	[µg/l]	153	40	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	2,104	14,54
Sn Zinn	[µg/l]	153	111	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,272
Sr Strontium	[µg/l]	153	0	37,0	164	267	361	572	963	9985
Th Thorium	[µg/l]	152	108	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,352	1,639
Tl Thallium	[µg/l]	152	131	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,006	0,640
U Uran	[µg/l]	152	5	< NG	0,8421	2,009	4,343	8,007	13,97	42,33
V Vanadium	[µg/l]	153	3	< NG	0,347	0,816	1,887	2,742	3,842	14,93
Y Yttrium	[µg/l]	153	27	< NG	< NG	0,0160	0,0370	0,0730	0,1280	1,518
Zn Zink	[µg/l]	153	18	< NG	< NG	0,695	1,966	11,37	40,28	1261

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-10: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Rhätolias karbonatisch (sulfatisch)

2-10 Rhätolias karbonatisch (sulfatisch)										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	24	0	8,1	9,2	9,8	10,8	11,3	12,6	13,3
pH-Wert (Gelände)		24	0	6,40	6,85	7,08	7,20	7,31	7,75	8,20
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	24	0	567,0	608,0	653,0	707,5	852,0	1014,9	1101,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	24	0	< BG	0,43	2,70	7,51	9,93	10,37	10,70
O ₂ -Sättigung	[%]	23	0	1,8	6,8	31,5	81,0	93,0	96,7	110,0
CO ₂ frei	[mg/l]	24	0	0,0	3,9	12,1	22,4	33,6	48,1	51,0
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	23	21	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	1,15
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	24	0	5,46	12,88	19,52	26,63	33,52	43,64	53,42
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	23	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	23	4	< NG	< NG	4,26	29,44	49,63	65,61	73,15
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	24	24	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	22	0	40,56	45,31	56,70	106,19	155,63	199,89	255,90
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	24	24	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	23	0	104,3	169,9	199,5	241,6	346,0	370,9	402,7
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	24	0	3,728	5,264	7,590	10,65	13,62	36,68	48,62
K ⁺ Kalium	[mg/l]	23	3	< NG	< NG	1,304	2,746	4,199	5,634	10,74
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	23	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	24	0	53,73	72,53	83,39	103,0	110,9	127,2	139,1
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	24	0	10,21	13,47	23,72	30,16	42,20	49,33	73,68
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	24	17	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	1,006	1,750
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	23	12	< NG	< NG	< NG	< NG	0,01612	0,08035	0,09400
Si Silicium	[mg/l]	24	0	3,21	3,44	3,58	4,20	4,87	5,70	10,05
Gesamtmineralisation	[mg/l]	24	0	466,6	490,9	510,3	580,4	692,3	788,6	880,1
Gesamthärte	[°dH]	24	0	16,7	16,9	17,7	19,0	25,5	30,1	32,3
Karbonathärte	[°dH]	24	0	1,65	6,92	8,79	10,95	15,67	16,99	18,48
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		24	0	-2,23	-1,18	-0,79	-0,52	-0,37	-0,07	0,35
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	24	0	0,00	0,09	0,28	0,51	0,76	1,09	1,16
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	24	0	0,589	2,470	3,140	3,911	5,595	6,067	6,600
Ag Silber	[µg/l]	21	17	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,050
Al Aluminium	[µg/l]	23	17	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	3,056	18,46
As Arsen	[µg/l]	23	10	< NG	< NG	< NG	0,060	0,317	0,446	0,905
Au Gold	[µg/l]	21	18	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG
B Bor	[µg/l]	23	3	< NG	< BG	11,80	38,21	78,98	144,9	188,9
Ba Barium	[µg/l]	22	0	2,35	5,17	11,3	21,4	27,1	42,6	64,5
Be Beryllium	[µg/l]	23	12	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,100
Bi Wismut	[µg/l]	23	22	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,043
Cd Cadmium	[µg/l]	23	12	< NG	< NG	< NG	< NG	0,009	0,039	0,060
Ce Cer	[µg/l]	21	2	< NG	0,007	0,017	0,068	0,103	0,245	0,534
Co Cobalt	[µg/l]	23	7	< NG	< NG	< NG	0,076	0,136	0,314	1,903
Cr Chrom	[µg/l]	23	3	< NG	< NG	< BG	< BG	0,349	1,462	2,166
Cs Cäsium	[µg/l]	23	16	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,0298	0,0800
Cu Kupfer	[µg/l]	23	1	< NG	0,242	0,453	0,769	1,128	1,623	1,714
Hg Quecksilber	[µg/l]	23	19	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,106	0,660
La Lanthan	[µg/l]	23	12	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0290	0,0692	0,1480
Li Lithium	[µg/l]	23	0	1,450	8,762	22,62	34,06	45,03	68,40	79,95
Mo Molybdän	[µg/l]	23	12	< NG	< NG	< NG	< NG	0,099	0,127	0,880
Ni Nickel	[µg/l]	23	9	< NG	< NG	< NG	0,887	2,567	3,941	17,58
Pb Blei	[µg/l]	23	17	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,048	0,239
Rb Rubidium	[µg/l]	23	1	< NG	0,808	1,194	1,517	2,065	2,772	3,345
Sb Antimon	[µg/l]	23	5	< NG	< NG	< BG	< BG	0,011	0,027	0,120
Se Selen	[µg/l]	23	6	< NG	< NG	< BG	< BG	< BG	< BG	2,462
Sn Zinn	[µg/l]	23	19	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,083
Sr Strontium	[µg/l]	23	0	77,0	115	202	283	481	974	1843
Th Thorium	[µg/l]	23	13	< NG	< NG	< NG	< NG	0,243	2,299	5,098
Tl Thallium	[µg/l]	23	19	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,192
U Uran	[µg/l]	23	4	< NG	< NG	0,0645	0,3380	0,5905	1,538	5,824
V Vanadium	[µg/l]	23	17	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,129	0,230
Y Yttrium	[µg/l]	23	6	< NG	< NG	0,0065	0,0360	0,0695	0,1042	0,2130
Zn Zink	[µg/l]	23	3	< NG	0,103	0,729	1,705	4,773	13,21	59,15

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-11: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Rhätolias silikatisch

2-11 Rhätolias silikatisch										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	30	0	6,0	7,9	8,3	9,2	11,5	12,1	15,2
pH-Wert (Gelände)		30	0	4,40	5,67	6,03	6,57	6,96	7,30	7,70
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	30	0	101,5	123,4	163,3	275,5	382,3	419,9	701,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	29	0	0,20	4,14	6,00	8,68	11,16	12,37	15,60
O ₂ -Sättigung	[%]	29	0	2,0	42,4	57,3	86,3	99,7	114,1	139,0
CO ₂ frei	[mg/l]	30	0	0,0	5,2	9,5	13,6	21,3	32,6	50,2
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	30	30	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	30	0	2,13	5,04	6,05	10,58	18,17	27,21	73,50
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	30	30	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	30	6	< NG	< NG	< BG	6,54	27,63	49,54	74,81
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	30	30	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	30	0	13,55	17,15	24,95	35,13	45,61	77,89	145,00
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	30	30	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	32	1	< NG	6,5	19,8	37,5	115,6	157,1	240,4
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	32	0	1,875	3,158	3,843	5,362	9,606	12,95	65,90
K ⁺ Kalium	[mg/l]	32	1	< NG	< BG	1,436	2,179	3,046	3,690	13,24
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	32	32	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	32	0	6,655	9,157	14,65	25,14	37,00	43,52	57,69
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	32	0	3,302	3,905	6,151	9,470	15,54	21,10	30,33
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	32	20	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0171	0,5262	4,651
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	30	5	< NG	< NG	0,00034	0,00484	0,01389	0,2175	1,011
Si Silicium	[mg/l]	30	0	2,91	3,37	4,18	5,01	5,78	6,67	7,29
Gesamtmineralisation	[mg/l]	30	0	64,52	74,65	109,8	175,8	249,8	336,3	498,2
Gesamthärte	[°dH]	32	0	1,87	2,19	3,52	6,04	8,55	10,7	13,9
Karbonathärte	[°dH]	32	1	< NG	0,30	0,91	1,72	5,31	7,21	11,03
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		29	0	-5,50	-4,27	-3,35	-2,82	-1,69	-1,14	-0,39
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	30	0	0,00	0,12	0,22	0,31	0,49	0,74	1,14
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	32	1	< NG	0,106	0,324	0,616	1,894	2,575	3,939
Ag Silber	[µg/l]	29	19	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,060	0,124
Al Aluminium	[µg/l]	30	9	< NG	< NG	< NG	3,747	10,03	153,2	1683
As Arsen	[µg/l]	30	7	< NG	< NG	< BG	0,106	0,231	0,303	1,966
Au Gold	[µg/l]	29	27	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,031
B Bor	[µg/l]	30	15	< NG	< NG	< NG	< BG	26,68	48,67	195,9
Ba Barium	[µg/l]	30	0	5,89	12,8	15,7	25,1	40,6	57,4	99,1
Be Beryllium	[µg/l]	30	8	< NG	< NG	< NG	< BG	0,126	0,457	2,349
Bi Wismut	[µg/l]	30	27	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,091
Cd Cadmium	[µg/l]	30	10	< NG	< NG	< NG	0,015	0,035	0,184	0,959
Ce Cer	[µg/l]	29	0	0,016	0,069	0,293	0,565	1,369	4,146	69,97
Co Cobalt	[µg/l]	30	2	< NG	0,015	0,028	0,169	1,723	4,485	41,51
Cr Chrom	[µg/l]	30	4	< NG	< NG	< BG	0,340	0,749	0,987	1,968
Cs Cäsium	[µg/l]	30	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0098	0,2360
Cu Kupfer	[µg/l]	30	0	0,141	0,226	0,419	0,606	0,856	1,569	3,578
Hg Quecksilber	[µg/l]	30	29	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
La Lanthan	[µg/l]	30	2	< NG	0,0118	0,0523	0,1150	0,2885	0,7305	10,43
Li Lithium	[µg/l]	30	0	3,271	11,26	13,93	21,84	37,09	42,56	54,46
Mo Molybdän	[µg/l]	30	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,097	0,321
Ni Nickel	[µg/l]	30	2	< NG	0,796	1,779	4,665	7,844	24,03	60,62
Pb Blei	[µg/l]	30	14	< NG	< NG	< NG	< BG	0,058	0,291	35,10
Rb Rubidium	[µg/l]	30	0	0,270	0,800	1,024	1,618	2,460	3,146	17,40
Sb Antimon	[µg/l]	30	14	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,010	0,042
Se Selen	[µg/l]	30	17	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	7,487
Sn Zinn	[µg/l]	30	24	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,055
Sr Strontium	[µg/l]	30	0	26,2	38,7	43,8	85,4	151	352	526
Th Thorium	[µg/l]	30	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,388	0,614
Tl Thallium	[µg/l]	30	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,088	0,141
U Uran	[µg/l]	30	10	< NG	< NG	< NG	0,0140	0,0960	0,8664	7,066
V Vanadium	[µg/l]	30	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,051	8,289
Y Yttrium	[µg/l]	30	2	< NG	0,0288	0,0558	0,1490	0,2730	0,9683	11,12
Zn Zink	[µg/l]	30	2	< NG	0,802	1,363	2,218	6,680	15,45	43,12

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-12: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Lias b - Lias e

2-12 Lias b – Lias e										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	17	0	4,7	6,4	7,5	8,4	10,1	10,6	10,6
pH-Wert (Gelände)		17	0	6,90	7,00	7,00	7,18	7,50	7,65	7,70
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	17	0	560,0	590,6	620,0	772,0	936,0	1062,6	1326,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	9	0	2,25	---	---	7,40	---	---	12,85
O ₂ -Sättigung	[%]	5	0	20,8	---	---	43,0	---	---	118,9
CO ₂ frei	[mg/l]	9	0	7,9	---	---	27,3	---	---	55,4
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	5	5	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	8	0	2,83	---	---	17,00	---	---	24,39
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	5	5	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	8	1	< NG	---	---	8,20	---	---	23,00
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	9	9	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	9	0	25,00	---	---	77,56	---	---	271,78
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	6	6	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	9	0	225,0	---	---	329,5	---	---	394,8
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	9	0	3,000	---	---	6,956	---	---	22,50
K ⁺ Kalium	[mg/l]	9	0	< BG	---	---	0,976	---	---	4,834
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	9	9	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	9	0	98,10	---	---	126,0	---	---	170,2
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	9	0	1,900	---	---	22,15	---	---	50,00
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	9	3	< NG	---	---	< BG	---	---	0,8000
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	5	1	< NG	---	---	0,00341	---	---	0,1079
Si Silicium	[mg/l]	9	0	2,16	---	---	2,66	---	---	4,55
Gesamtmineralisation	[mg/l]	9	0	499,5	---	---	558,7	---	---	924,0
Gesamthärte	[°dH]	9	0	17,4	---	---	20,0	---	---	35,0
Karbonathärte	[°dH]	9	0	10,32	---	---	15,12	---	---	18,12
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		9	0	-0,66	---	---	-0,30	---	---	0,05
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	9	0	0,18	---	---	0,62	---	---	1,26
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	9	0	3,686	---	---	5,400	---	---	6,471
Ag Silber	[µg/l]	5	4	< NG	---	---	< NG	---	---	0,063
Al Aluminium	[µg/l]	5	4	< NG	---	---	< NG	---	---	7,254
As Arsen	[µg/l]	5	1	< NG	---	---	0,195	---	---	0,381
Au Gold	[µg/l]	5	5	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
B Bor	[µg/l]	5	2	< NG	---	---	13,37	---	---	73,69
Ba Barium	[µg/l]	5	0	6,19	---	---	9,00	---	---	23,2
Be Beryllium	[µg/l]	5	3	< NG	---	---	< NG	---	---	< BG
Bi Wismut	[µg/l]	5	5	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
Cd Cadmium	[µg/l]	5	0	< BG	---	---	< BG	---	---	0,011
Ce Cer	[µg/l]	5	0	0,044	---	---	0,093	---	---	0,122
Co Cobalt	[µg/l]	5	1	< NG	---	---	0,120	---	---	0,143
Cr Chrom	[µg/l]	5	1	< NG	---	---	0,396	---	---	0,971
Cs Cäsium	[µg/l]	5	4	< NG	---	---	< NG	---	---	0,0090
Cu Kupfer	[µg/l]	5	0	0,603	---	---	0,890	---	---	1,351
Hg Quecksilber	[µg/l]	5	5	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
La Lanthan	[µg/l]	5	1	< NG	---	---	< BG	---	---	0,0380
Li Lithium	[µg/l]	5	0	6,751	---	---	22,72	---	---	78,32
Mo Molybdän	[µg/l]	5	2	< NG	---	---	< BG	---	---	0,269
Ni Nickel	[µg/l]	5	1	< NG	---	---	0,884	---	---	3,078
Pb Blei	[µg/l]	5	4	< NG	---	---	< NG	---	---	0,021
Rb Rubidium	[µg/l]	5	0	0,044	---	---	1,036	---	---	2,572
Sb Antimon	[µg/l]	5	2	< NG	---	---	< BG	---	---	0,018
Se Selen	[µg/l]	5	1	< NG	---	---	< BG	---	---	2,840
Sn Zinn	[µg/l]	5	5	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
Sr Strontium	[µg/l]	5	0	238	---	---	612	---	---	951
Th Thorium	[µg/l]	5	1	< NG	---	---	< BG	---	---	1,335
Tl Thallium	[µg/l]	5	5	< NG	---	---	< NG	---	---	< NG
U Uran	[µg/l]	5	0	< BG	---	---	1,222	---	---	2,442
V Vanadium	[µg/l]	5	4	< NG	---	---	< NG	---	---	0,049
Y Yttrium	[µg/l]	5	0	< BG	---	---	0,0310	---	---	0,0650
Zn Zink	[µg/l]	5	0	0,474	---	---	1,868	---	---	5,643

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-13: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Doggereisensandstein

2-13 Doggereisensandstein										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	120	0	5,6	7,4	8,3	8,8	9,4	10,0	12,9
pH-Wert (Gelände)		121	0	4,90	6,90	7,20	7,40	7,60	7,80	8,20
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	116	0	31,0	283,0	429,8	489,5	556,3	608,0	691,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	120	0	< BG	5,27	8,30	9,50	10,60	11,66	19,00
O ₂ -Sättigung	[%]	71	0	28,0	71,3	82,1	89,0	101,0	113,2	167,0
CO ₂ frei	[mg/l]	119	0	0,9	5,1	9,7	17,6	24,6	33,4	69,5
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	53	53	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	120	0	1,90	3,23	4,39	6,43	10,24	16,20	24,40
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	55	55	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	118	14	< NG	< NG	< BG	7,95	13,25	21,96	36,70
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	121	121	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	121	2	< NG	18,50	23,80	29,74	40,30	56,80	88,00
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	90	90	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	121	0	5,5	79,3	242,8	284,3	316,1	347,8	394,7
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	119	2	< NG	1,322	1,692	2,300	3,268	4,510	9,200
K ⁺ Kalium	[mg/l]	120	11	< NG	< BG	0,600	0,987	1,600	3,219	7,700
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	121	121	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	121	0	1,606	42,00	83,80	98,91	108,2	115,0	127,4
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	121	0	1,142	2,940	4,300	6,800	12,80	19,40	41,80
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	119	58	< NG	< NG	< NG	< BG	0,0450	0,1233	1,200
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	73	32	< NG	< NG	< NG	0,00014	0,00044	0,00506	0,01471
Si Silicium	[mg/l]	121	1	< NG	2,13	2,33	2,61	3,22	4,67	7,57
Gesamtmineralisation	[mg/l]	115	0	23,85	241,4	407,2	454,3	501,1	544,4	604,1
Gesamthärte	[°dH]	121	0	0,487	8,17	14,0	15,7	17,6	19,1	21,3
Karbonathärte	[°dH]	121	0	0,25	3,64	11,14	13,05	14,50	15,96	18,11
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		115	0	-5,76	-1,35	-0,63	-0,36	-0,20	0,06	0,58
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	119	0	0,02	0,12	0,22	0,40	0,56	0,76	1,58
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	121	0	0,089	1,300	3,979	4,661	5,179	5,700	6,468
Ag Silber	[µg/l]	55	45	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,049	0,153
Al Aluminium	[µg/l]	72	46	< NG	< NG	< NG	< NG	2,533	13,47	41,81
As Arsen	[µg/l]	73	10	< NG	< NG	< BG	0,085	0,139	1,860	2,590
Au Gold	[µg/l]	55	54	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
B Bor	[µg/l]	73	44	< NG	< NG	< NG	< NG	10,20	15,95	76,52
Ba Barium	[µg/l]	72	0	< BG	2,13	3,97	7,19	10,6	17,4	23,5
Be Beryllium	[µg/l]	72	51	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,160
Bi Wismut	[µg/l]	73	66	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,180
Cd Cadmium	[µg/l]	72	36	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,019
Ce Cer	[µg/l]	55	9	< NG	< NG	0,009	0,024	0,050	0,310	1,899
Co Cobalt	[µg/l]	73	24	< NG	< NG	< NG	0,014	0,053	0,144	2,270
Cr Chrom	[µg/l]	71	1	< NG	< BG	0,215	0,374	0,606	1,100	1,530
Cs Cäsium	[µg/l]	73	66	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0230
Cu Kupfer	[µg/l]	73	9	< NG	< NG	0,150	0,232	0,396	0,608	1,490
Hg Quecksilber	[µg/l]	73	68	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,274
La Lanthan	[µg/l]	73	48	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,0172	0,2480
Li Lithium	[µg/l]	73	0	0,530	1,750	2,947	4,395	6,840	10,52	33,25
Mo Molybdän	[µg/l]	73	30	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,130	0,270
Ni Nickel	[µg/l]	73	42	< NG	< NG	< NG	< NG	1,216	1,612	10,17
Pb Blei	[µg/l]	73	40	< NG	< NG	< NG	< NG	0,064	0,252	2,076
Rb Rubidium	[µg/l]	73	7	< NG	0,022	0,154	0,360	0,520	1,150	3,890
Sb Antimon	[µg/l]	73	45	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,010	0,041
Se Selen	[µg/l]	72	41	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	< BG
Sn Zinn	[µg/l]	72	64	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,047
Sr Strontium	[µg/l]	73	0	4,13	31,4	84,4	110	147	189	293
Th Thorium	[µg/l]	73	52	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,493	2,802
Tl Thallium	[µg/l]	73	65	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,190
U Uran	[µg/l]	72	19	< NG	< NG	< NG	0,2500	0,3585	0,5456	0,7200
V Vanadium	[µg/l]	73	39	< NG	< NG	< NG	< NG	0,262	0,844	1,130
Y Yttrium	[µg/l]	73	6	< NG	< BG	< BG	0,0250	0,0460	0,0784	0,2700
Zn Zink	[µg/l]	72	6	< NG	< BG	0,210	0,607	3,453	5,330	30,39

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-14: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Tiefen Malmkarst

2-14 Tiefer Malmkarst										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	68	0	6,7	8,2	8,5	8,9	9,3	9,6	10,2
pH-Wert (Gelände)		67	0	7,00	7,20	7,26	7,30	7,50	7,60	7,90
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	68	0	469,0	505,0	582,8	631,0	682,8	712,3	754,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	66	0	6,90	7,80	8,80	9,80	10,80	11,20	15,00
O ₂ -Sättigung	[%]	24	0	12,4	87,5	92,2	96,2	99,9	102,8	135,0
CO ₂ frei	[mg/l]	68	0	8,8	12,3	15,8	22,0	27,7	36,3	40,5
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	23	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	68	0	5,80	9,65	12,49	17,30	21,70	27,26	33,00
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	23	22	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,90
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	68	0	7,30	11,28	18,73	26,89	30,30	36,23	38,00
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	67	67	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	67	0	11,90	15,22	18,52	21,60	28,20	31,80	36,40
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	67	67	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	68	0	279,8	313,6	336,1	353,5	374,8	394,0	413,7
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	68	0	1,100	2,400	3,082	4,155	5,593	7,952	10,00
K ⁺ Kalium	[mg/l]	68	3	< NG	0,482	0,787	1,010	1,300	2,030	3,100
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	68	68	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	68	0	60,50	67,60	74,77	88,90	94,52	100,0	116,2
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	68	0	17,00	27,51	29,40	31,84	36,06	40,88	44,90
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	66	29	< NG	< NG	< NG	0,0300	0,0575	0,1100	0,2200
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	30	17	< NG	< NG	< NG	< NG	0,00025	0,00038	0,00084
Si Silicium	[mg/l]	65	0	1,73	1,93	2,01	2,24	2,38	2,56	3,32
Gesamtmineralisation	[mg/l]	68	0	420,6	456,1	497,5	572,2	589,9	602,7	626,4
Gesamthärte	[°dH]	68	0	15,4	16,4	18,0	20,1	21,3	21,5	22,1
Karbonathärte	[°dH]	68	0	12,84	14,39	15,42	16,22	17,20	18,08	18,98
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		67	0	-0,78	-0,59	-0,49	-0,41	-0,24	-0,12	0,11
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	68	0	0,20	0,28	0,36	0,50	0,63	0,83	0,92
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	68	0	4,586	5,139	5,507	5,795	6,142	6,458	6,779
Ag Silber	[µg/l]	16	15	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
Al Aluminium	[µg/l]	32	19	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	3,109	4,283
As Arsen	[µg/l]	32	1	< NG	0,103	0,142	2,000	3,708	4,564	6,100
Au Gold	[µg/l]	16	16	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
B Bor	[µg/l]	32	16	< NG	< NG	< NG	4,285	11,30	13,56	16,07
Ba Barium	[µg/l]	32	0	7,66	8,57	9,47	11,0	12,0	12,7	15,2
Be Beryllium	[µg/l]	32	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	< BG
Bi Wismut	[µg/l]	32	29	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,240
Cd Cadmium	[µg/l]	31	17	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,016	0,170
Ce Cer	[µg/l]	16	3	< NG	< NG	0,009	0,018	0,023	0,034	0,052
Co Cobalt	[µg/l]	32	1	< NG	0,010	0,032	0,076	2,730	6,323	8,470
Cr Chrom	[µg/l]	32	0	0,272	0,417	0,495	0,610	4,391	15,74	18,06
Cs Cäsium	[µg/l]	32	21	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0150	0,0500	0,0700
Cu Kupfer	[µg/l]	31	0	0,201	0,281	0,329	0,440	0,830	1,160	2,304
Hg Quecksilber	[µg/l]	32	27	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,960	2,200
La Lanthan	[µg/l]	32	19	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0035	0,0192	0,0500
Li Lithium	[µg/l]	32	0	0,245	0,366	0,379	0,521	0,743	1,010	1,280
Mo Molybdän	[µg/l]	32	23	< NG	< NG	< NG	< NG	0,083	0,240	0,310
Ni Nickel	[µg/l]	32	14	< NG	< NG	< NG	0,383	1,409	1,997	4,910
Pb Blei	[µg/l]	32	27	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,167	0,407
Rb Rubidium	[µg/l]	32	1	< NG	0,274	0,410	0,601	1,040	1,154	1,370
Sb Antimon	[µg/l]	32	13	< NG	< NG	< NG	< BG	0,009	0,013	0,090
Se Selen	[µg/l]	31	19	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	3,500	4,360
Sn Zinn	[µg/l]	32	22	< NG	< NG	< NG	< NG	0,202	1,982	5,310
Sr Strontium	[µg/l]	32	0	17,7	18,5	22,7	31,6	42,8	59,9	94,8
Th Thorium	[µg/l]	31	16	< NG	< NG	< NG	< NG	0,230	0,648	0,980
Tl Thallium	[µg/l]	32	32	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
U Uran	[µg/l]	31	4	< NG	< NG	0,1000	0,1270	0,2150	0,3400	0,4000
V Vanadium	[µg/l]	32	8	< NG	< NG	0,065	0,679	1,348	1,674	1,810
Y Yttrium	[µg/l]	32	8	< NG	< NG	< BG	0,0200	0,0383	0,0499	0,0700
Zn Zink	[µg/l]	31	6	< NG	< NG	0,342	2,068	6,715	12,95	48,61

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-15: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Seichten Malmkarst

2-15 Seichter Malmkarst										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	116	0	1,8	7,7	8,2	8,8	9,2	9,8	11,7
pH-Wert (Gelände)		114	0	7,00	7,20	7,30	7,40	7,50	7,70	8,00
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	116	0	299,0	515,0	551,3	610,0	647,5	684,0	766,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	113	0	6,60	8,12	8,80	9,80	10,80	11,29	20,80
O ₂ -Sättigung	[%]	55	0	8,0	72,6	84,5	93,0	100,5	104,7	178,0
CO ₂ frei	[mg/l]	114	0	1,8	6,7	10,8	17,2	25,3	32,3	49,3
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	54	54	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	116	0	1,70	4,19	7,03	12,95	21,10	25,50	42,10
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	54	54	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	114	0	< BG	7,06	16,03	23,04	30,95	38,02	46,70
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	115	115	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	114	0	12,32	15,67	19,52	26,10	31,75	36,40	45,00
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	114	114	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	116	0	162,3	289,2	311,2	339,9	368,5	385,9	416,7
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	116	3	< NG	1,297	1,900	3,483	5,650	8,166	18,60
K ⁺ Kalium	[mg/l]	115	14	< NG	< NG	0,400	0,800	1,200	1,880	3,500
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	115	115	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	116	0	64,09	80,11	89,50	104,4	115,0	124,6	142,2
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	116	0	0,900	2,537	5,182	14,80	32,93	38,15	42,05
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	115	50	< NG	< NG	< NG	0,0300	0,0600	0,1200	0,4800
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	53	38	< NG	< NG	< NG	< NG	0,00002	0,00014	0,00640
Si Silicium	[mg/l]	114	0	1,78	1,90	2,01	2,24	2,43	2,64	2,94
Gesamtmineralisation	[mg/l]	116	0	264,1	445,6	493,1	541,8	573,5	591,5	650,6
Gesamthärte	[°dH]	116	0	9,36	15,3	17,4	18,9	20,2	21,1	22,7
Karbonathärte	[°dH]	116	0	7,45	13,27	14,28	15,60	16,91	17,71	19,12
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		114	0	-0,87	-0,48	-0,37	-0,28	-0,12	-0,03	0,37
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	114	0	0,04	0,15	0,25	0,39	0,58	0,73	1,12
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	116	0	2,661	4,739	5,100	5,570	6,039	6,325	6,829
Ag Silber	[µg/l]	54	46	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,194
Al Aluminium	[µg/l]	54	49	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	73,27
As Arsen	[µg/l]	54	1	< NG	0,055	0,093	0,138	0,165	0,210	0,284
Au Gold	[µg/l]	54	46	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG
B Bor	[µg/l]	54	54	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ba Barium	[µg/l]	52	0	4,83	7,45	8,96	11,0	13,2	17,3	25,5
Be Beryllium	[µg/l]	54	33	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	< BG
Bi Wismut	[µg/l]	54	51	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,013
Cd Cadmium	[µg/l]	54	7	< NG	< NG	< BG	< BG	< BG	0,011	0,018
Ce Cer	[µg/l]	52	18	< NG	< NG	< NG	< BG	0,018	0,027	0,037
Co Cobalt	[µg/l]	54	6	< NG	< NG	0,007	0,016	0,039	0,066	0,108
Cr Chrom	[µg/l]	54	0	< BG	0,217	0,295	0,404	0,558	0,735	0,886
Cs Cäsium	[µg/l]	54	51	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0130
Cu Kupfer	[µg/l]	54	0	0,114	0,195	0,235	0,301	0,397	0,557	1,159
Hg Quecksilber	[µg/l]	54	45	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,162
La Lanthan	[µg/l]	54	37	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,0040	0,0430
Li Lithium	[µg/l]	53	0	0,243	0,340	0,440	0,681	1,053	1,851	3,069
Mo Molybdän	[µg/l]	54	34	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,095
Ni Nickel	[µg/l]	54	8	< NG	< NG	< BG	0,385	0,698	1,535	2,137
Pb Blei	[µg/l]	54	39	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,027	0,161
Rb Rubidium	[µg/l]	54	2	< NG	0,161	0,283	0,475	0,830	0,972	1,340
Sb Antimon	[µg/l]	54	8	< NG	< NG	< BG	0,009	0,013	0,021	0,041
Se Selen	[µg/l]	54	34	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	< BG
Sn Zinn	[µg/l]	54	51	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
Sr Strontium	[µg/l]	54	0	23,8	27,7	54,3	102	127	175	192
Th Thorium	[µg/l]	53	32	< NG	< NG	< NG	< NG	0,139	0,516	1,603
Tl Thallium	[µg/l]	54	53	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
U Uran	[µg/l]	54	0	0,0950	0,1131	0,1323	0,1600	0,2073	0,2441	0,2970
V Vanadium	[µg/l]	54	26	< NG	< NG	< NG	< BG	0,170	0,250	0,384
Y Yttrium	[µg/l]	54	6	< NG	< NG	< BG	0,0150	0,0360	0,0441	0,0760
Zn Zink	[µg/l]	54	0	0,106	0,264	0,427	0,839	1,324	3,346	11,59

< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 2-16: Statistische Auswertung der Grundwasseranalysen aus dem Quartär

2-16 Quartär										
Parameter	Einheit	Anzahl der Probenahmestellen		Statistik						
		gesamt	Parameter < NG	Minimum	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Maximum
Wassertemperatur	[°C]	28	0	8,3	9,1	10,1	11,0	11,8	14,0	14,2
pH-Wert (Gelände)		28	0	5,73	6,23	6,51	7,13	7,26	7,40	7,60
elektr. Leitfähigkeit (25 °C)	[µS/cm]	28	0	115,8	349,6	535,0	650,0	761,3	850,8	1157,0
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	28	0	0,10	0,45	0,58	2,66	5,18	7,25	8,91
O ₂ -Sättigung	[%]	24	0	1,8	4,6	14,1	31,5	52,2	70,5	83,2
CO ₂ frei	[mg/l]	27	0	7,0	13,2	18,5	28,6	45,8	59,7	78,3
F ⁻ Fluorid	[mg/l]	23	22	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	2,46
Cl ⁻ Chlorid	[mg/l]	28	0	< BG	15,00	18,25	30,29	40,15	60,06	107,20
Br ⁻ Bromid	[mg/l]	23	23	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
NO ₃ ⁻ Nitrat	[mg/l]	28	1	< NG	< BG	6,87	20,41	37,18	53,70	87,91
NO ₂ ⁻ Nitrit	[mg/l]	28	26	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG
SO ₄ ²⁻ Sulfat	[mg/l]	28	0	9,66	27,64	35,66	50,04	73,99	82,88	111,84
PO ₄ ³⁻ Phosphat	[mg/l]	26	26	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
HCO ₃ ⁻ Hydrogenkarbonat	[mg/l]	28	0	38,4	63,1	160,8	295,9	358,4	404,1	433,2
Na ⁺ Natrium	[mg/l]	28	0	1,887	5,470	9,456	17,00	20,84	26,98	56,60
K ⁺ Kalium	[mg/l]	28	0	1,600	2,078	2,300	4,720	6,751	11,36	24,55
NH ₄ ⁺ Ammonium	[mg/l]	28	28	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG
Ca ²⁺ Calcium	[mg/l]	28	0	10,34	36,15	56,61	86,45	109,7	132,3	163,7
Mg ²⁺ Magnesium	[mg/l]	28	0	3,643	10,81	13,18	19,57	23,12	26,03	34,04
Fe(tot) Eisen	[mg/l]	26	13	< NG	< NG	< NG	< NG	0,0558	0,5000	1,800
Mn ²⁺ Mangan	[mg/l]	23	2	< NG	0,00014	0,00193	0,00769	0,1468	0,8020	1,696
Si Silicium	[mg/l]	28	0	2,34	2,54	3,32	4,49	5,33	6,14	10,39
Gesamtmineralisation	[mg/l]	28	0	86,06	260,8	405,5	552,0	614,3	695,6	903,2
Gesamthärte	[°dH]	28	0	2,28	8,20	12,1	17,7	20,1	22,9	25,6
Karbonathärte	[°dH]	28	0	1,76	2,90	7,38	13,58	16,45	18,54	19,88
Sättigungsindex (Calciumkarbonat)		27	0	-3,30	-2,42	-1,64	-0,50	-0,38	-0,33	-0,20
Basekapazität bis pH 8,2	[mmol/l]	27	0	0,16	0,30	0,42	0,65	1,04	1,36	1,78
Säurekapazität bis pH 4,3	[mmol/l]	28	0	0,629	1,034	2,636	4,850	5,873	6,621	7,100
Ag Silber	[µg/l]	19	13	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,013	0,029
Al Aluminium	[µg/l]	23	15	< NG	< NG	< NG	< NG	1,744	34,03	45,05
As Arsen	[µg/l]	23	2	< NG	< BG	0,080	0,382	1,358	2,202	3,966
Au Gold	[µg/l]	19	17	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,086
B Bor	[µg/l]	23	0	26,40	31,04	47,01	60,16	81,30	131,0	159,2
Ba Barium	[µg/l]	23	0	106	125	145	178	222	306	459
Be Beryllium	[µg/l]	23	16	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	< BG	0,122
Bi Wismut	[µg/l]	23	7	< NG	< NG	< NG	0,022	0,098	0,155	0,404
Cd Cadmium	[µg/l]	23	10	< NG	< NG	< NG	< BG	0,034	0,078	0,204
Ce Cer	[µg/l]	19	0	0,010	0,017	0,020	0,036	0,119	0,480	1,772
Co Cobalt	[µg/l]	23	0	0,027	0,037	0,057	0,193	0,522	1,624	1,947
Cr Chrom	[µg/l]	23	11	< NG	< NG	< NG	< BG	0,275	1,220	3,712
Cs Cäsium	[µg/l]	23	6	< NG	< NG	< BG	0,0060	0,0100	0,0288	0,0440
Cu Kupfer	[µg/l]	23	0	0,325	0,732	1,021	1,857	5,445	8,559	71,57
Hg Quecksilber	[µg/l]	23	21	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	0,030
La Lanthan	[µg/l]	23	3	< NG	< BG	0,0050	0,0100	0,0260	0,0582	0,4200
Li Lithium	[µg/l]	23	0	2,622	5,301	7,040	9,290	16,35	23,41	30,13
Mo Molybdän	[µg/l]	23	5	< NG	< NG	< BG	0,112	0,227	0,740	1,040
Ni Nickel	[µg/l]	23	4	< NG	< NG	0,183	0,847	2,690	3,318	3,629
Pb Blei	[µg/l]	23	15	< NG	< NG	< NG	< NG	0,038	0,137	0,431
Rb Rubidium	[µg/l]	23	0	0,177	0,442	0,645	1,060	2,618	4,518	7,264
Sb Antimon	[µg/l]	23	9	< NG	< NG	< NG	0,013	0,075	0,098	0,236
Se Selen	[µg/l]	23	10	< NG	< NG	< NG	< BG	1,637	2,976	6,450
Sn Zinn	[µg/l]	23	19	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,346
Sr Strontium	[µg/l]	23	0	54,4	124	199	307	416	441	615
Th Thorium	[µg/l]	23	19	< NG	< NG	< NG	< NG	< NG	< BG	0,071
Tl Thallium	[µg/l]	23	14	< NG	< NG	< NG	< NG	0,022	0,074	1,118
U Uran	[µg/l]	23	0	0,0320	0,0538	0,2240	0,6930	1,195	3,540	6,817
V Vanadium	[µg/l]	23	10	< NG	< NG	< NG	< BG	0,530	1,142	2,276
Y Yttrium	[µg/l]	23	4	< NG	< NG	0,0240	0,0430	0,1045	0,3160	1,028
Zn Zink	[µg/l]	23	0	3,420	10,36	12,08	23,86	45,15	72,13	95,54

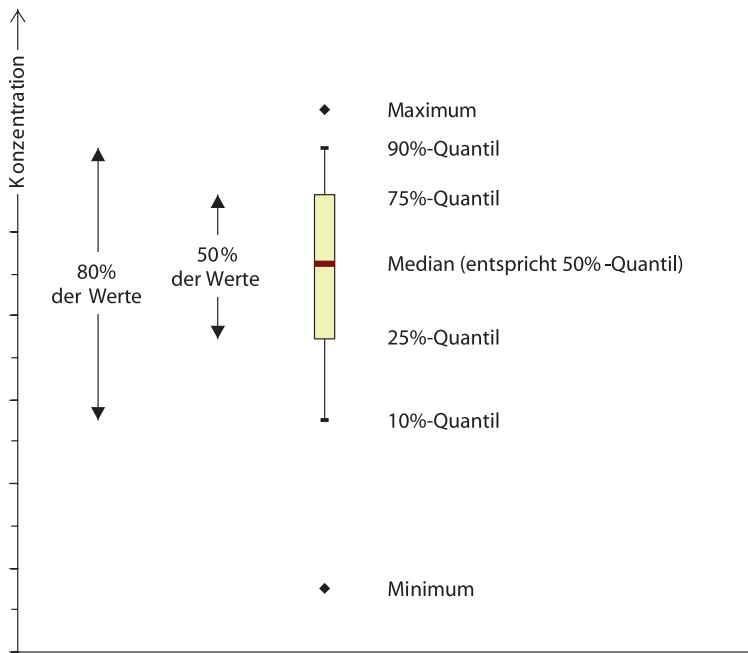
< NG = kleiner Nachweisgrenze

< BG = kleiner Bestimmungsgrenze

Anhang 3:

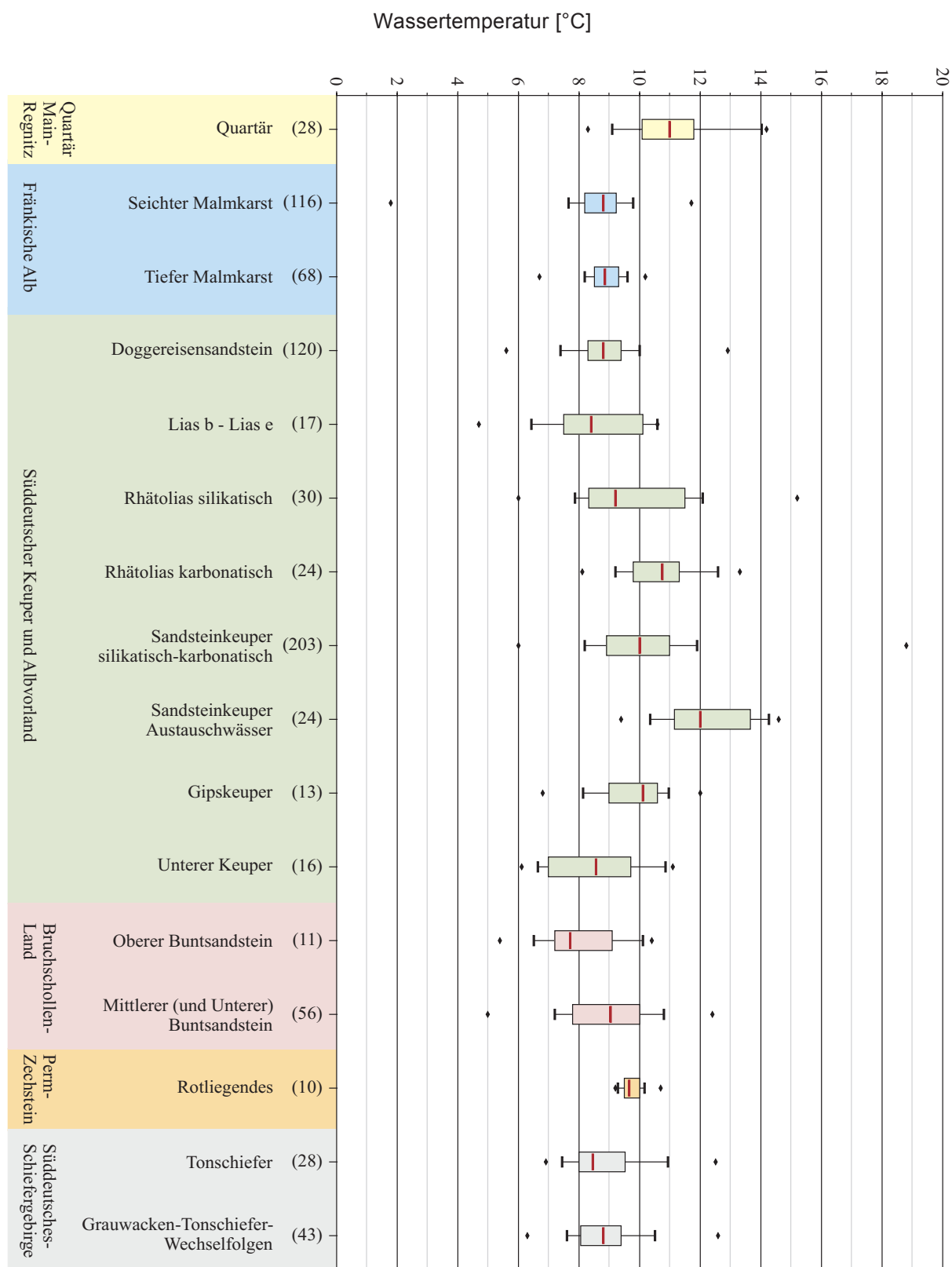
Grundwasserbeschaffenheit – Verzeichnis der Spannweitendiagramme der physikochemischen Parameter der in der Planungsregion 4 Oberfranken West untersuchten Grundwasserproben

Im Folgenden sind die charakteristischen Spannweitendiagramme („Box-Plots“) der physikochemischen Parameter der Grundwasserbeschaffenheit in der Planungsregion Oberfranken West unterschiedenen Grundwässern dargestellt. Folgende Abbildung erläutert die Signaturen nach DVWK (1999).

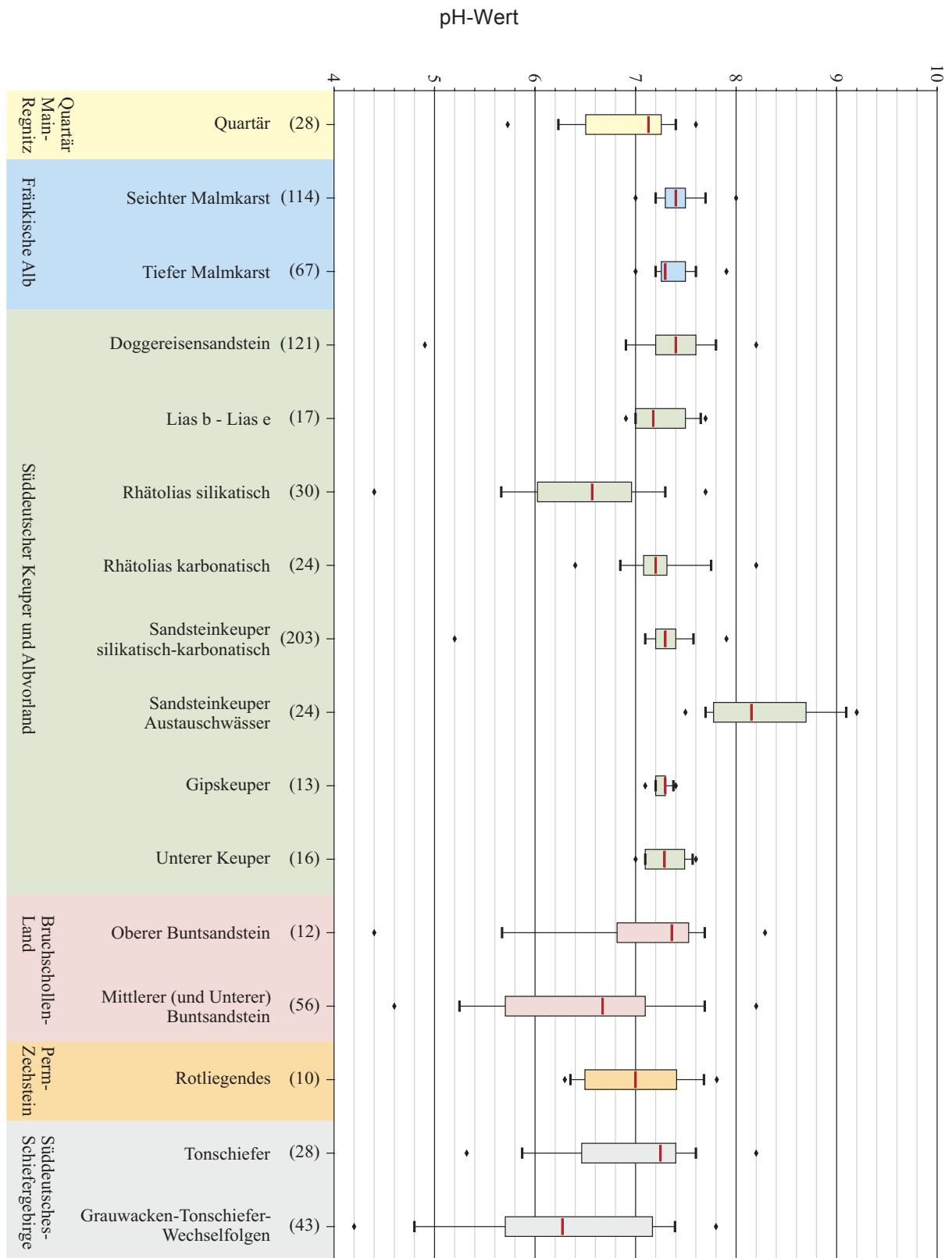


Bei den unterschiedenen Grundwässern ist jeweils in Klammern die Anzahl der berücksichtigten Werte angegeben. Standen weniger als 10 Analysen bei einem Parameter zur Verfügung, wurden nur Minimum, Median und Maximum dargestellt. Soweit die Nachweisgrenzen (NG) und Bestimmungsgrenzen (BG) der jeweiligen Parameter innerhalb des dargestellten Konzentrationsbereichs liegen, sind diese als beschriftete Linien dargestellt.

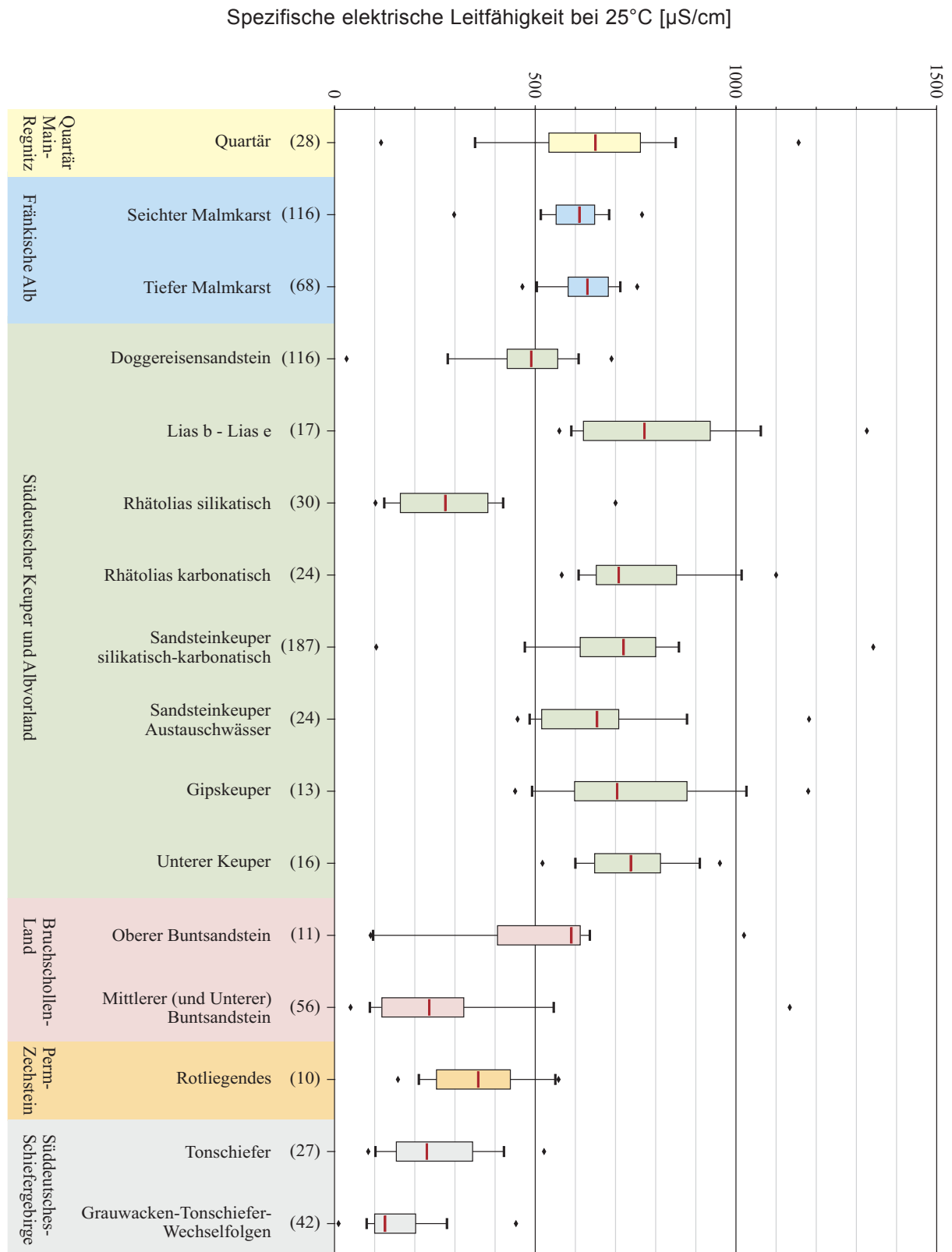
Die Darstellung der Parameter erfolgt in der Reihenfolge der Auflistung in den Tabellen von Anhang 2. Nicht weiter dargestellt werden wegen durchgehend sehr selten erfolgter Nachweise die routinemäßig gemessenen Elemente Fluorid, Bromid, Nitrit, Phosphat, Ammonium, Silber, Gold, Wismut, Beryllium, Quecksilber, Zinn und Selen. Die entsprechenden Maßzahlen sind jedoch in den Tabellen in Anhang 2 aufgelistet.



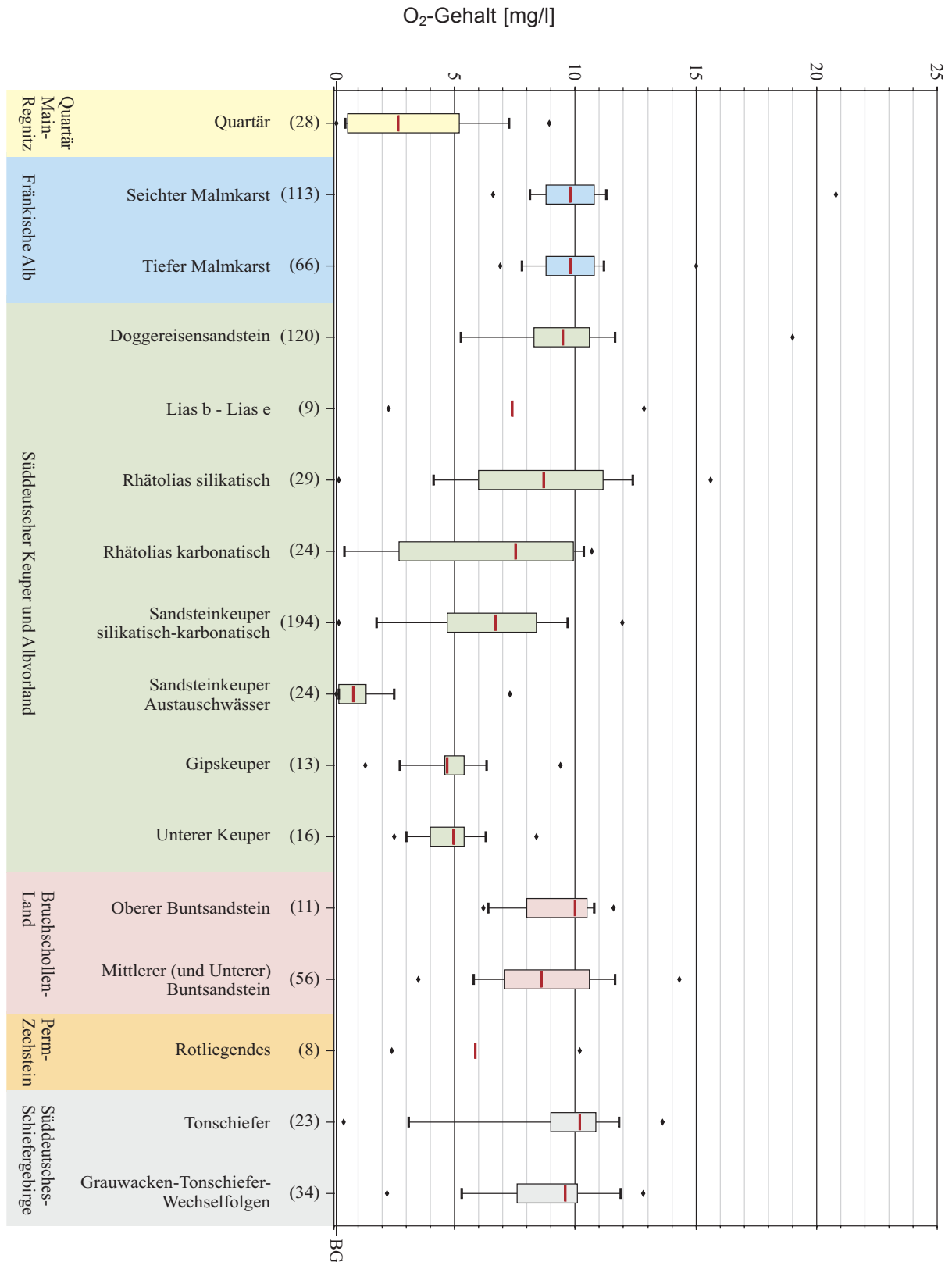
Anhang 3-1: Spannweitendiagramme der Wassertemperatur in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten.



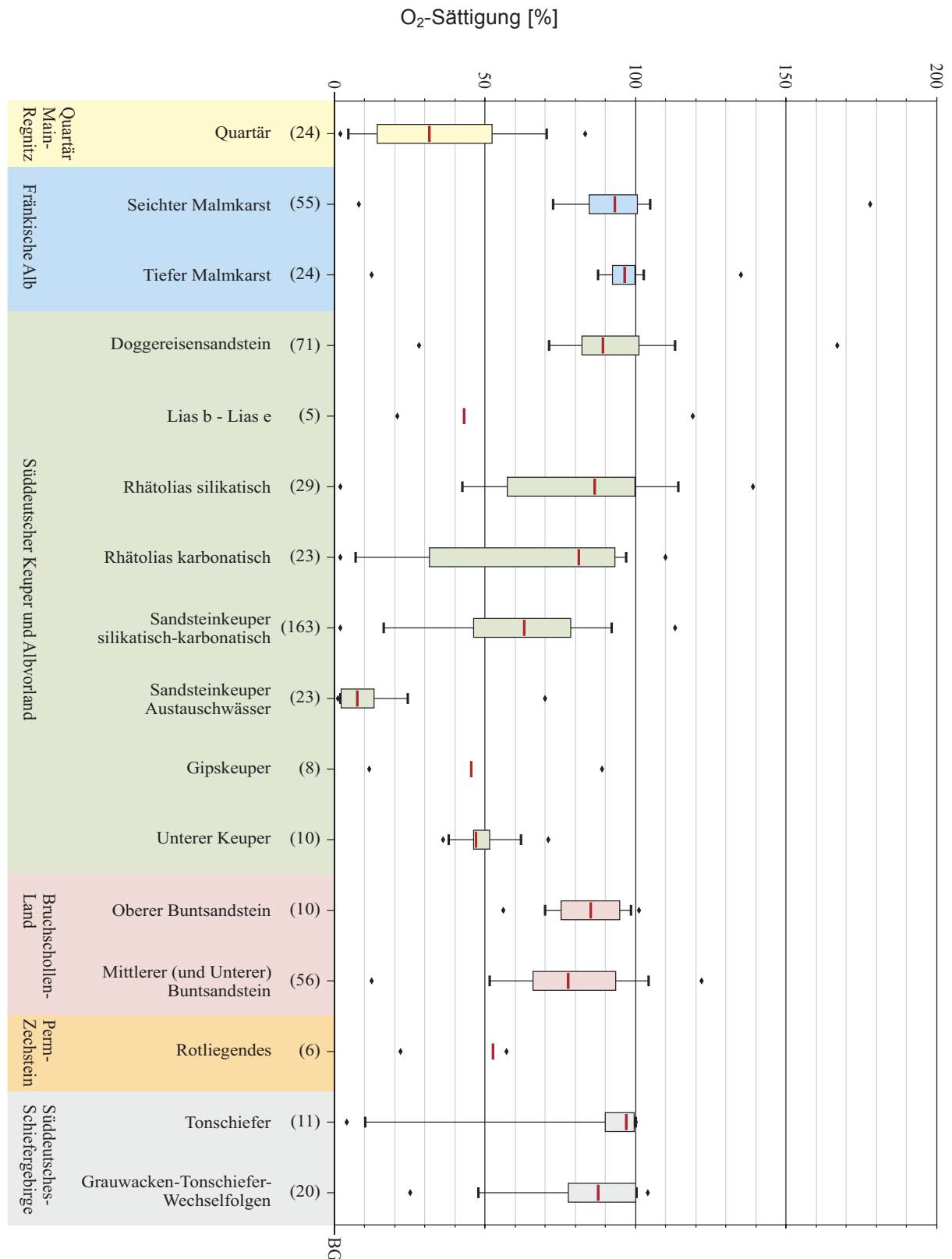
Anhang 3-2: Spannweitendiagramme des pH-Werts in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



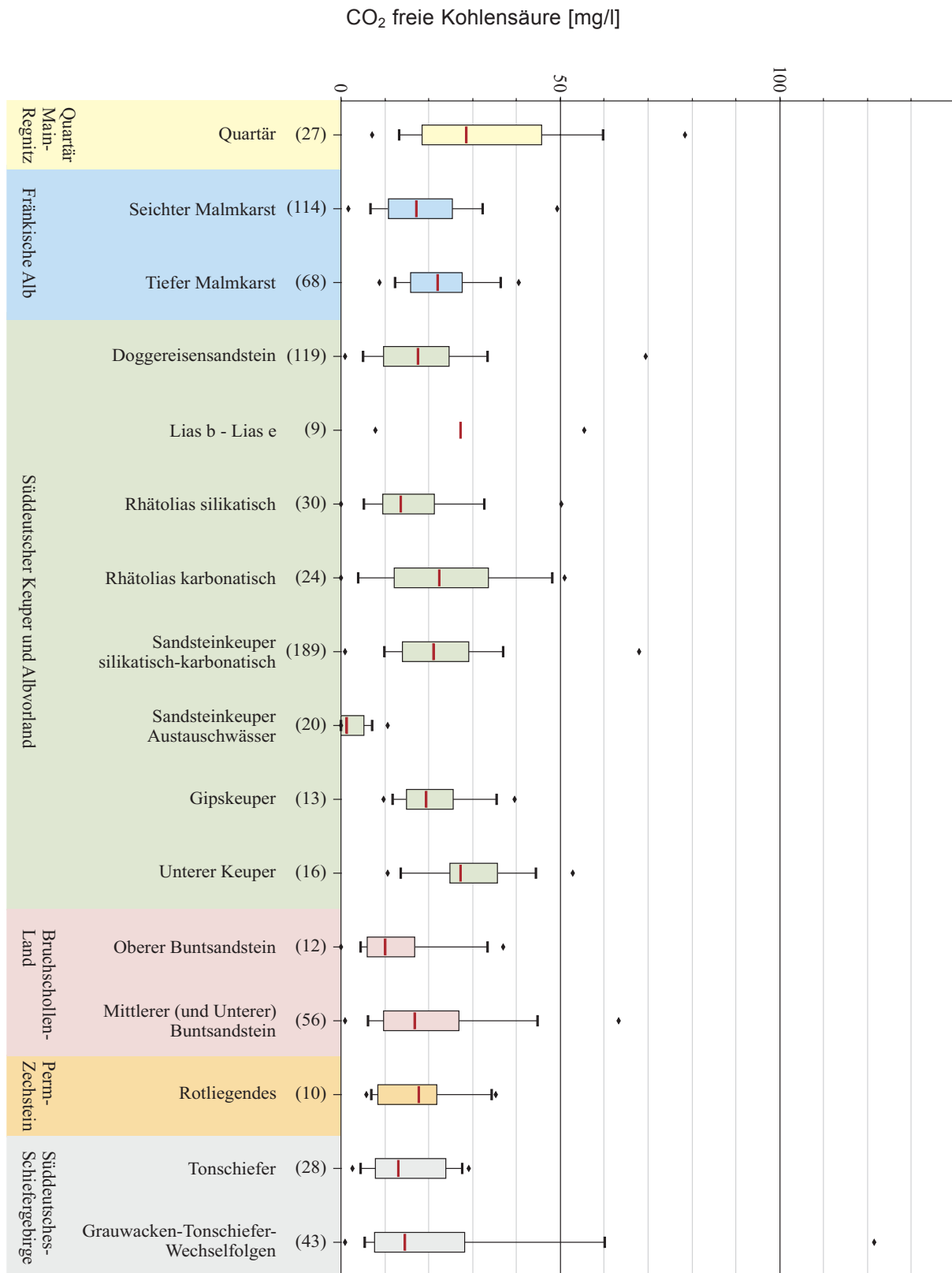
Anhang 3-3: Spannweitendiagramme der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



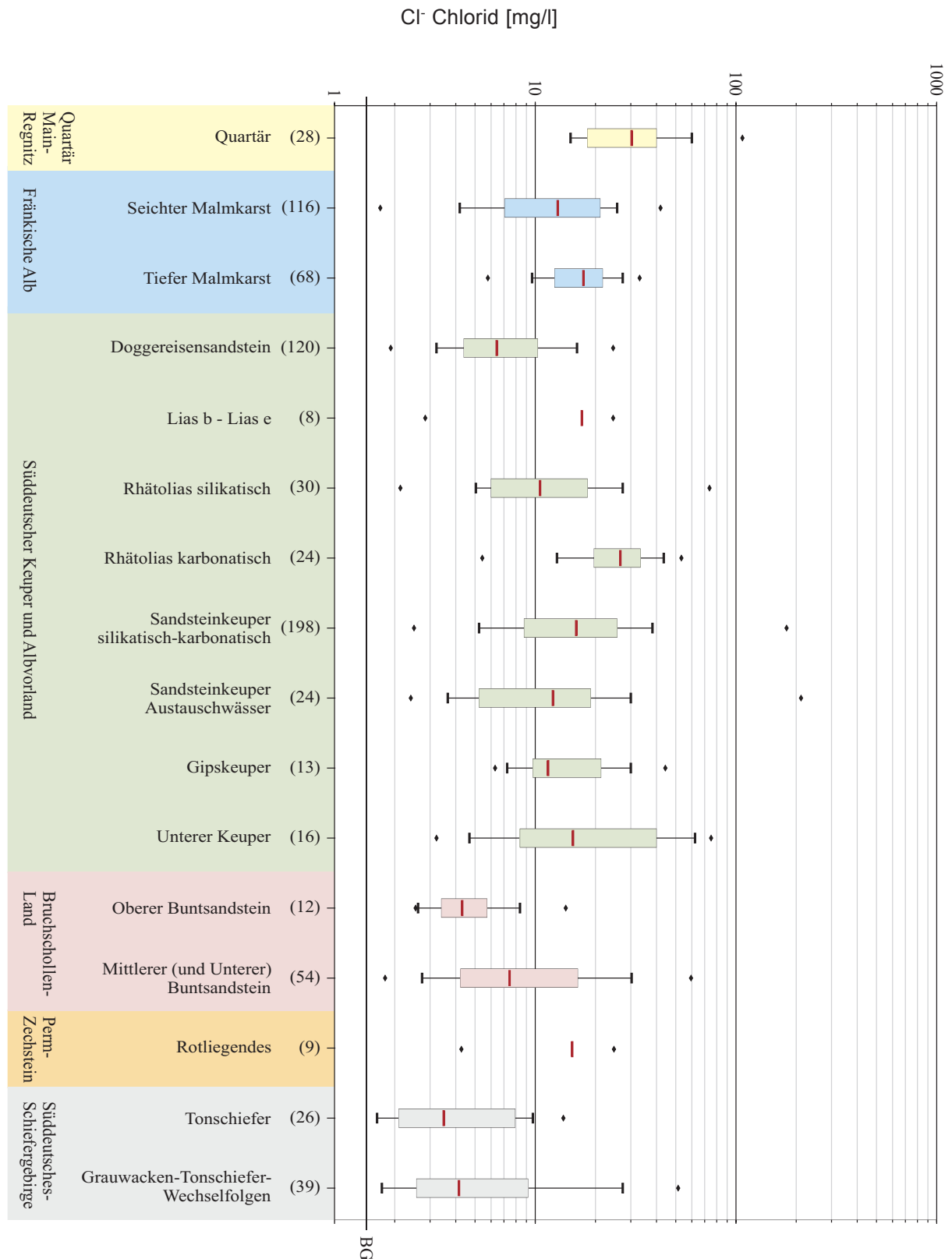
Anhang 3-4: Spannweitendiagramme des Sauerstoffgehalts in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



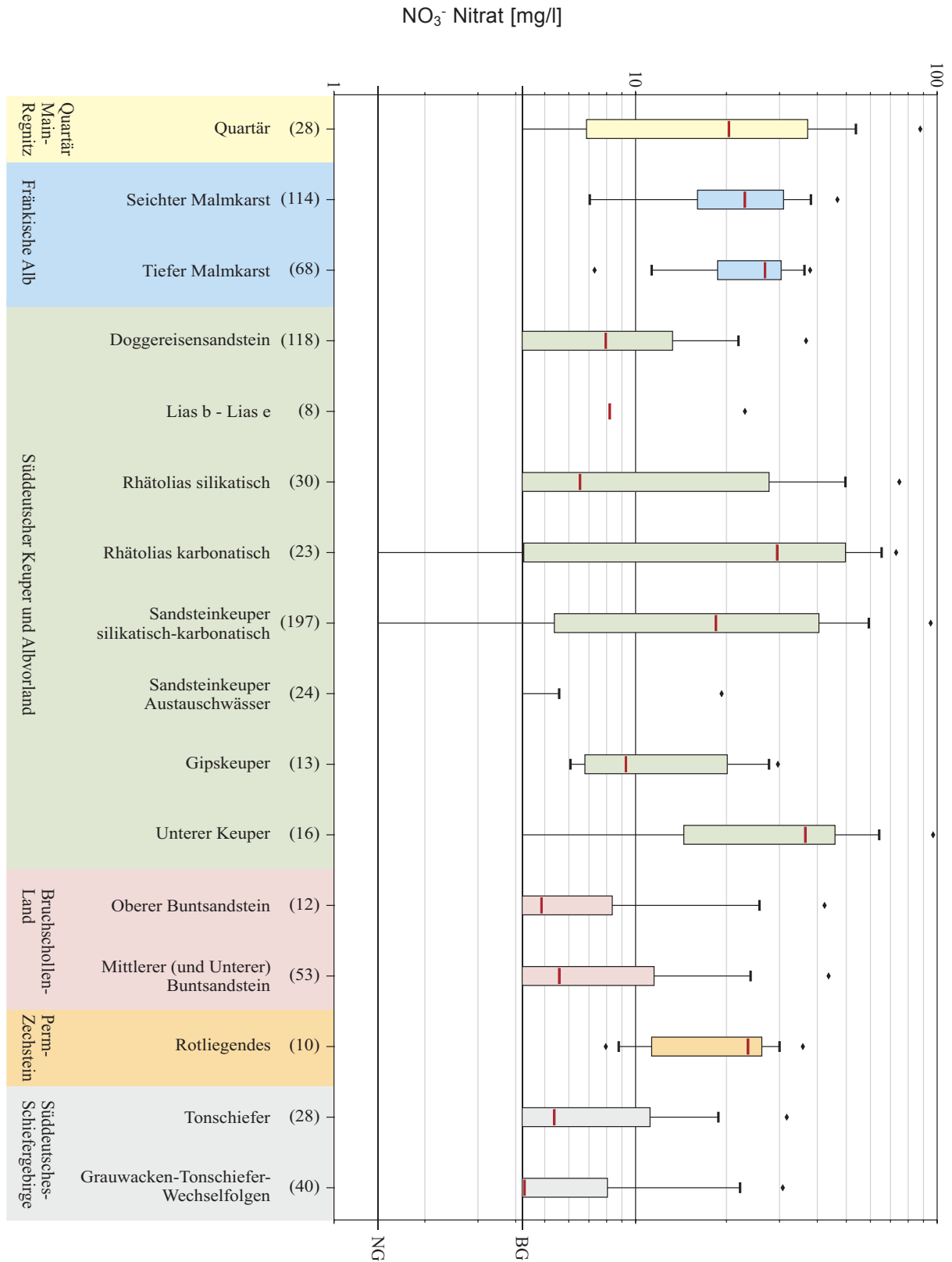
Anhang 3-5: Spannweitendiagramme der Sauerstoffsättigung in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



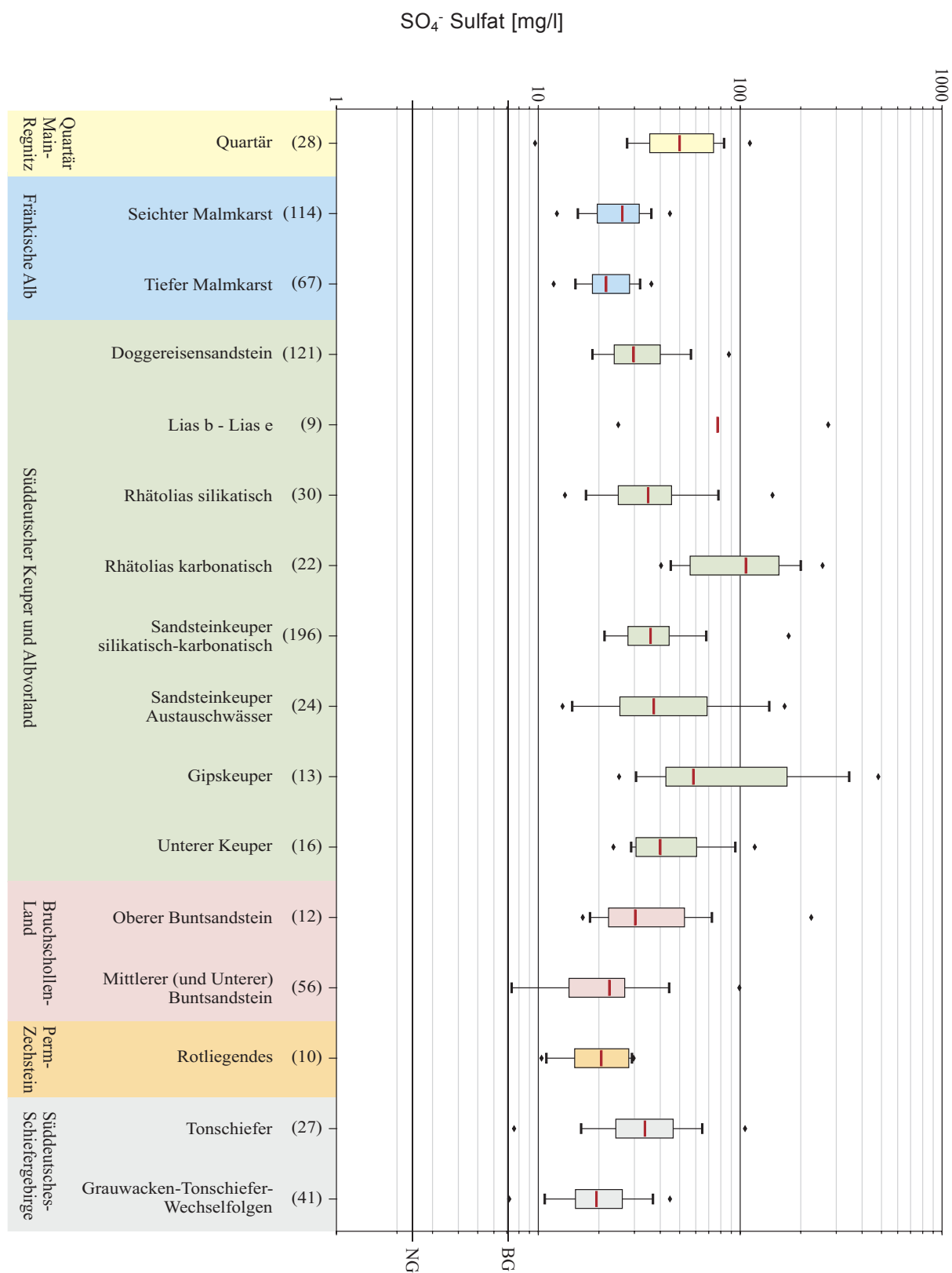
Anhang 3-6: Spannweitendiagramme der freien Kohlensäure Konzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



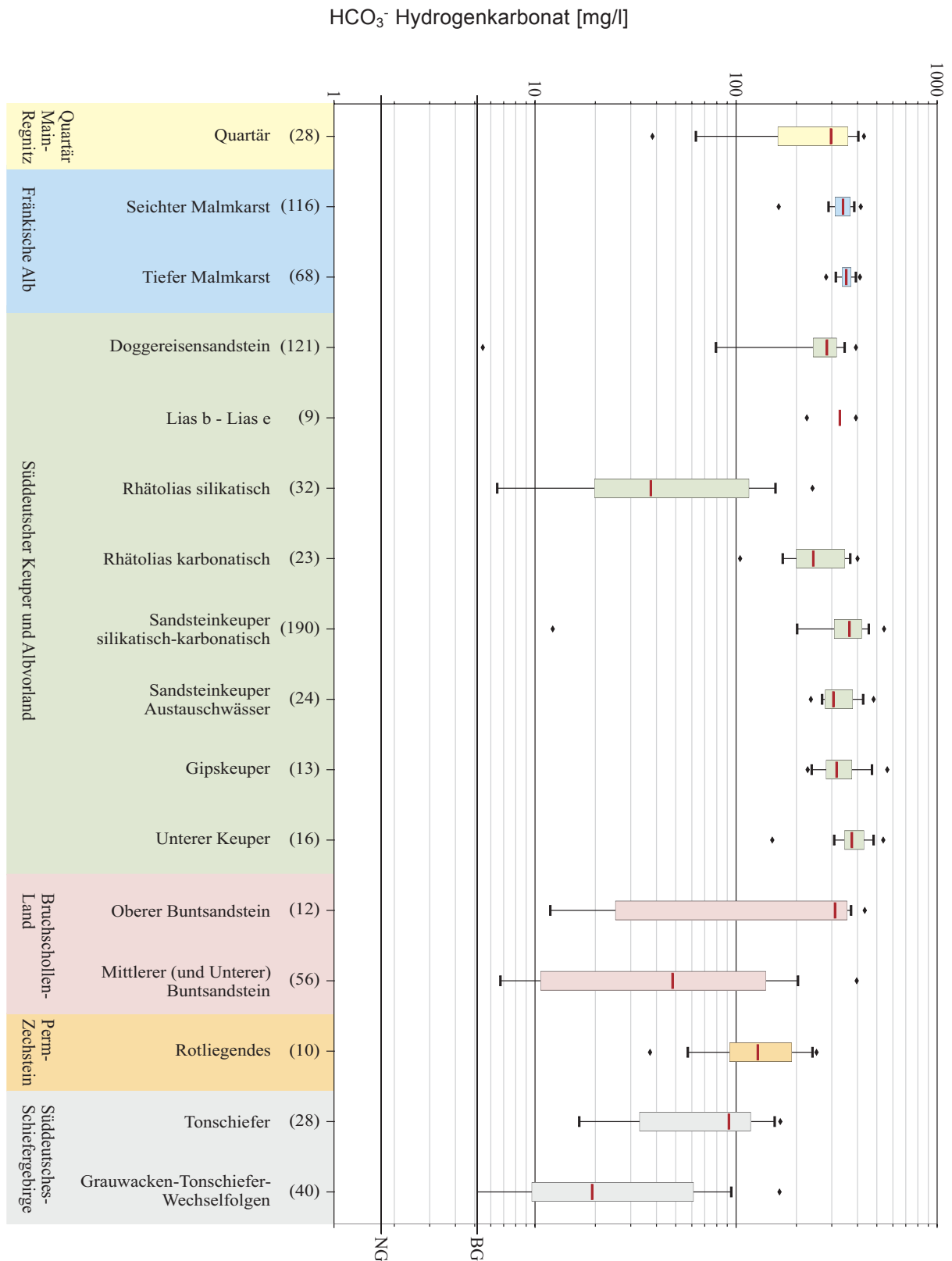
Anhang 3-7: Spannweitendiagramme der Chloridkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



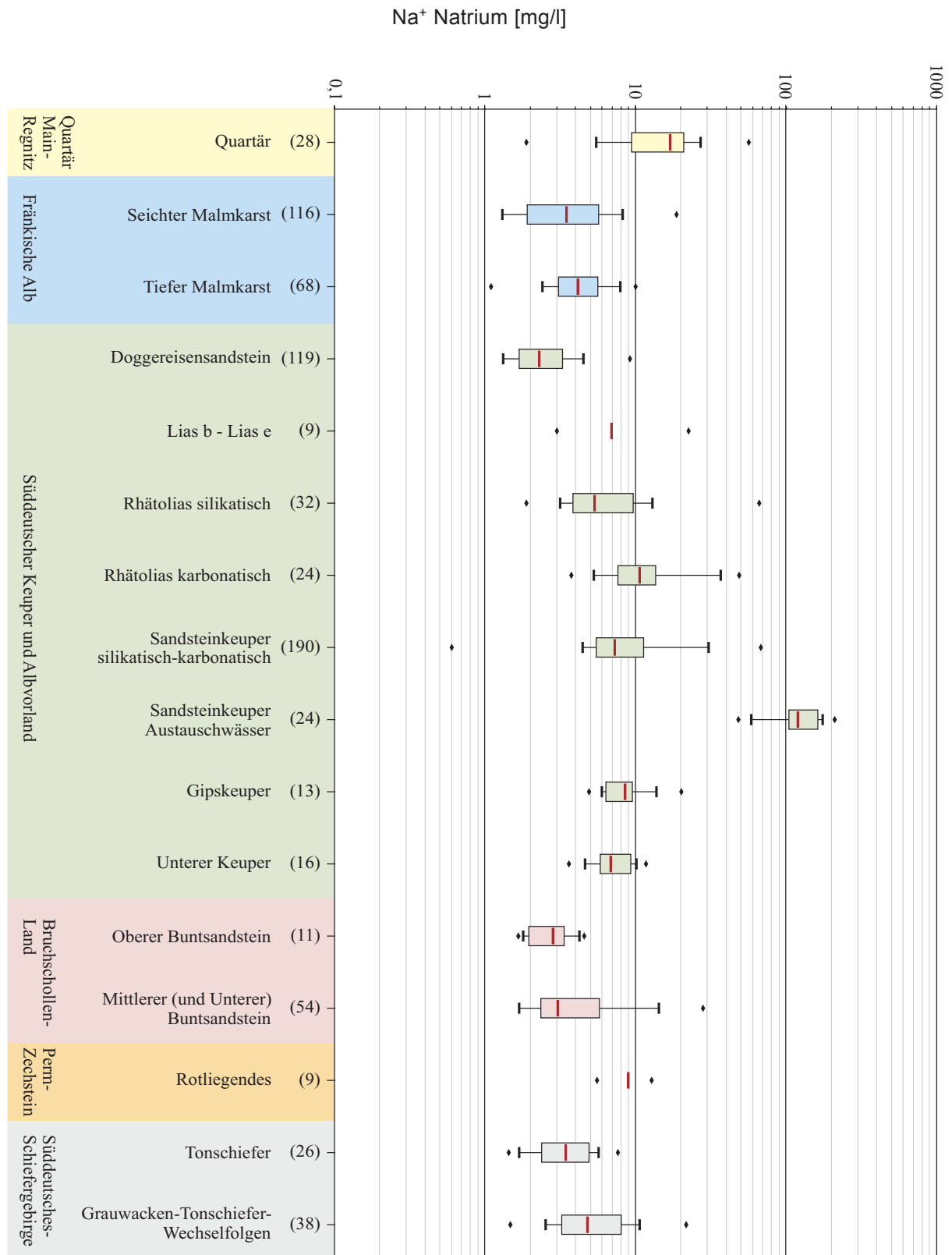
Anhang 3-8: Spannweitendiagramme der Nitratkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



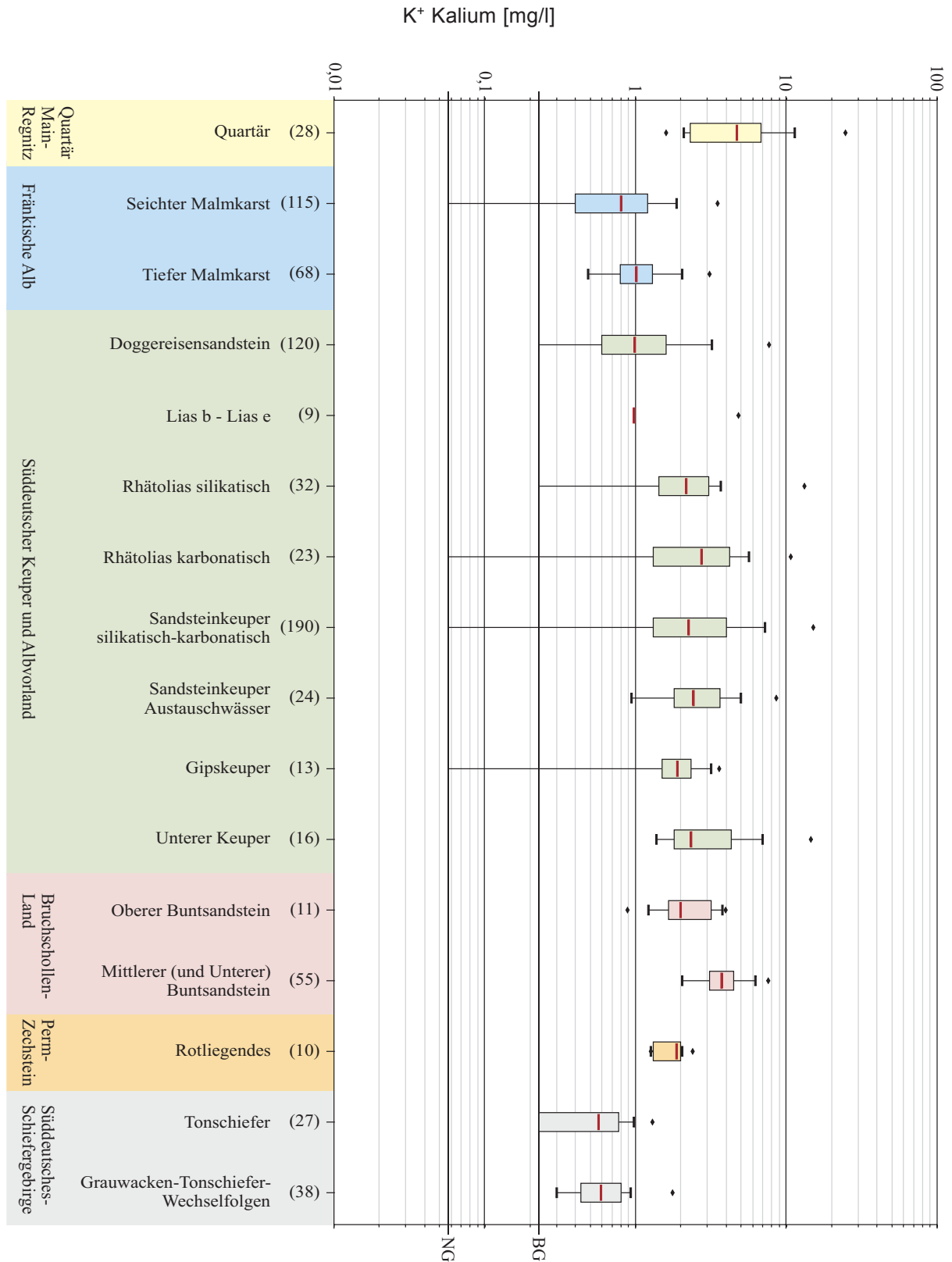
Anhang 3-9: Spannweitendiagramme der Sulfatkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



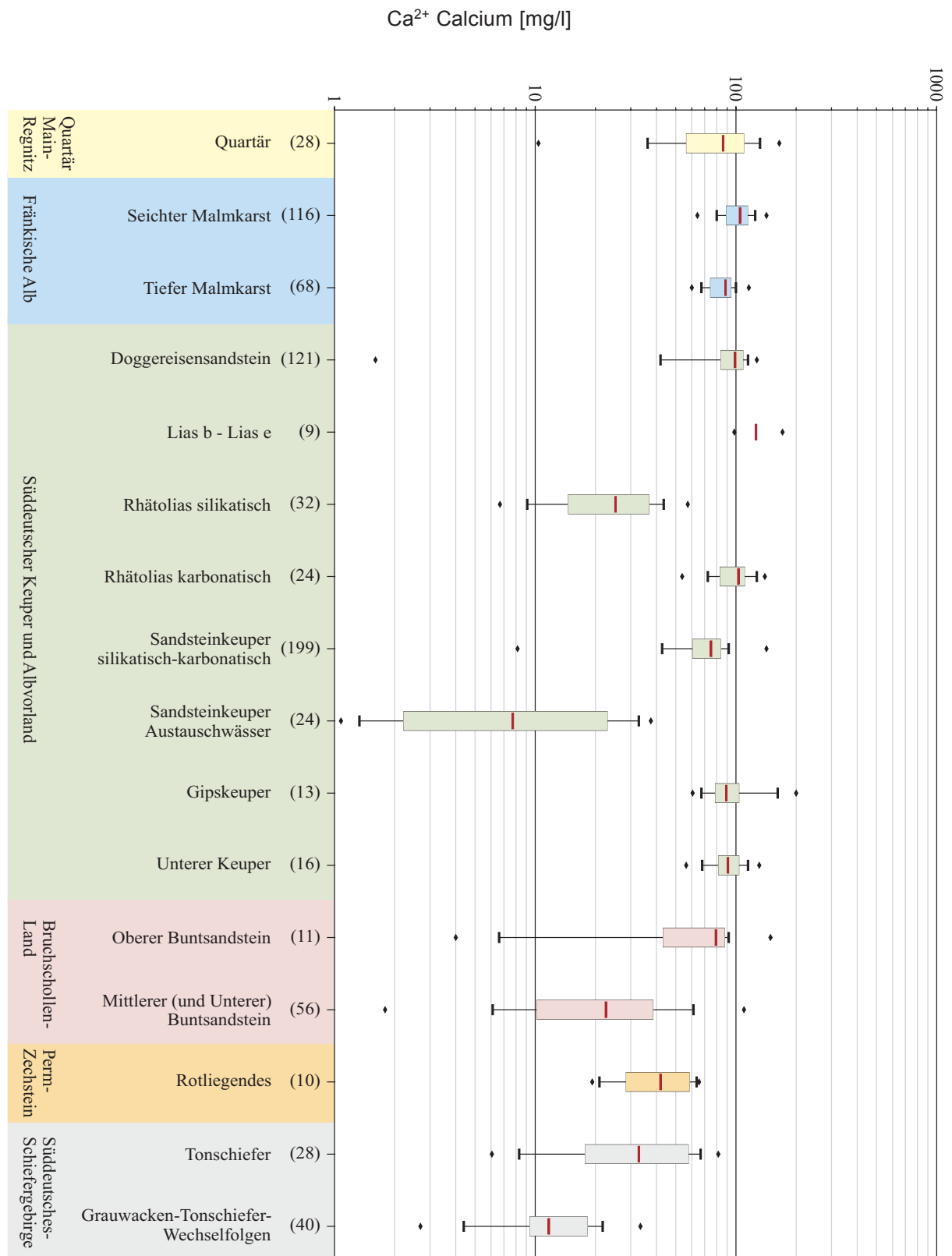
Anhang 3-10: Spannweitendiagramme der Hydrogenkarbonatkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



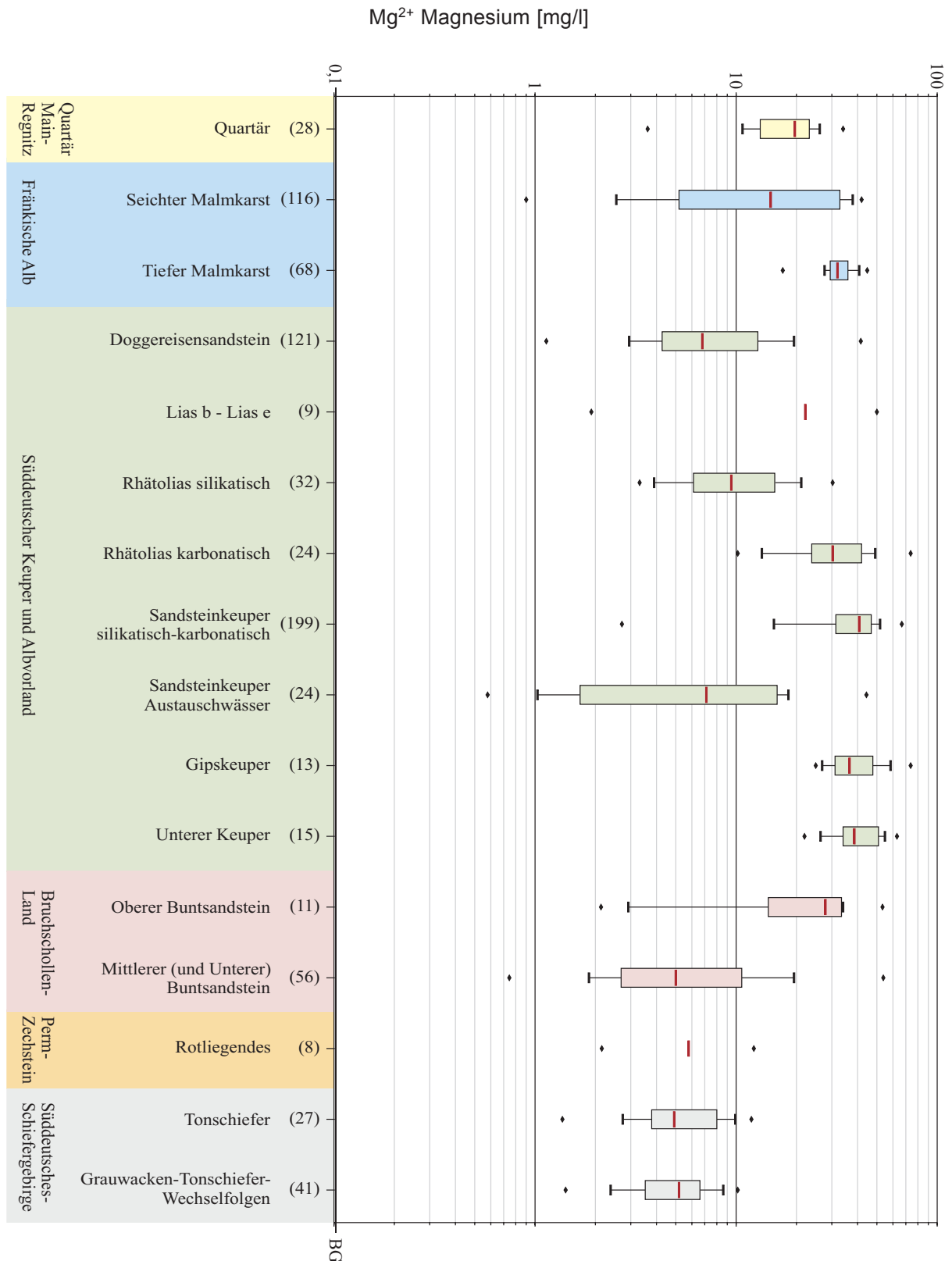
Anhang 3-11: Spannweitendiagramme der Natriumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



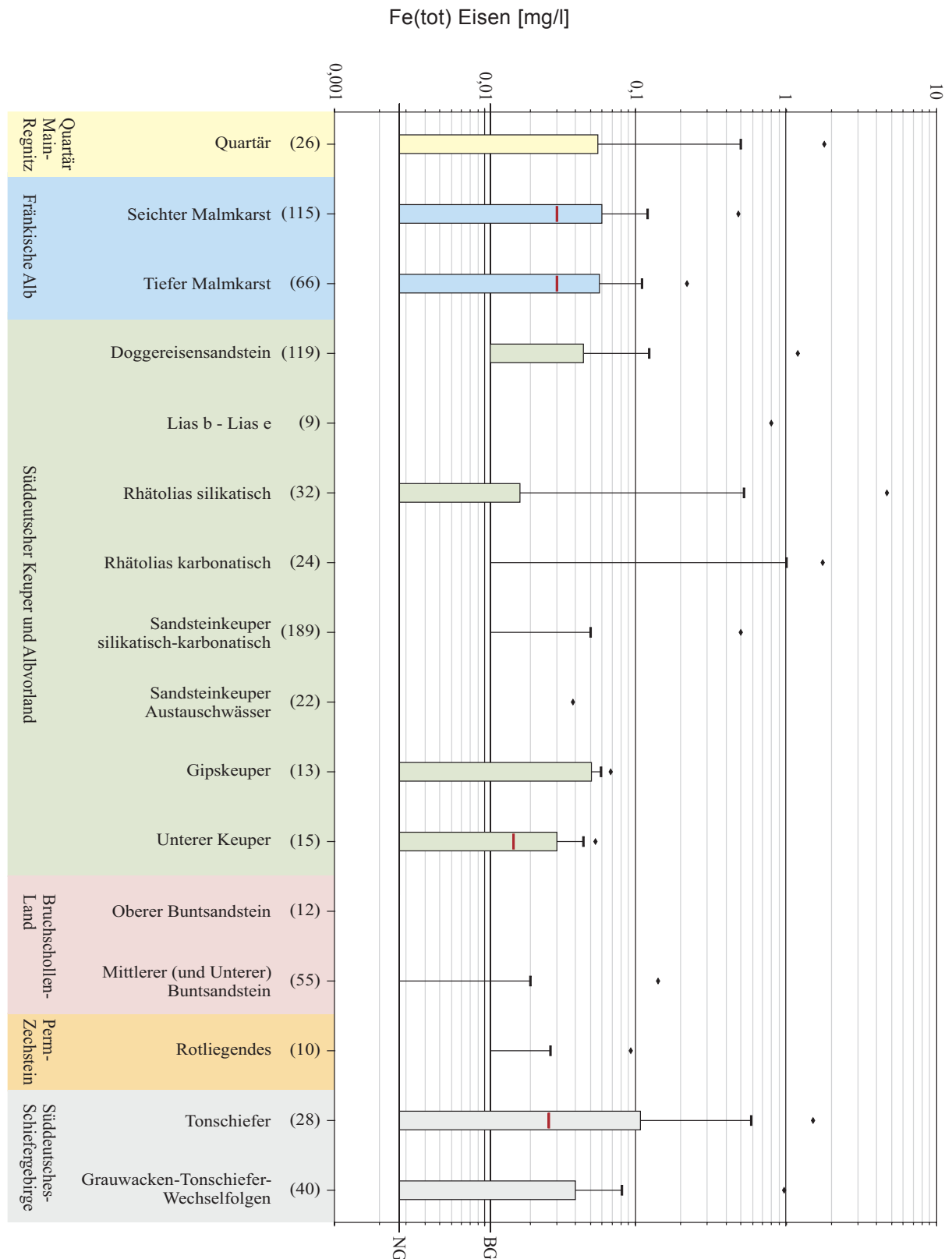
Anhang 3-12: Spannweitendiagramme der Kaliumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



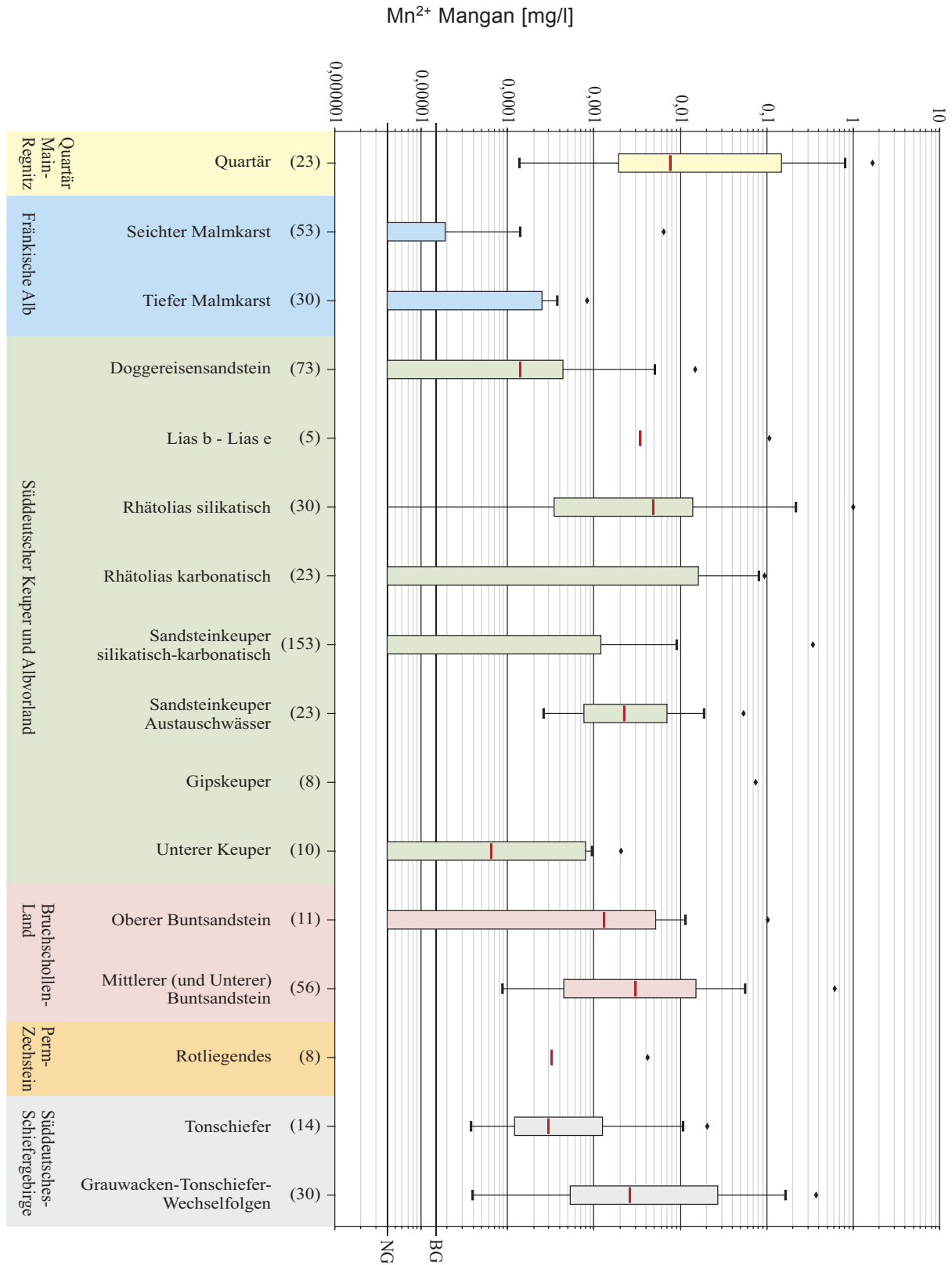
Anhang 3-13: Spannweitendiagramme der Calciumkonzentration in den unterschiedlichen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



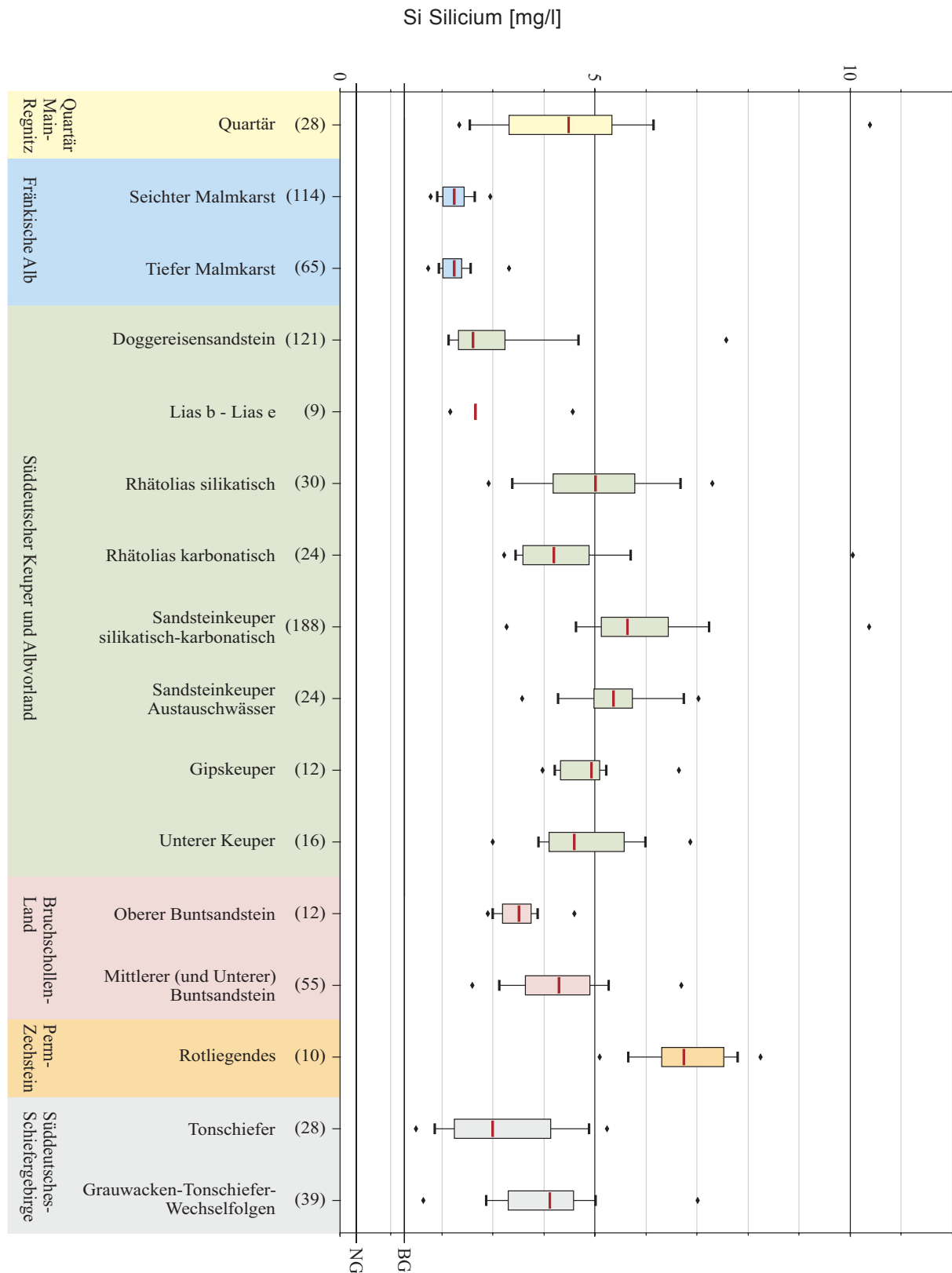
Anhang 3-14: Spannweitendiagramme der Magnesiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



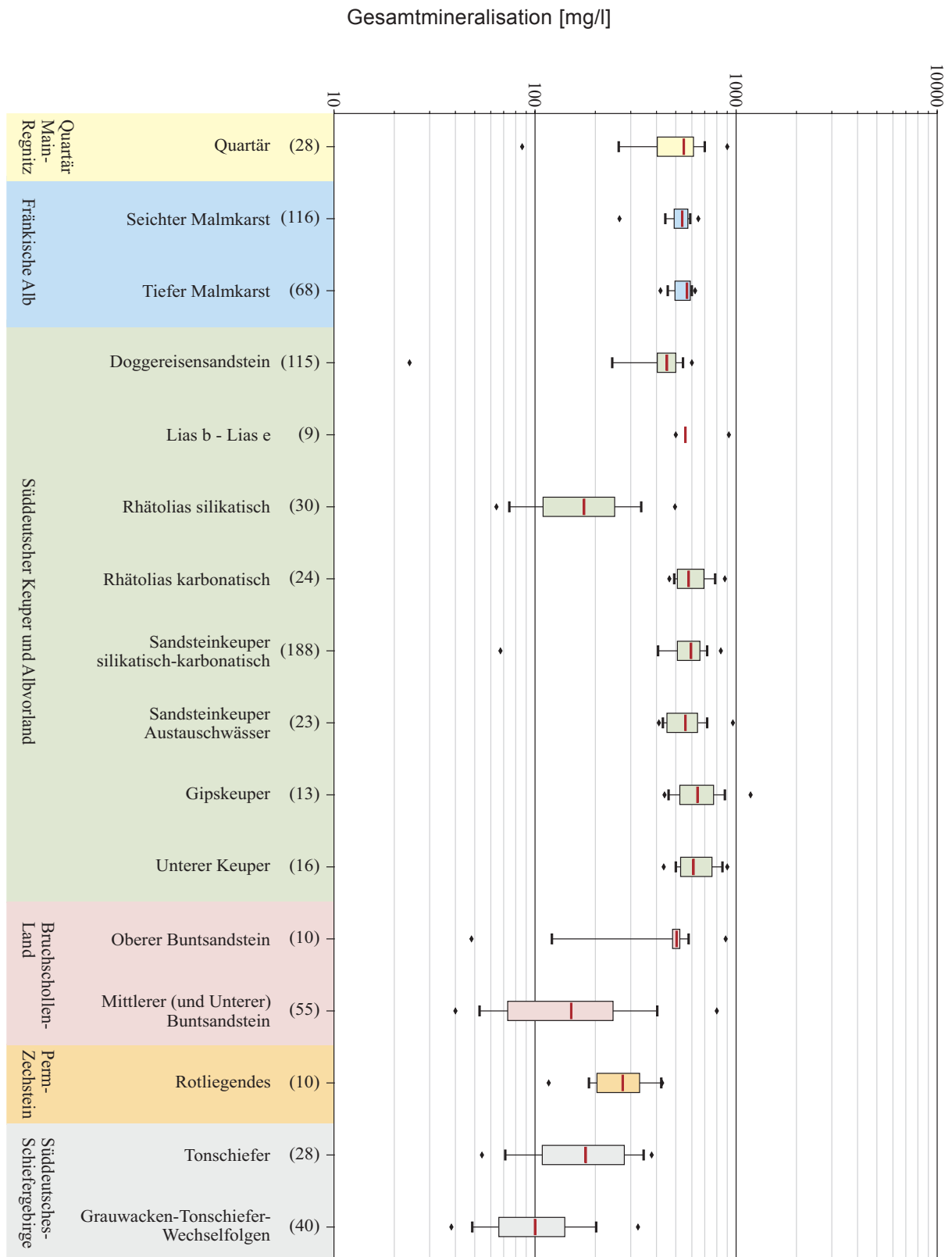
Anhang 3-15: Spannweitendiagramme der Eisenkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



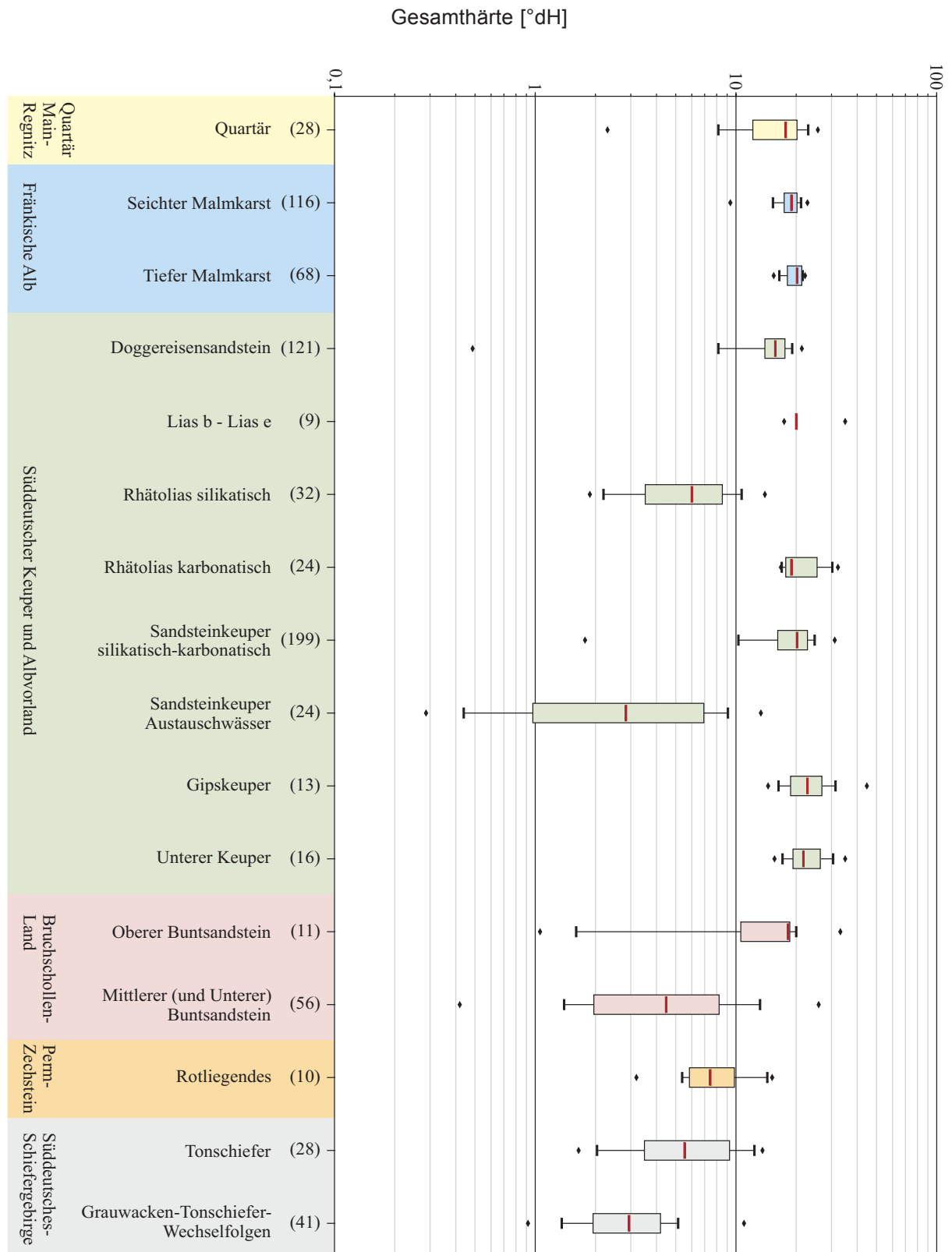
Anhang 3-16: Spannweitendiagramme der Mangankonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



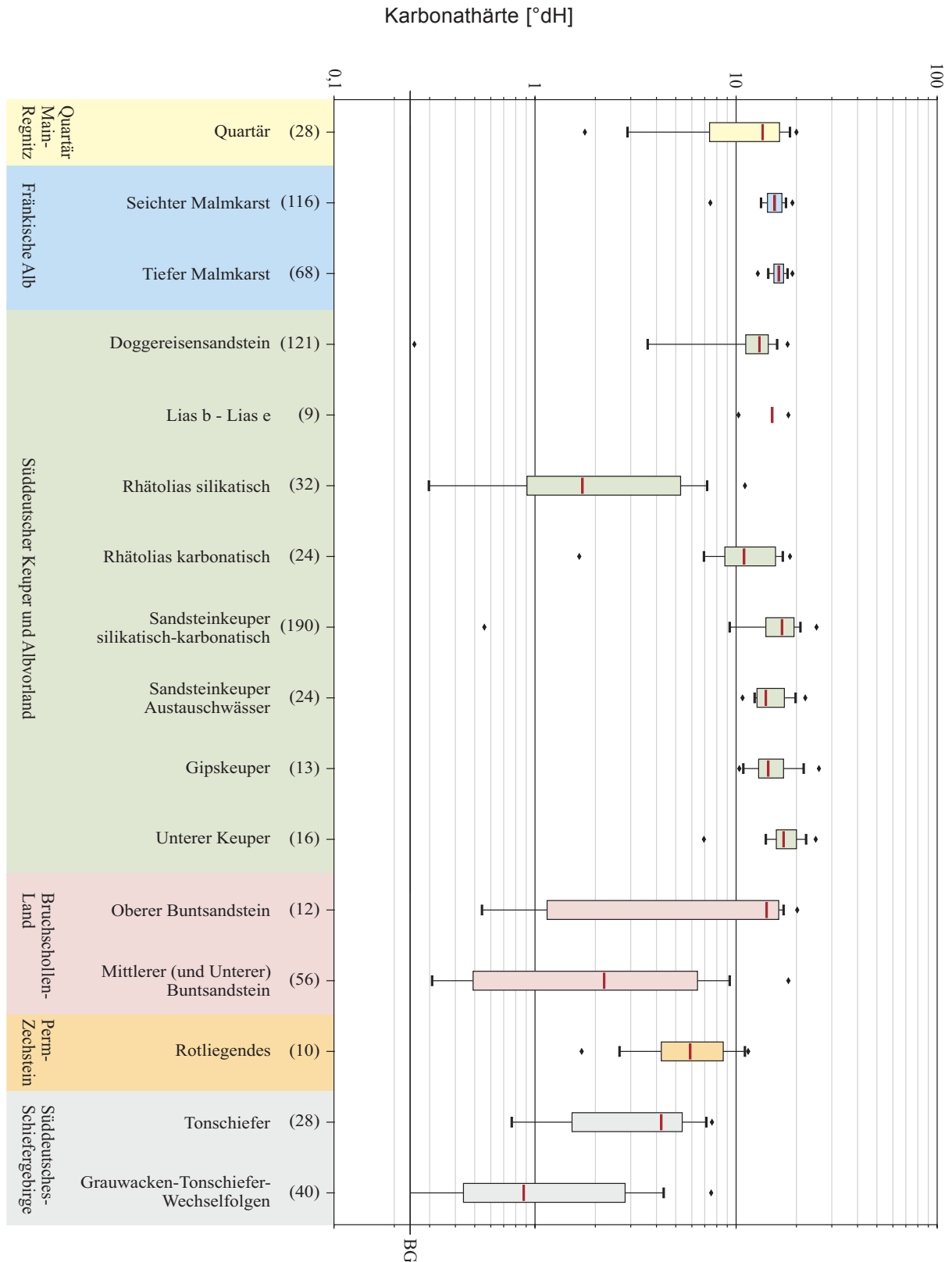
Anhang 3-17: Spannweitendiagramme der Siliciumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



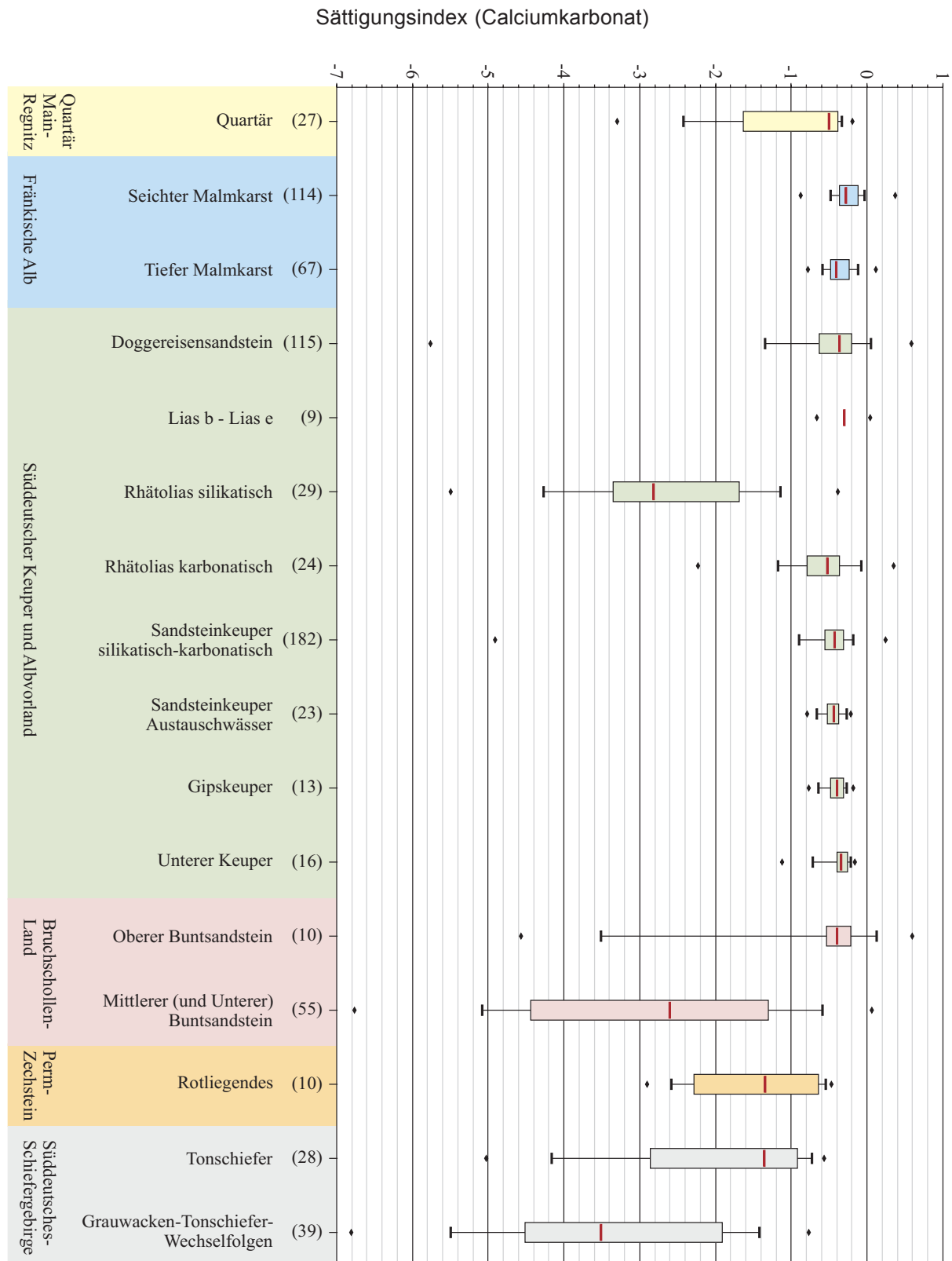
Anhang 3-18: Spannweitendiagramme der Gesamtmineralisation in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



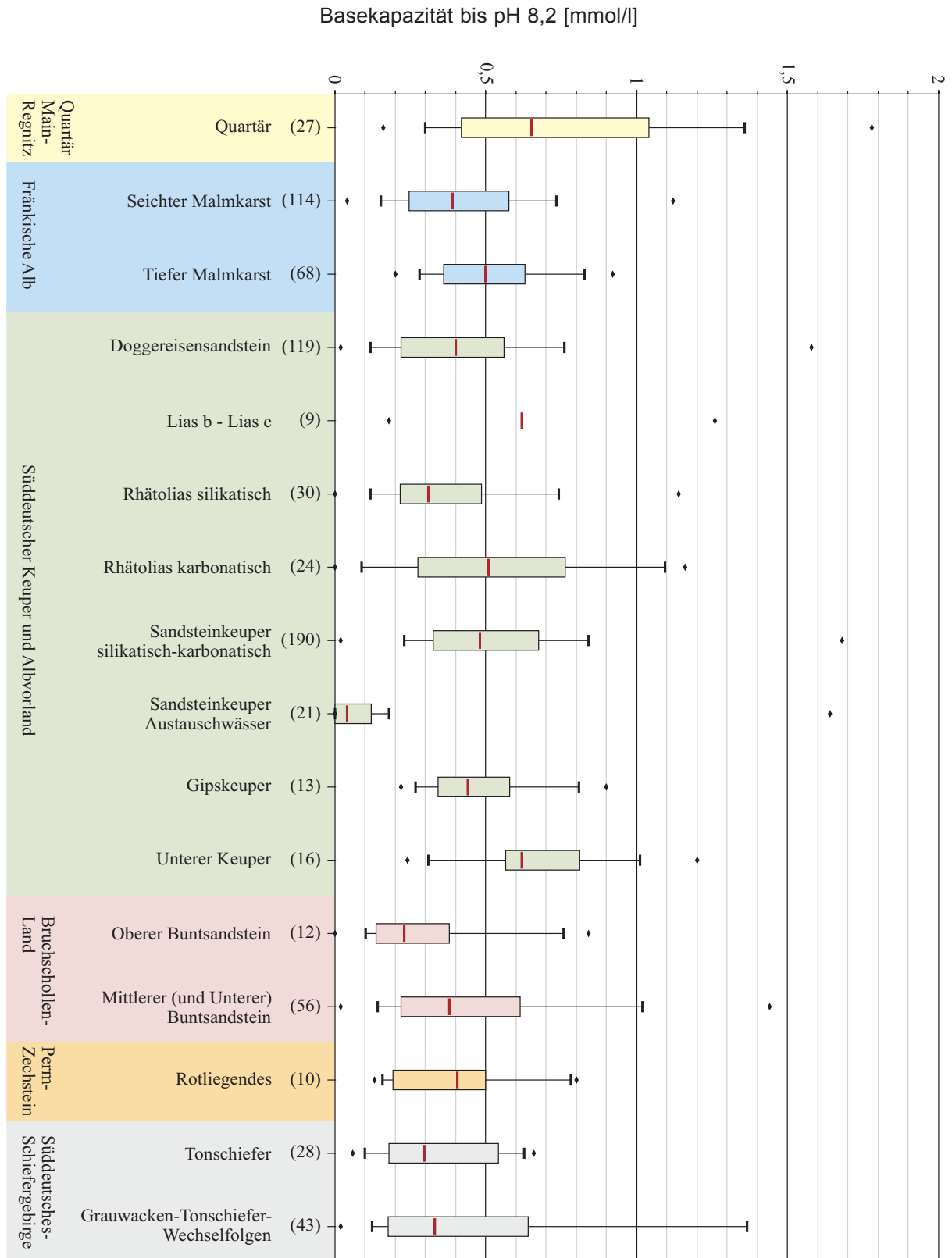
Anhang 3-19: Spannweitendiagramme der Gesamthärte in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



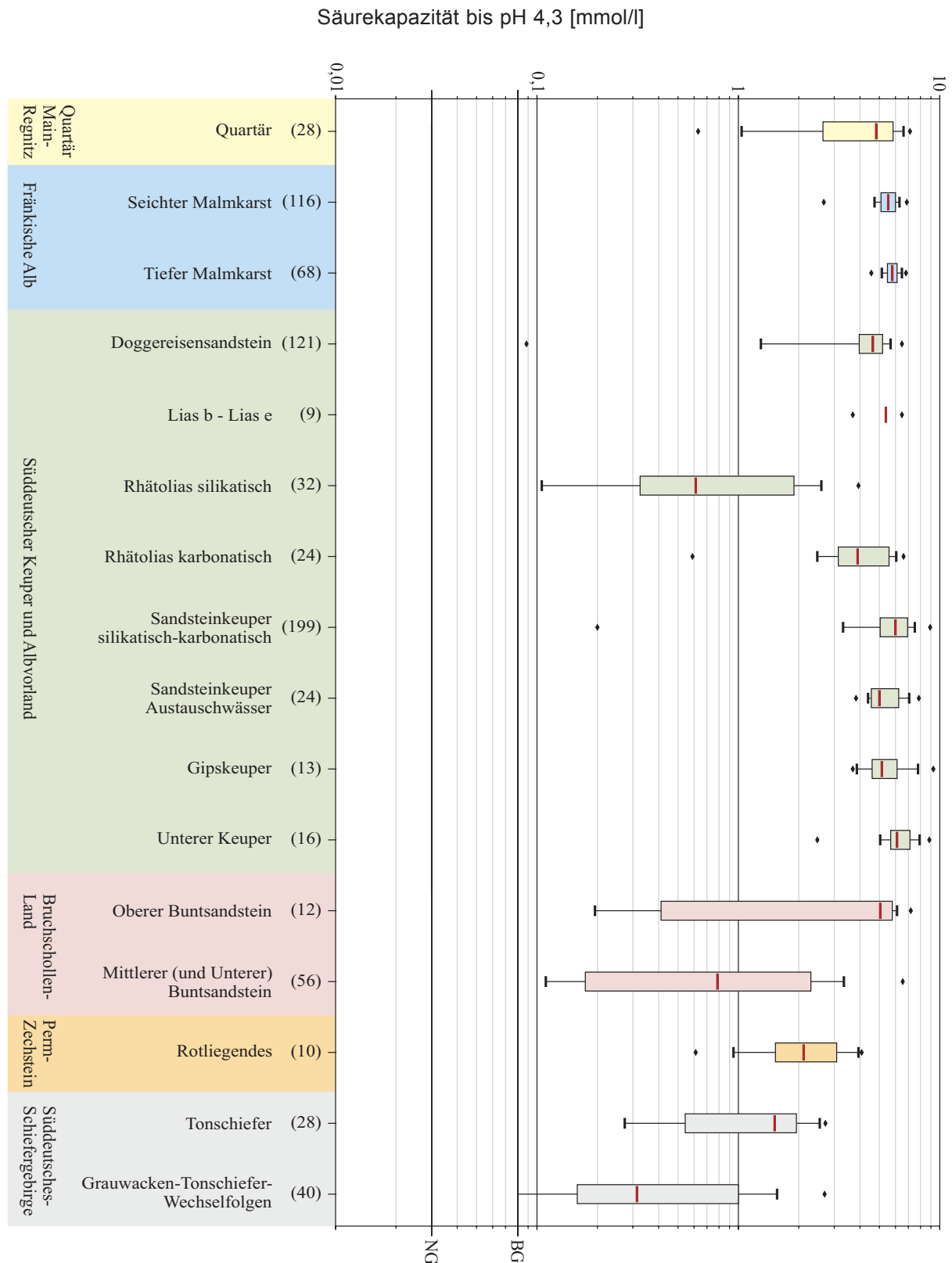
Anhang 3-20: Spannweitendiagramme der Karbonathärte in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



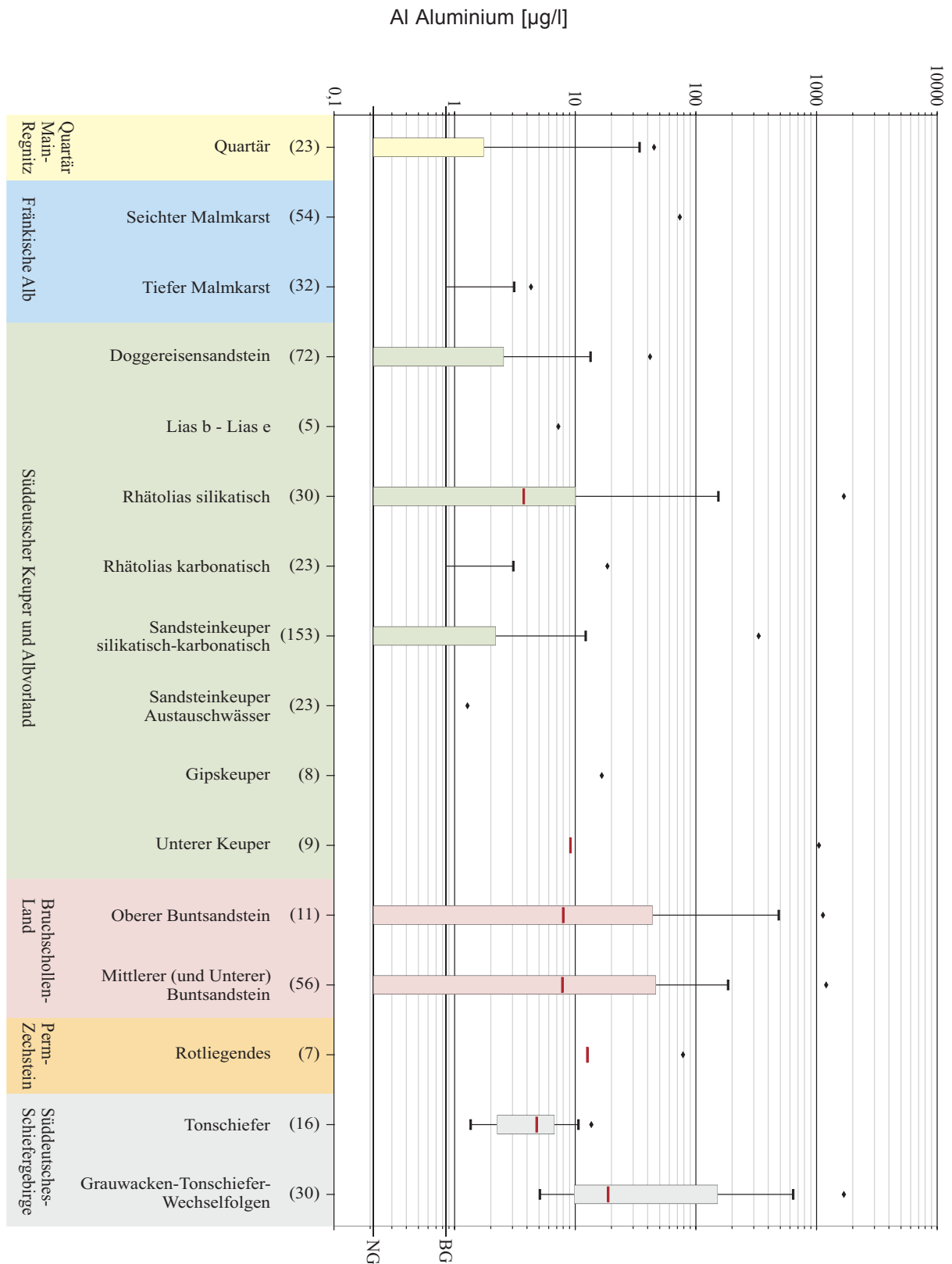
Anhang 3-21: Spannweitendiagramme des Sättigungsindexes für Calciumkarbonat in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



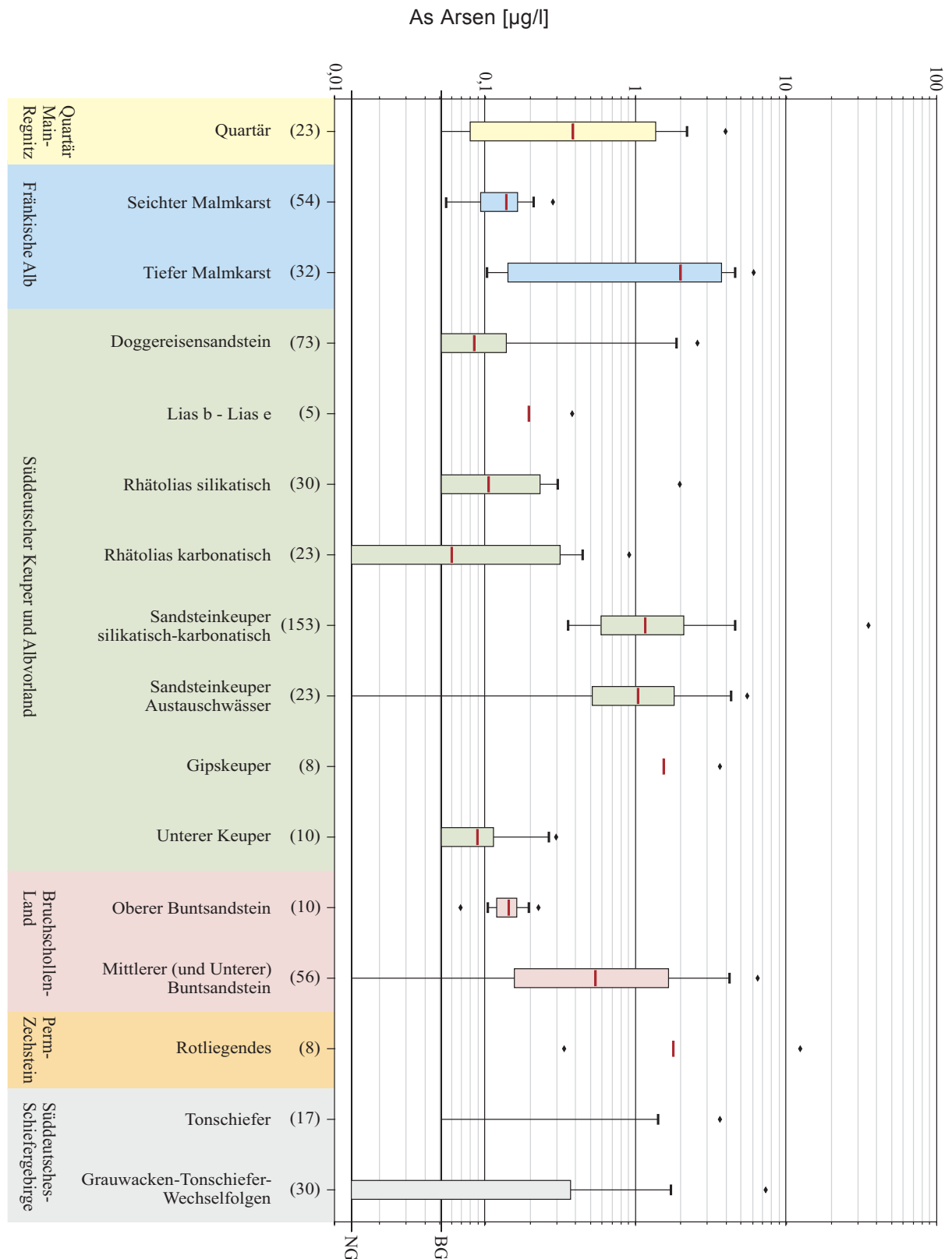
Anhang 3-22: Spannweitendiagramme der Basekapazität bis pH 8,2 in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



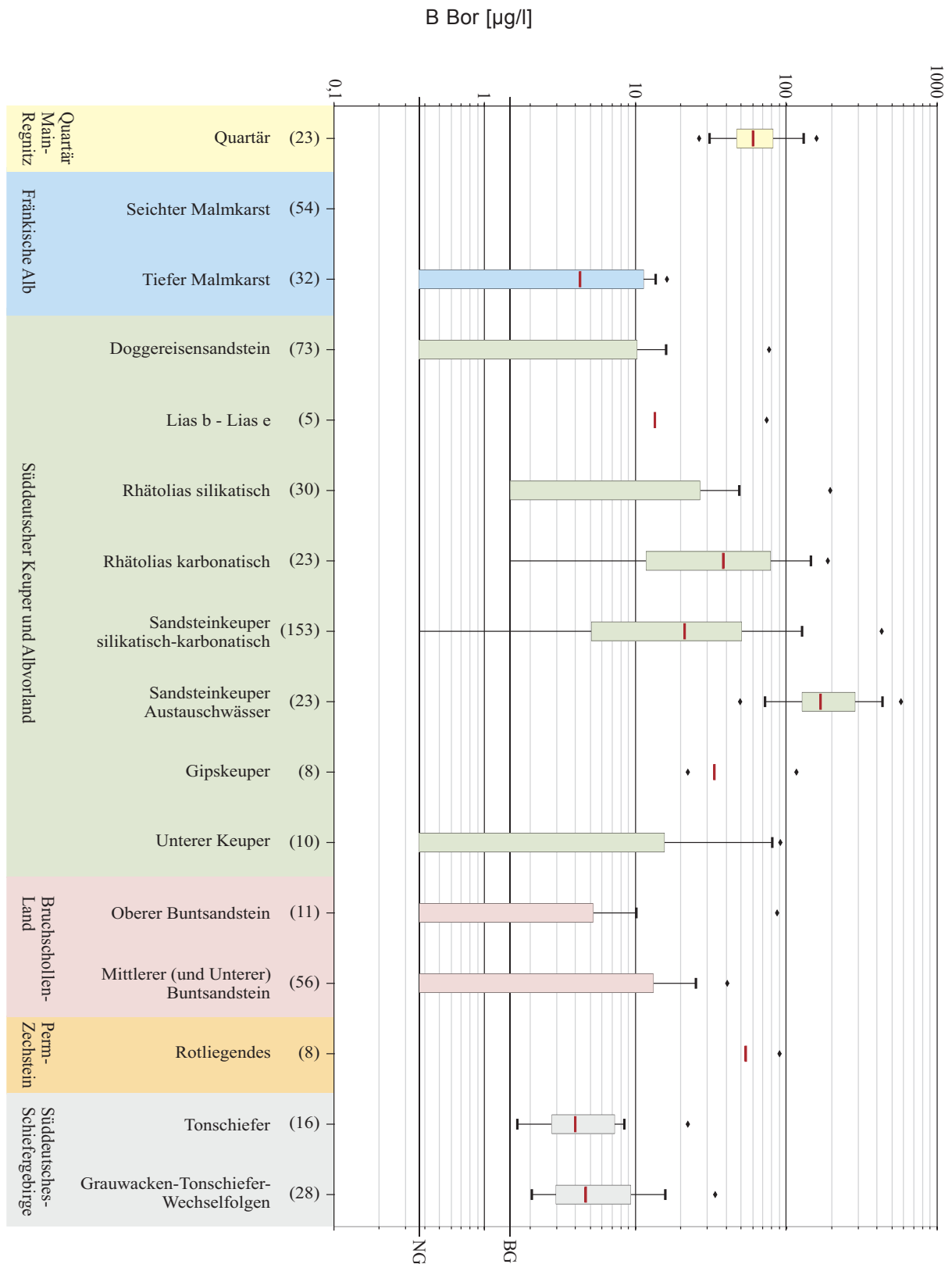
Anhang 3-23: Spannweitendiagramme der Säurekapazität bis pH 4,3 in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



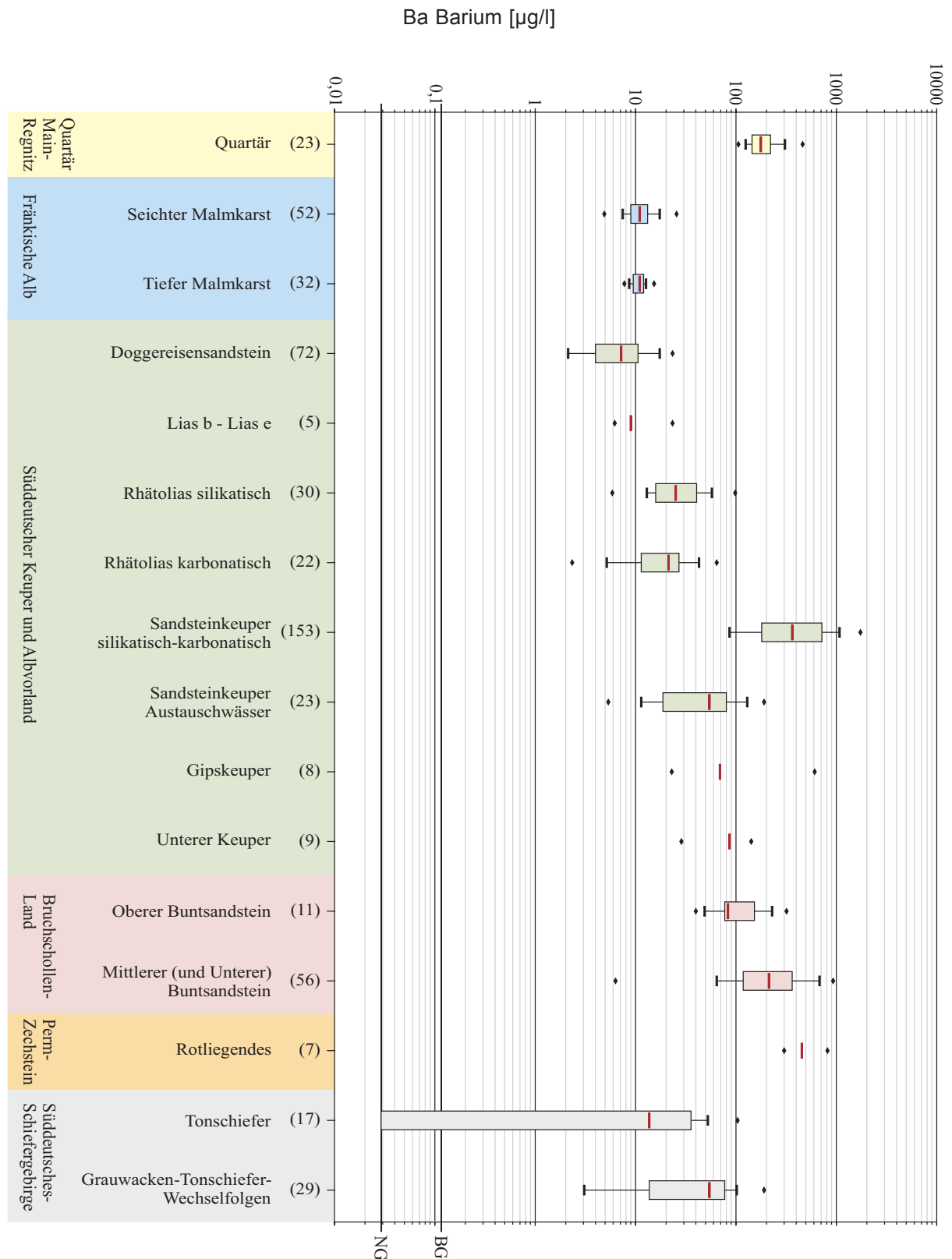
Anhang 3-24: Spannweitendiagramme der Aluminiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



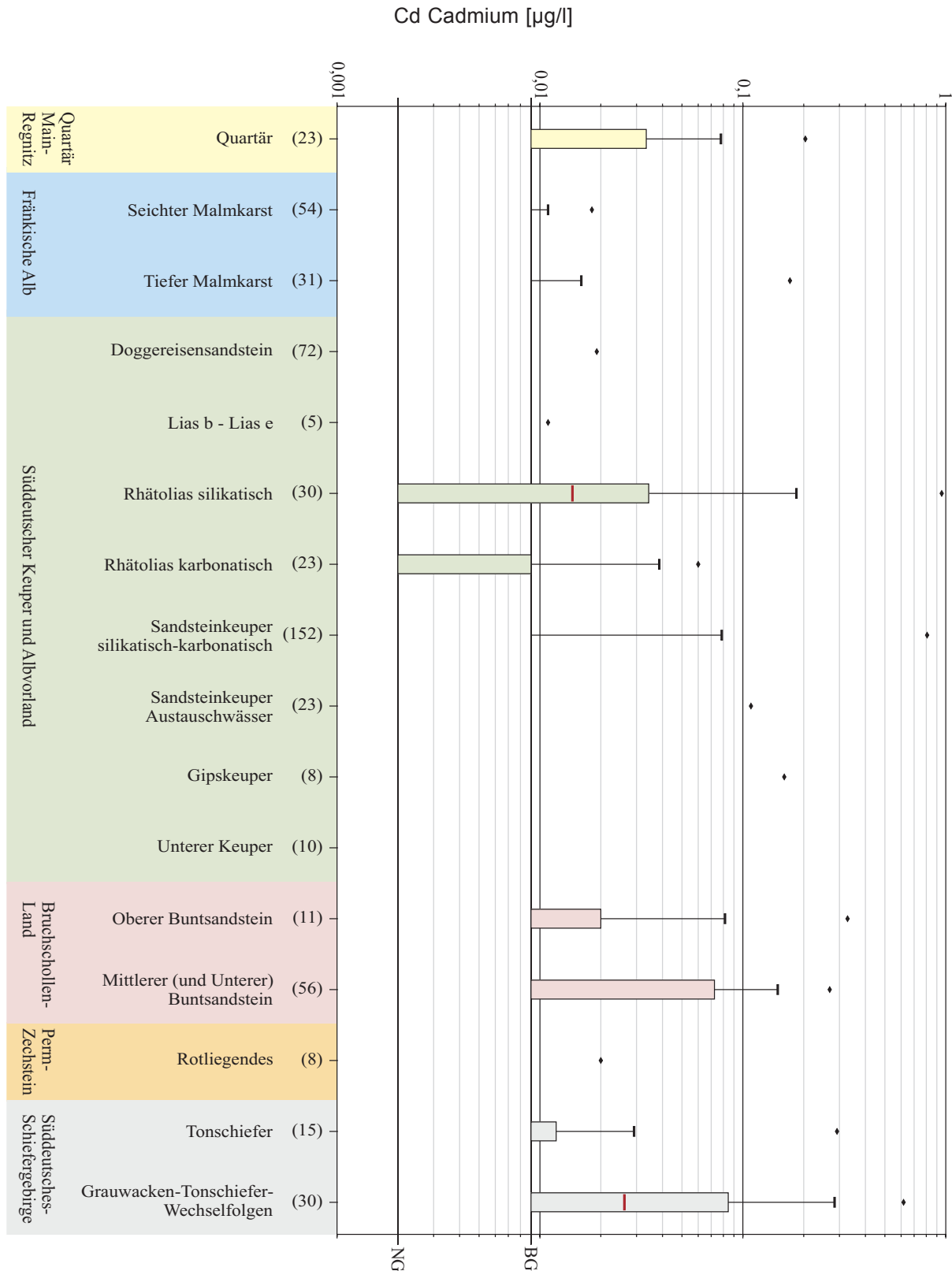
Anhang 3-25: Spannweitendiagramme der Arsenkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



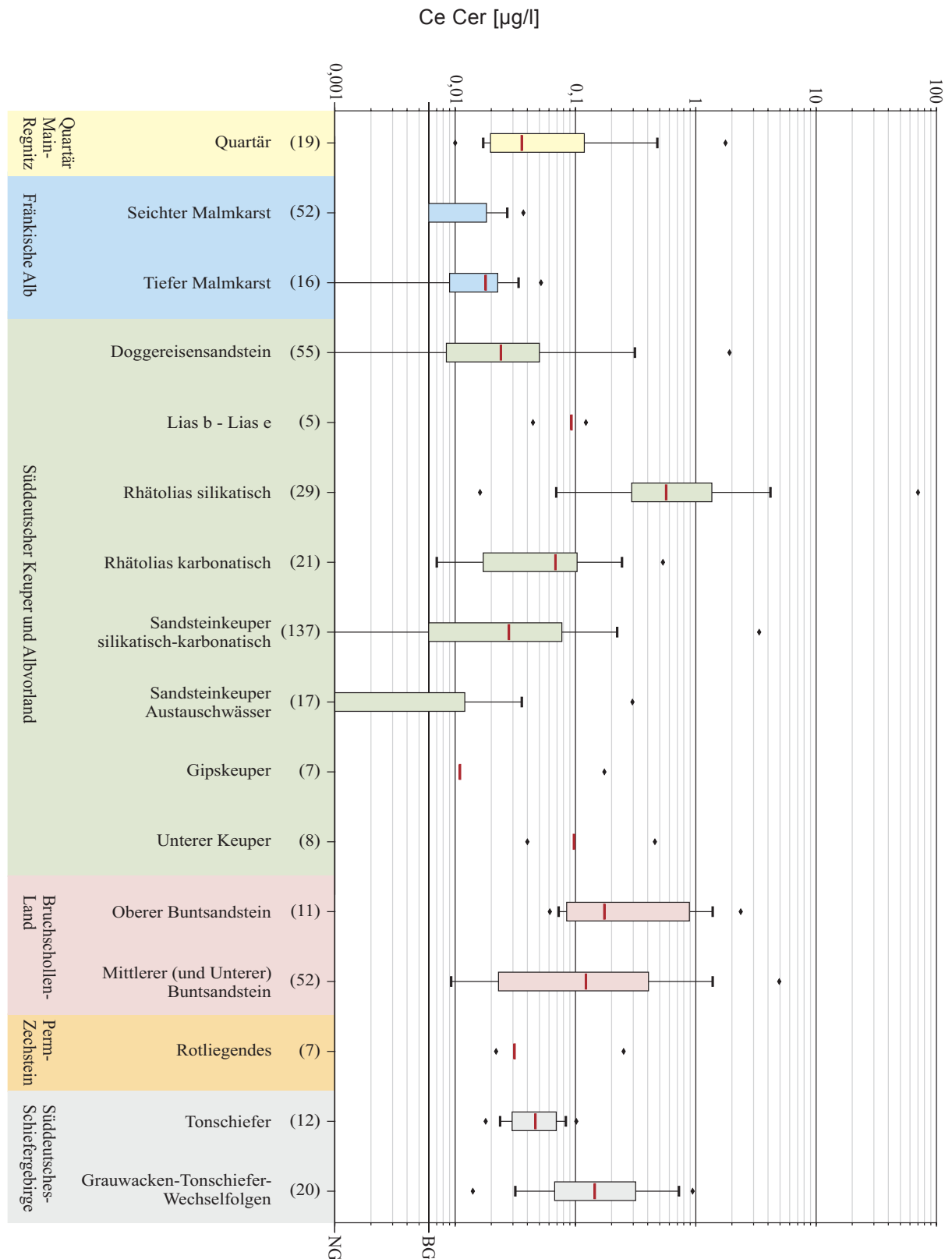
Anhang 3-26: Spannweitendiagramme der Borkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



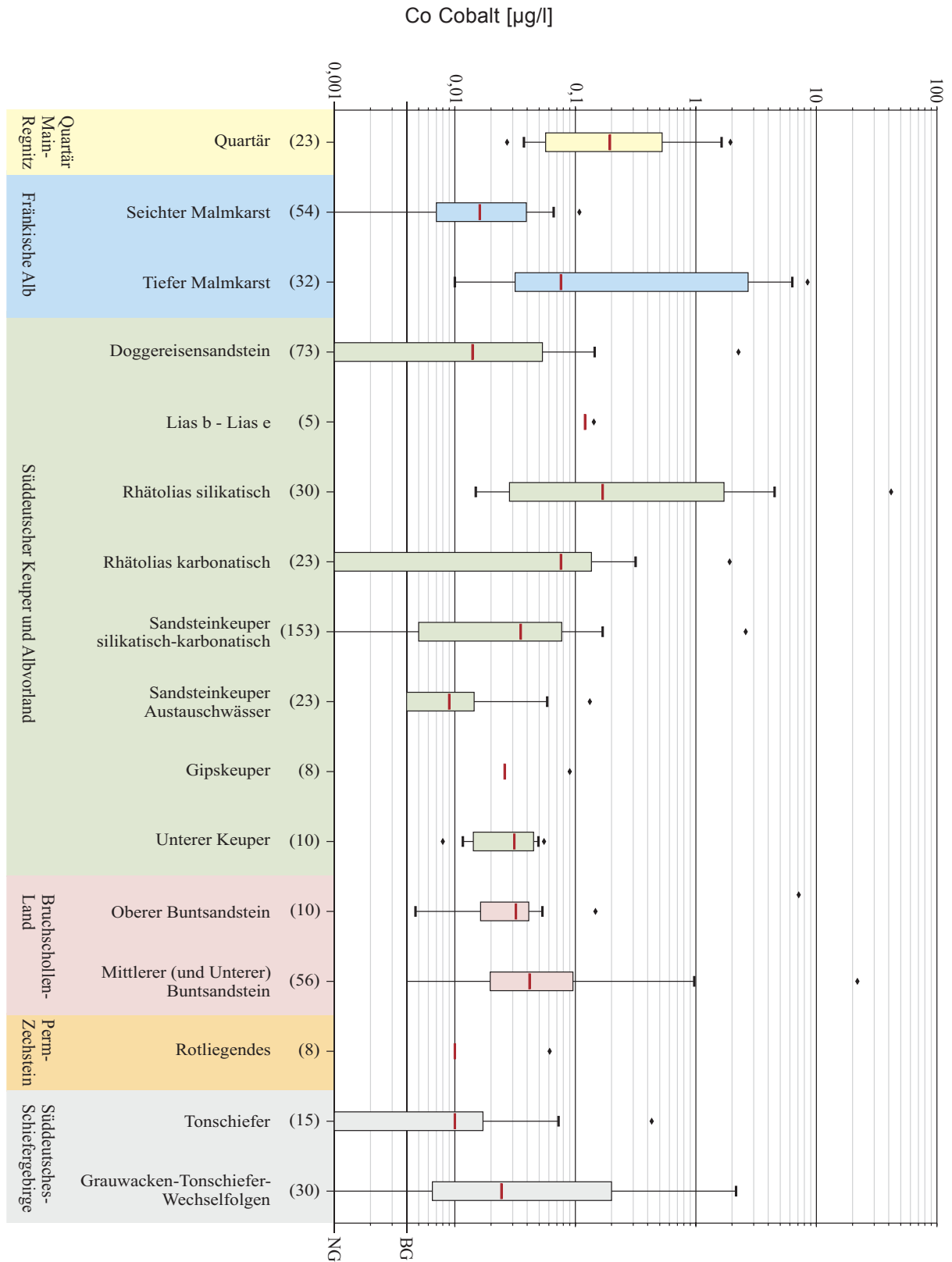
Anhang 3-27: Spannweitendiagramme der Bariumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



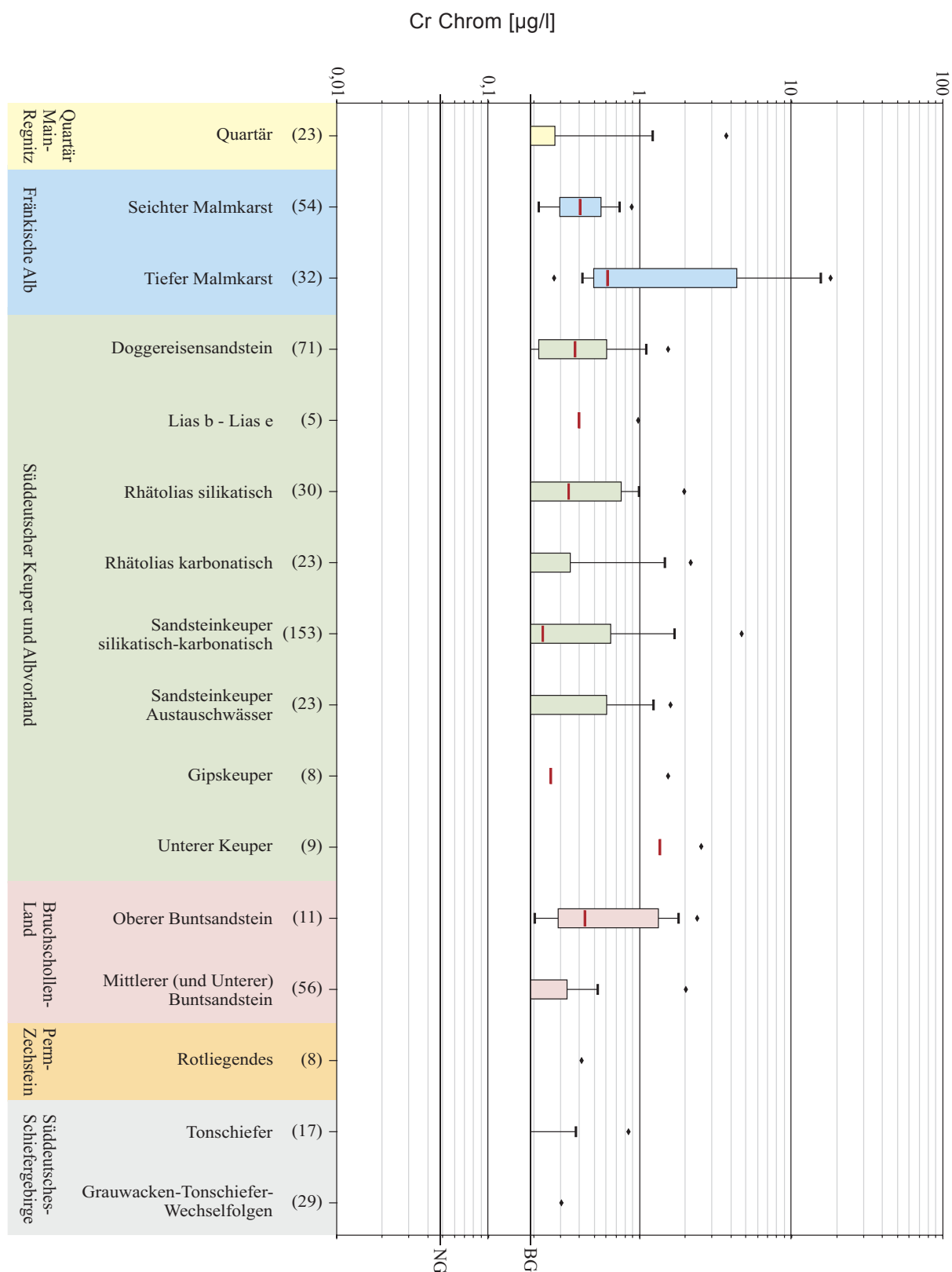
Anhang 3-28: Spannweitendiagramme der Cadmiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



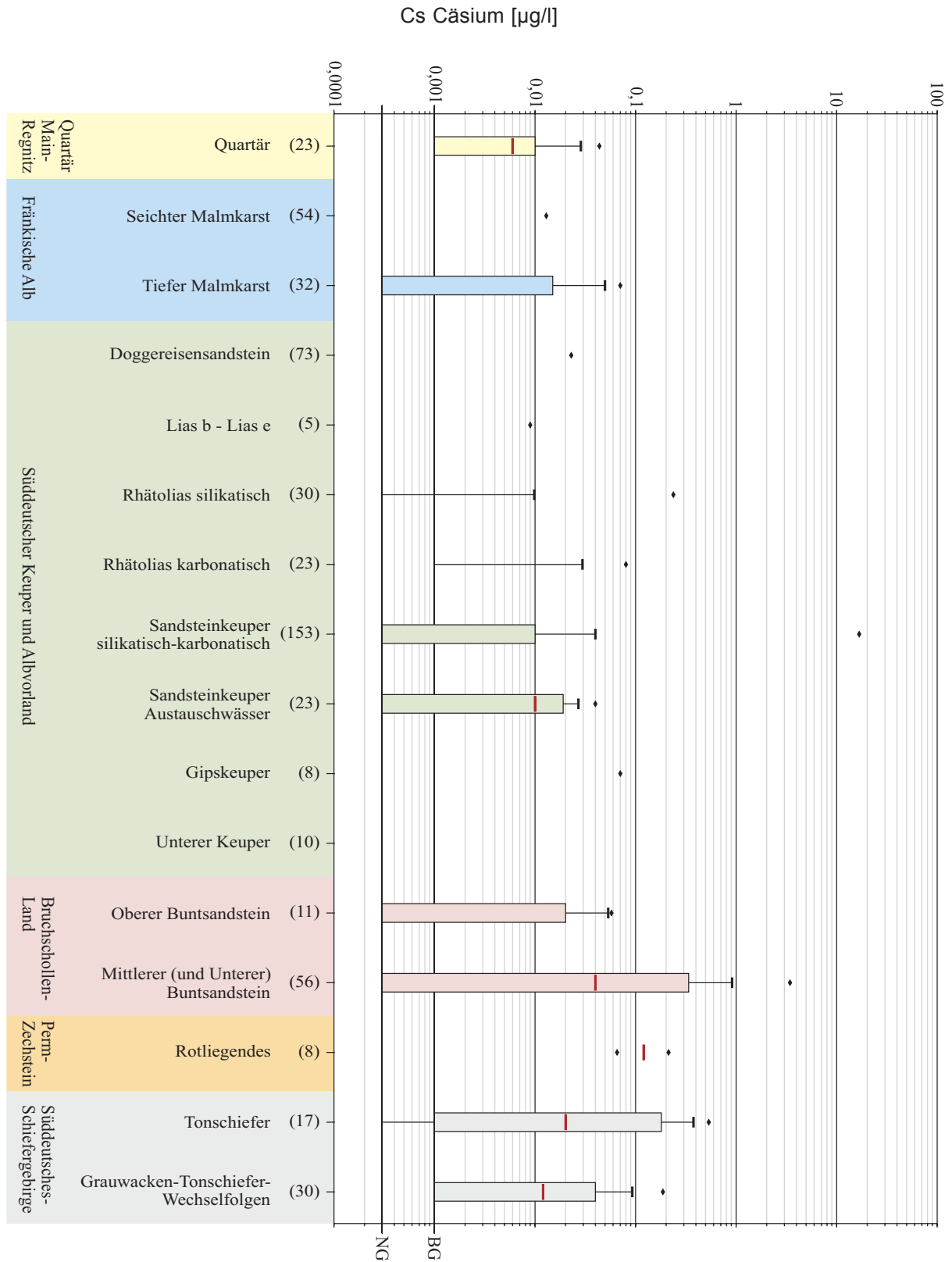
Anhang 3-29: Spannweitendiagramme der Cerkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



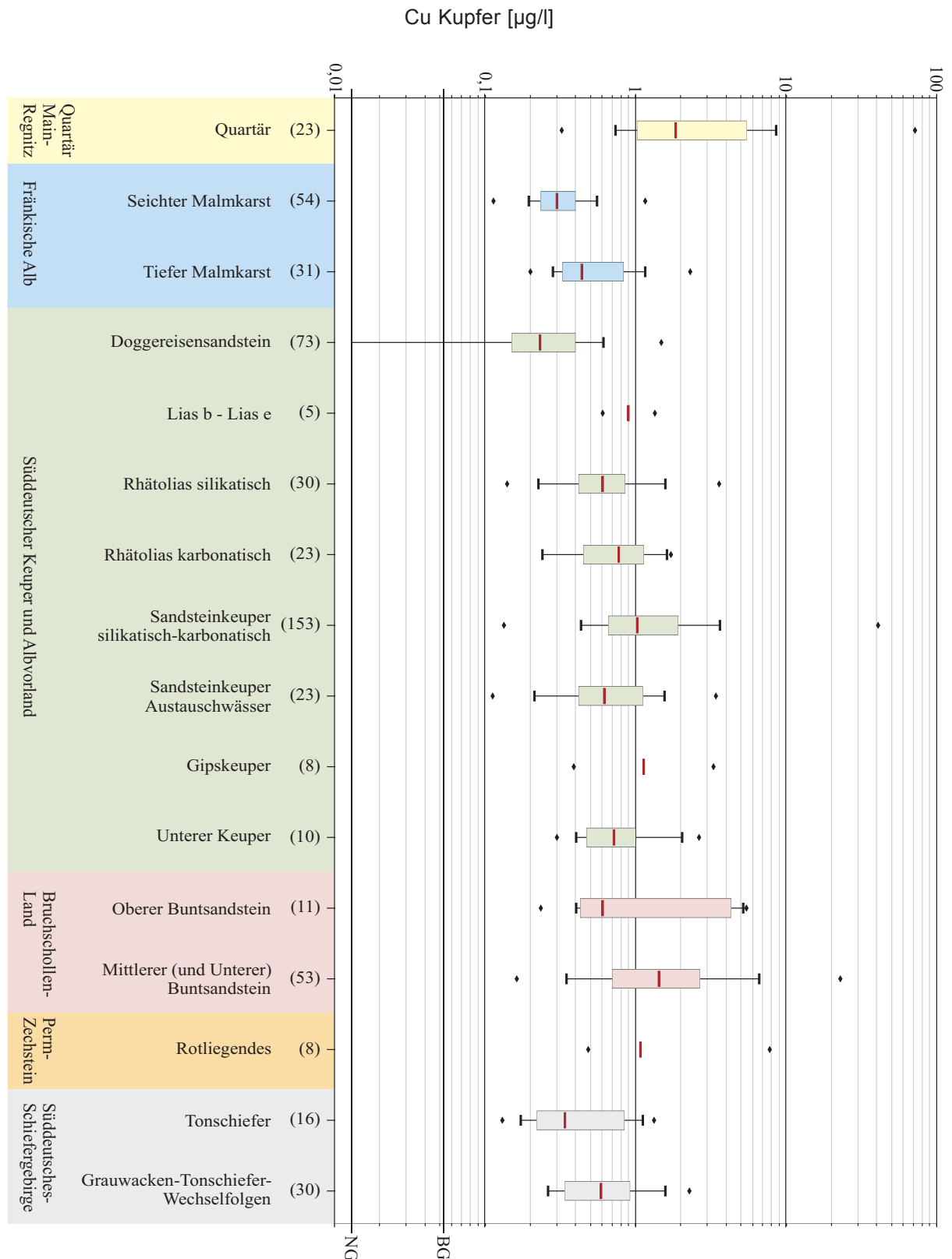
Anhang 3-30: Spannweitendiagramme der Cobaltkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



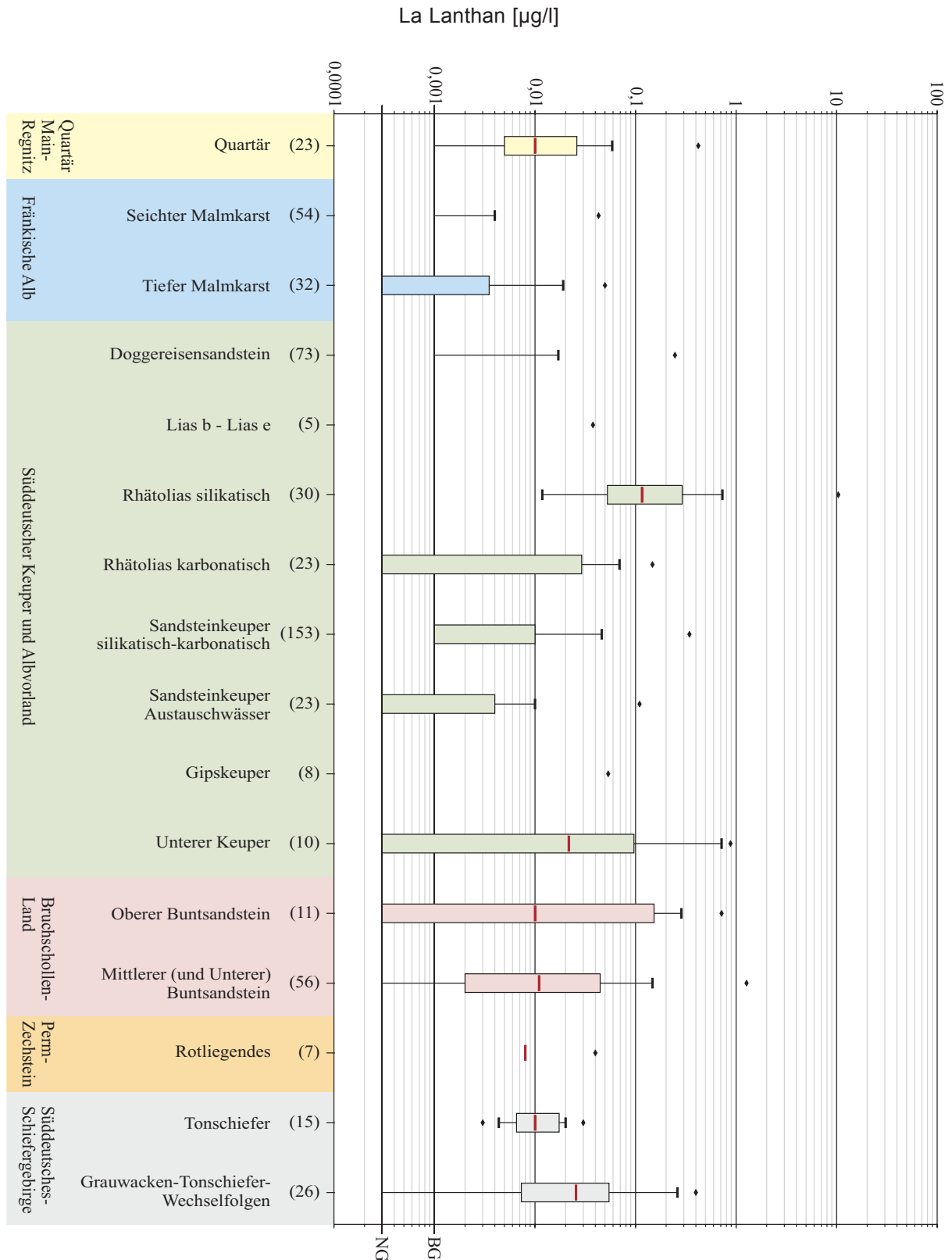
Anhang 3-31: Spannweitendiagramme der Chromkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



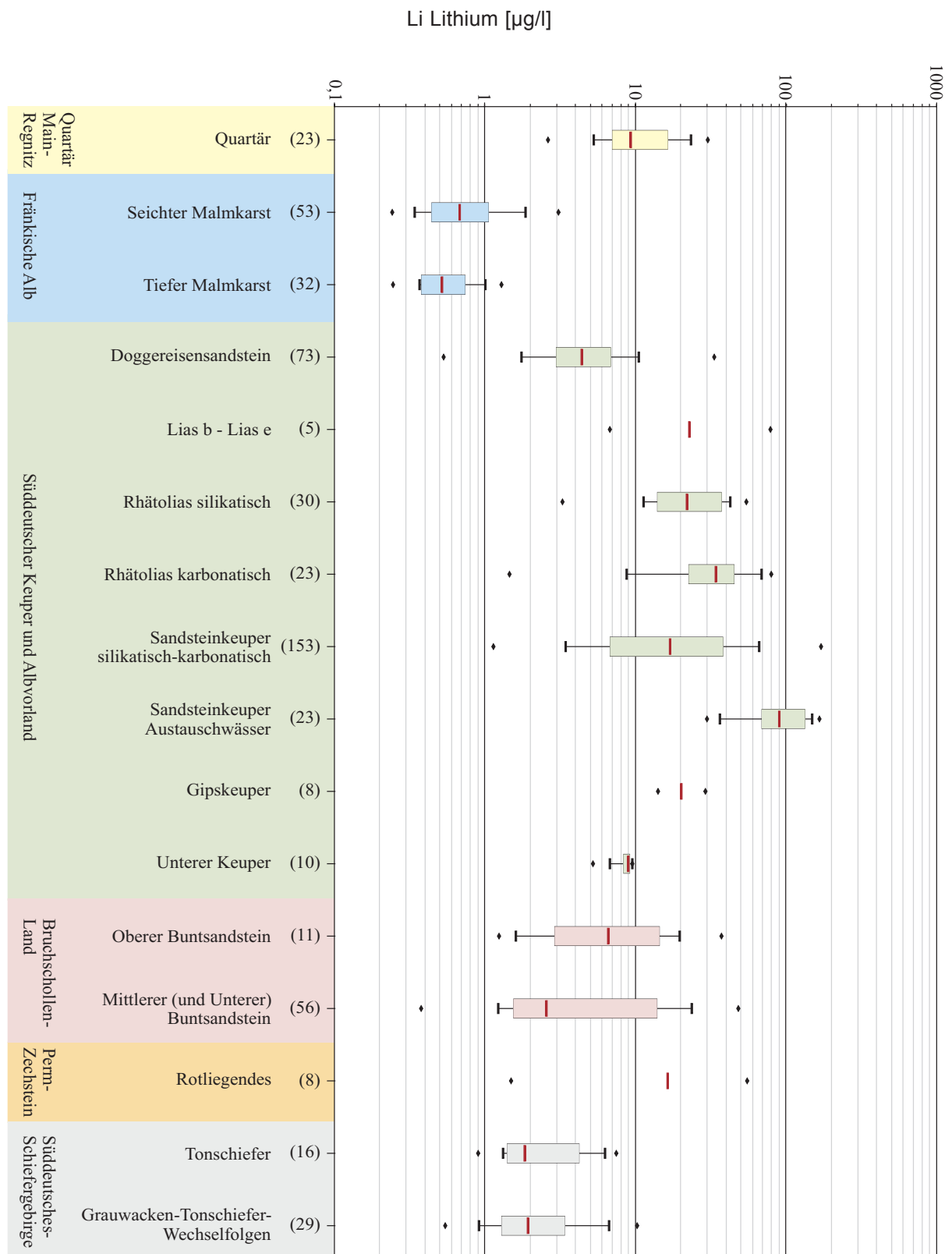
Anhang 3-32: Spannweitendiagramme der Cäsiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



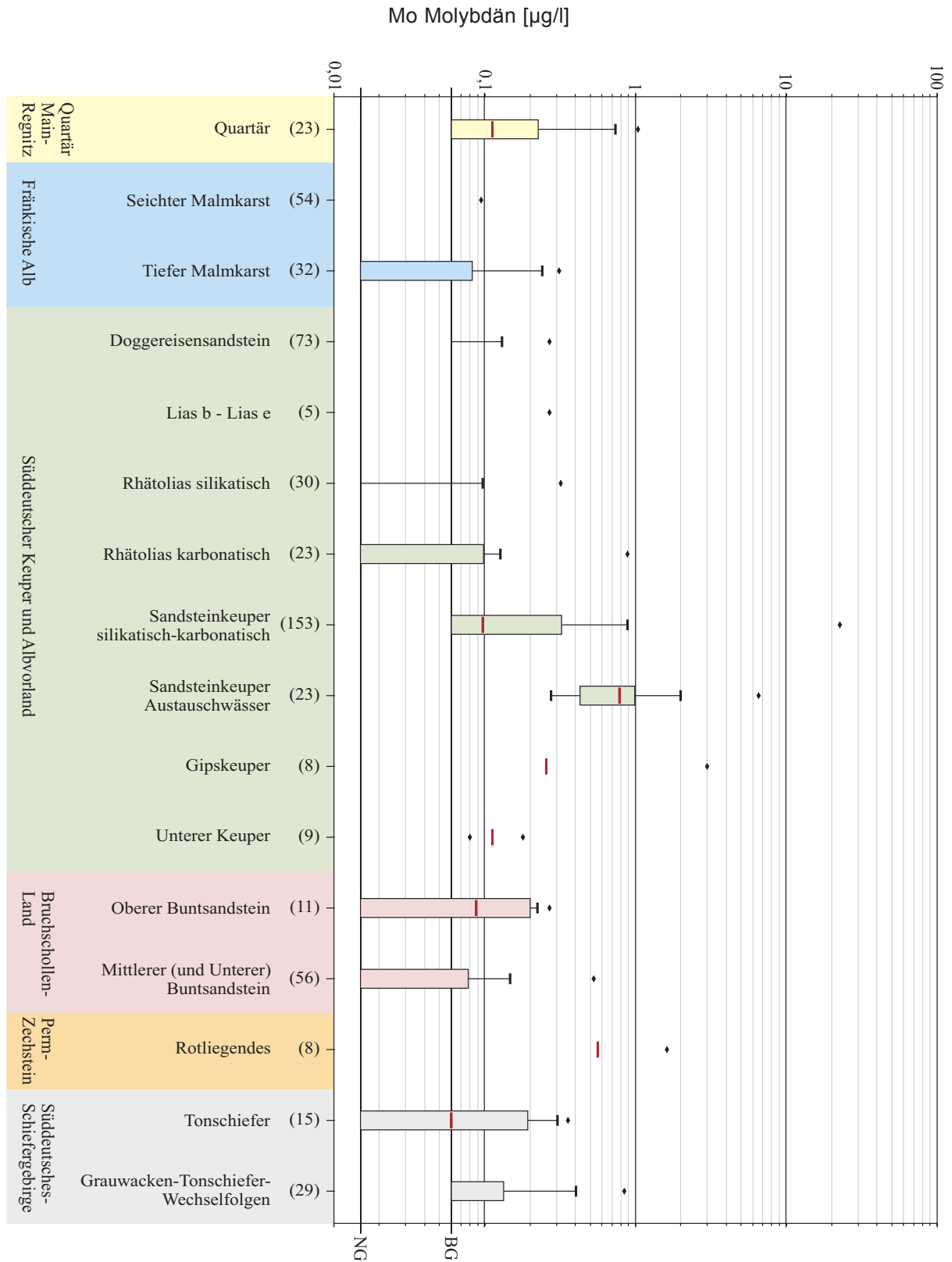
Anhang 3-33: Spannweitendiagramme der Kupferkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



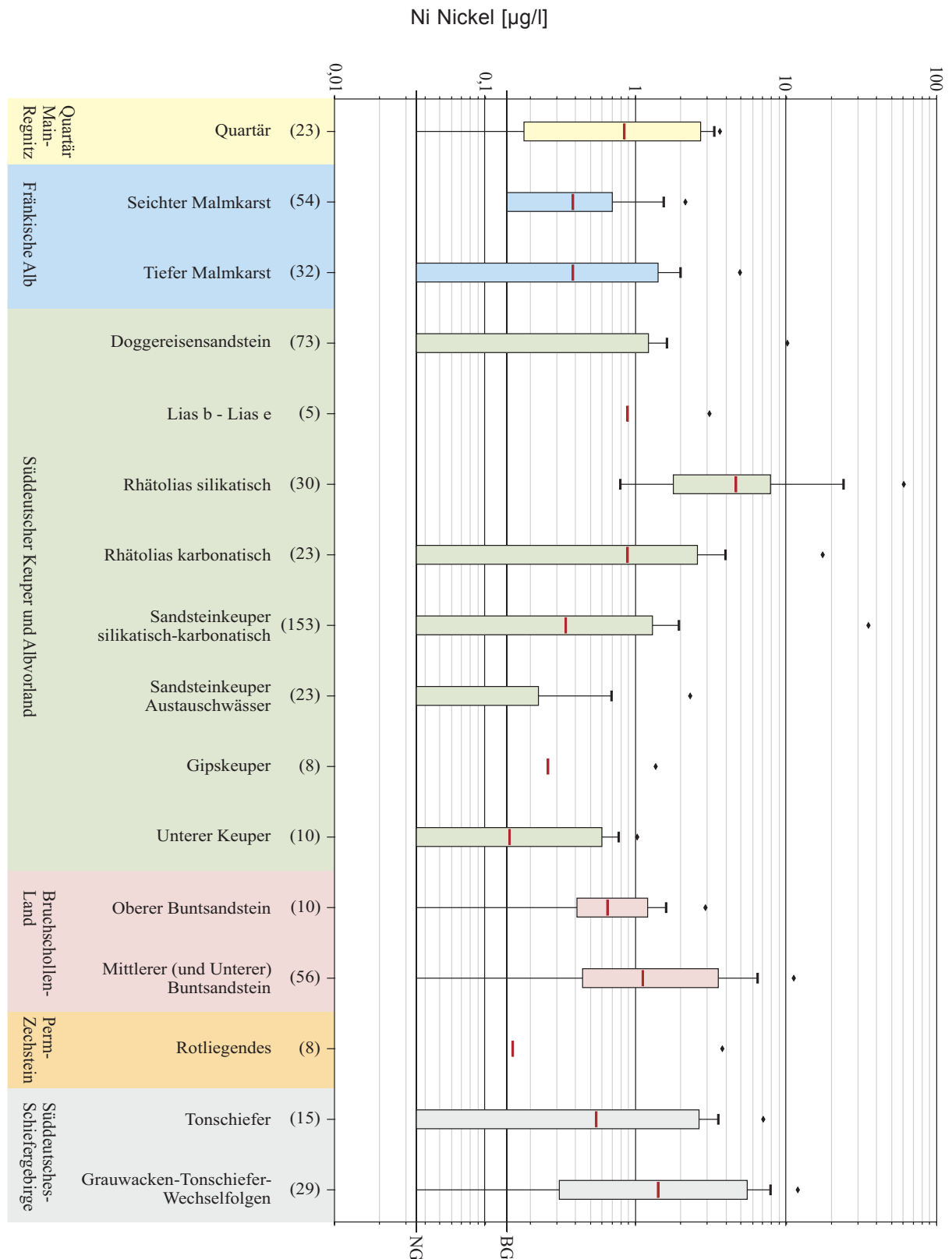
Anhang 3-34: Spannweitendiagramme der Lanthankonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



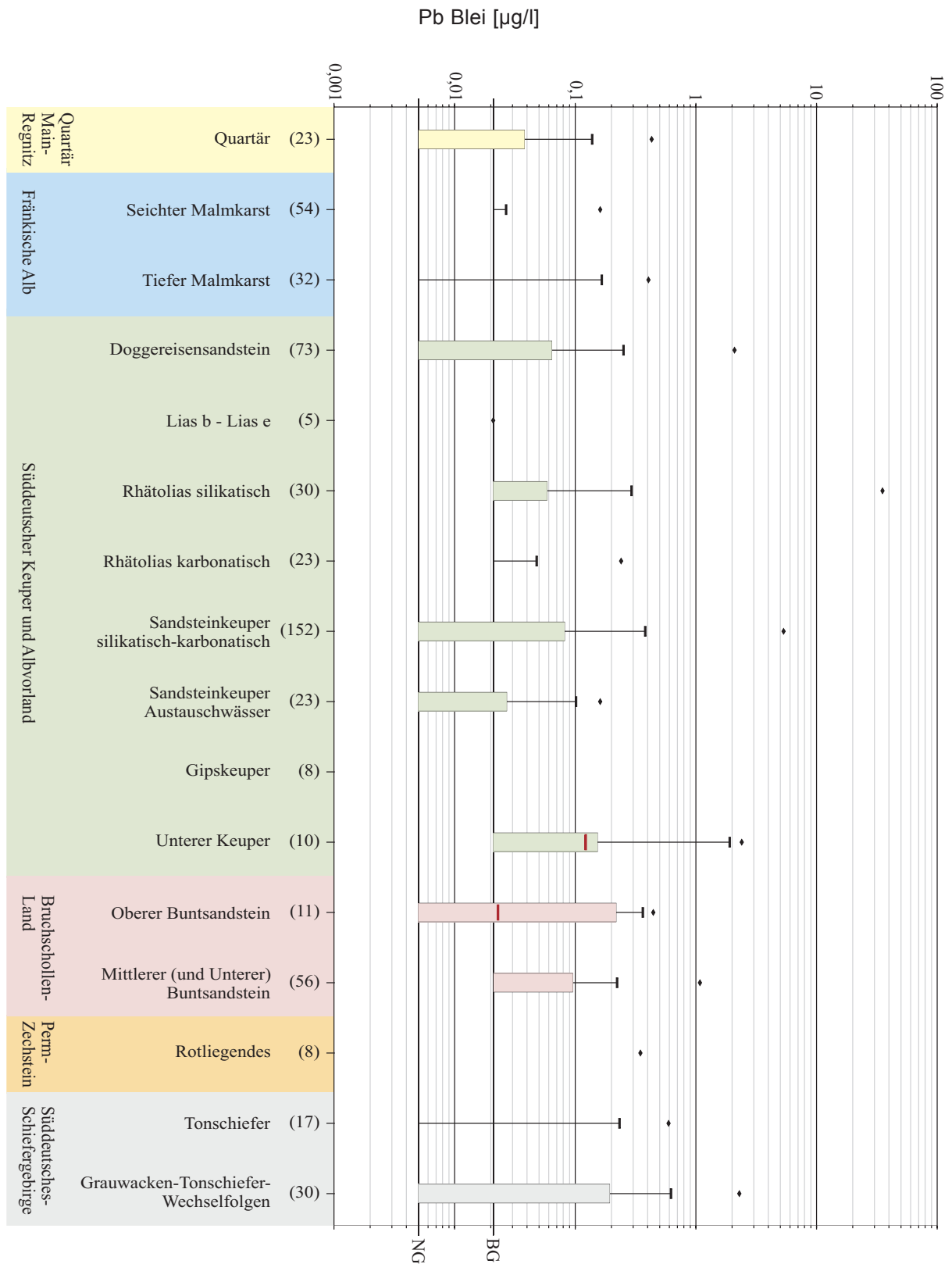
Anhang 3-35: Spannweitendiagramme der Lithiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



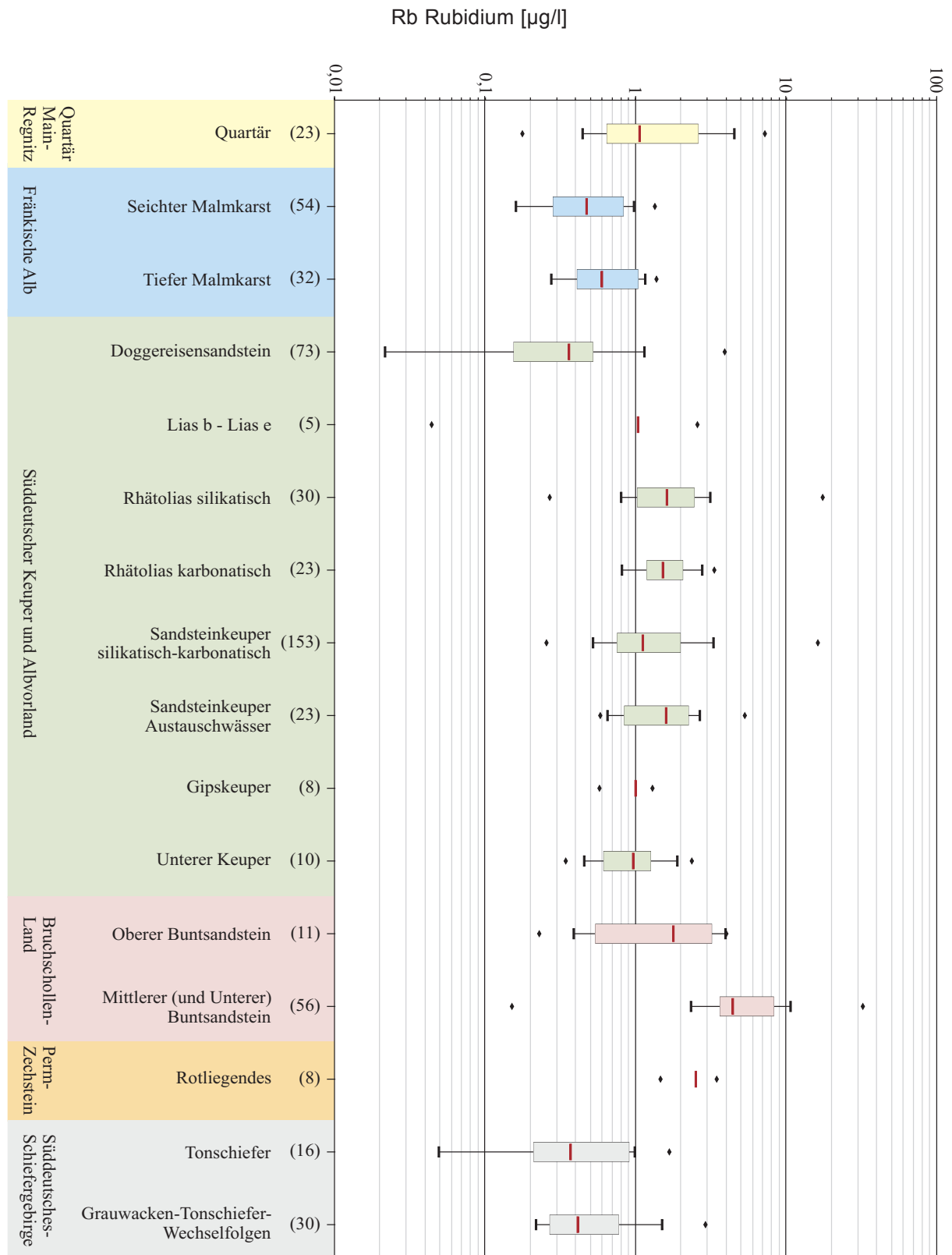
Anhang 3-36: Spannweitendiagramme der Molybdänkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



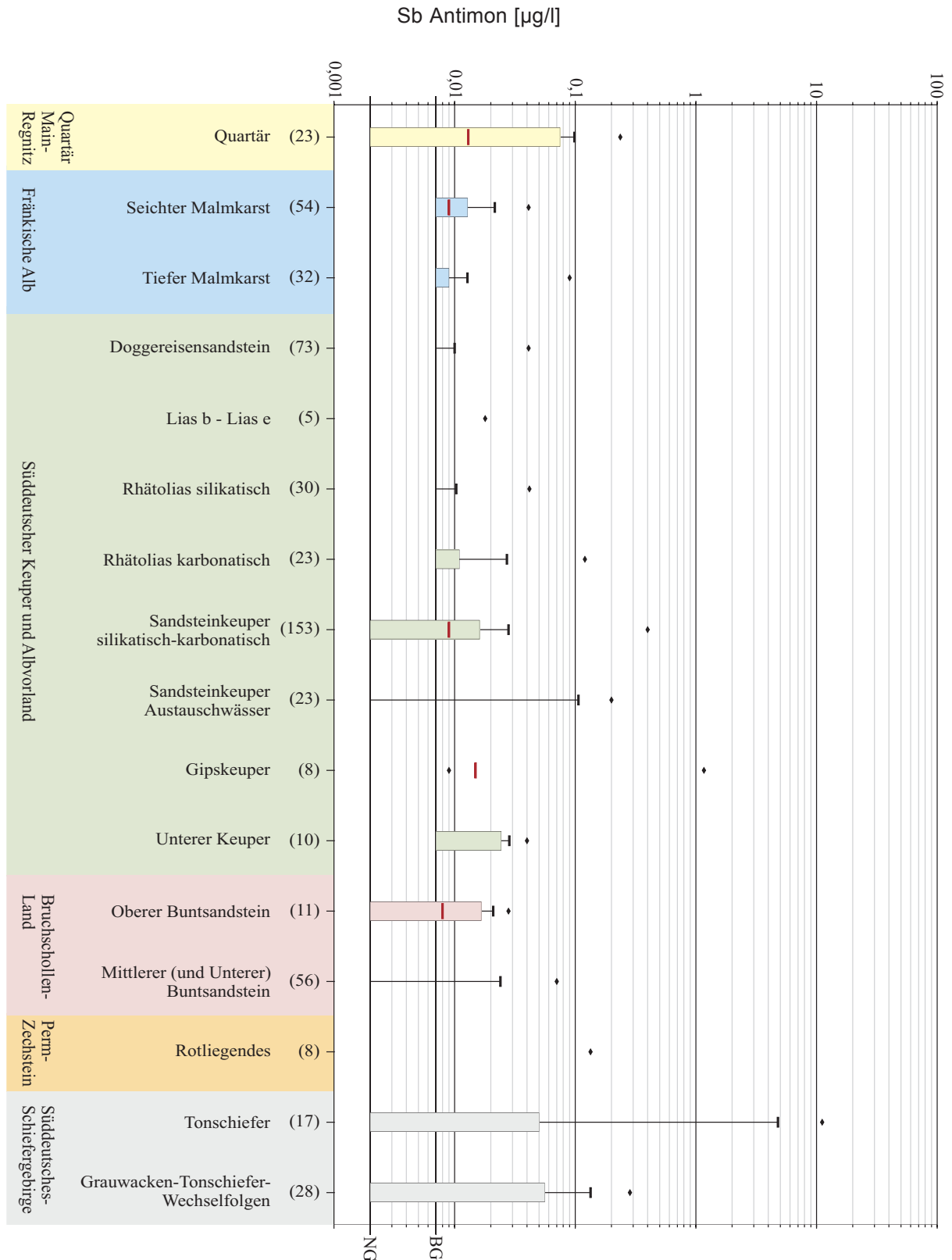
Anhang 3-37: Spannweitendiagramme der Nickelkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



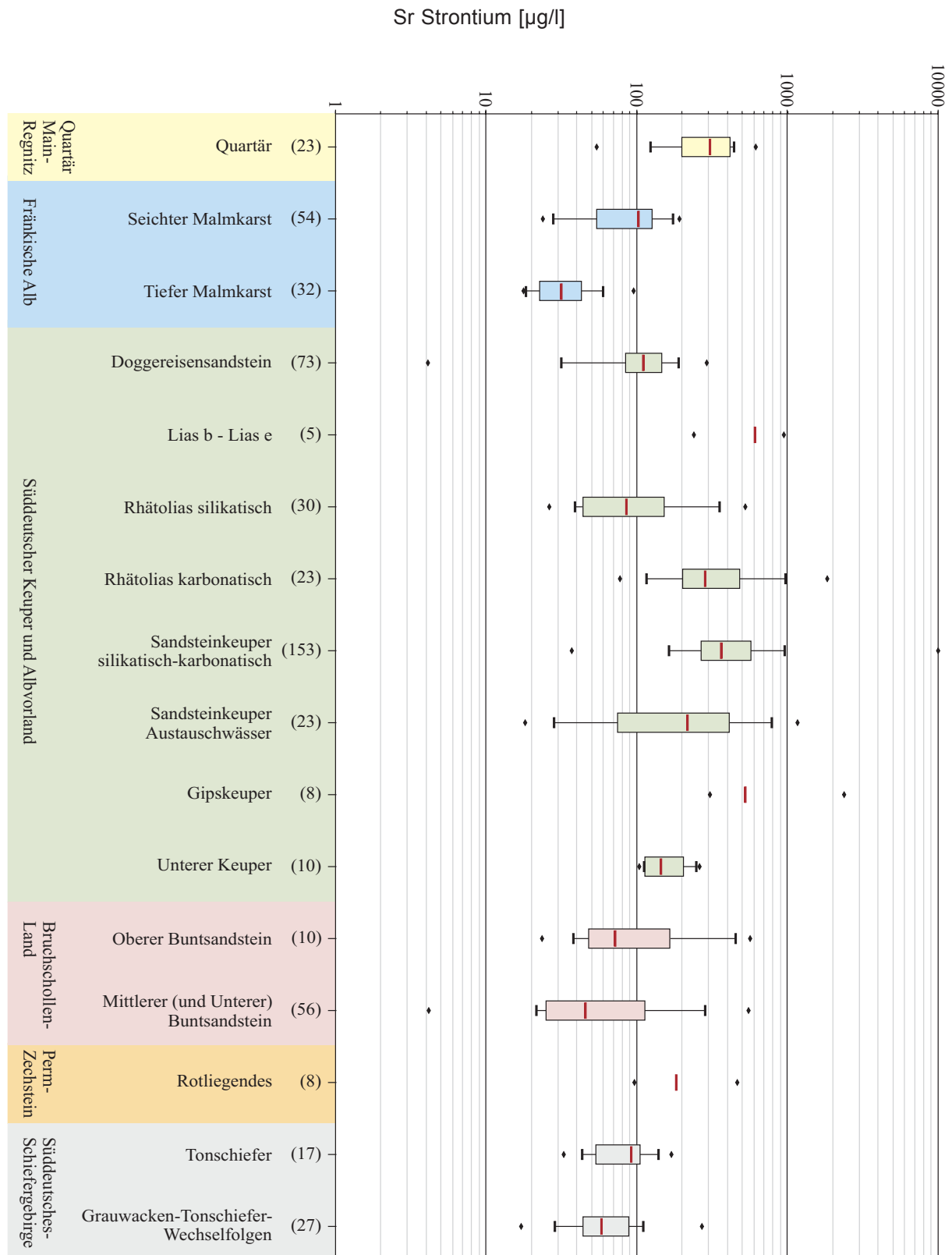
Anhang 3-38: Spannweitendiagramme der Bleikonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



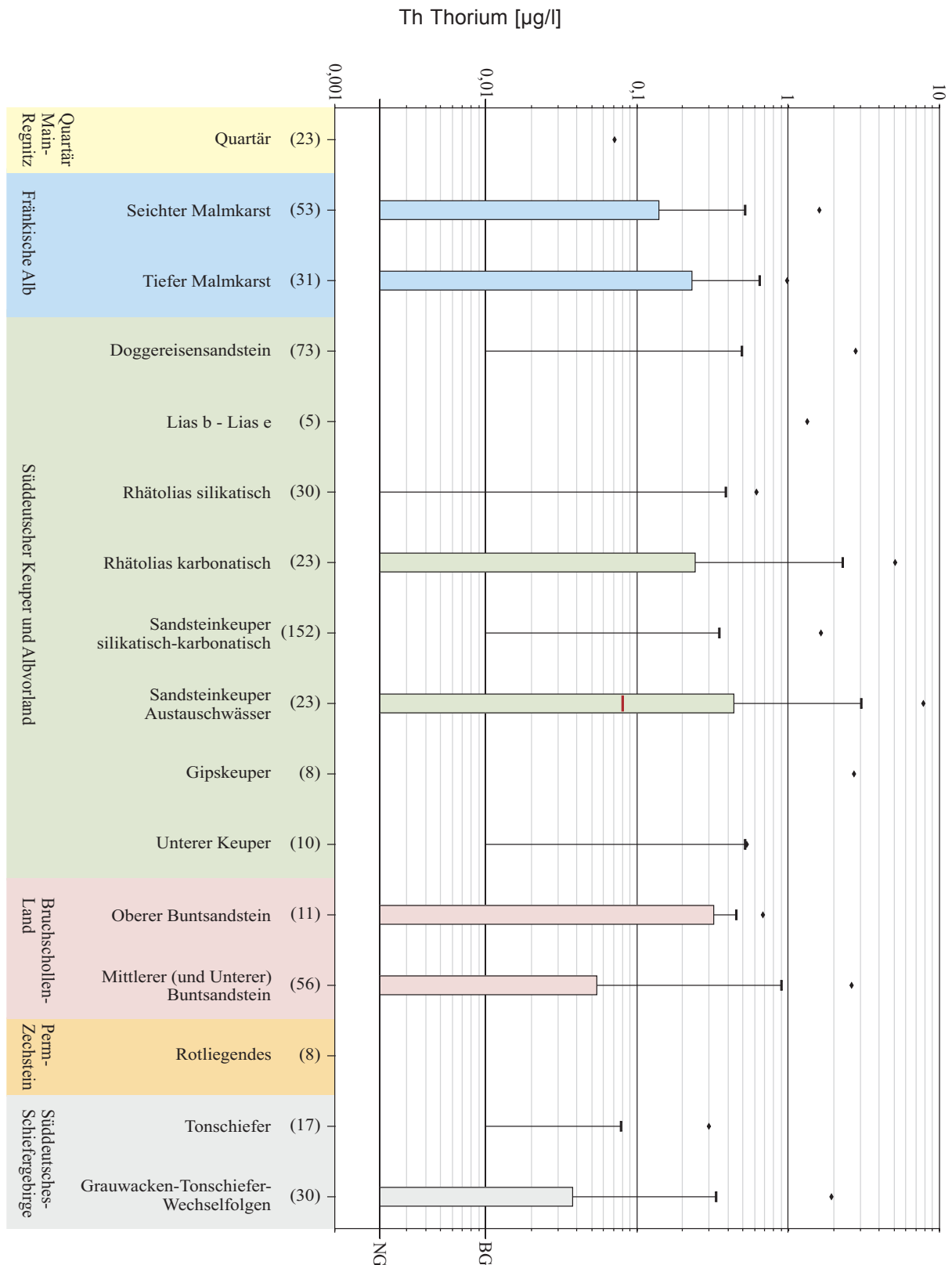
Anhang 3-39: Spannweitendiagramme der Rubidiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



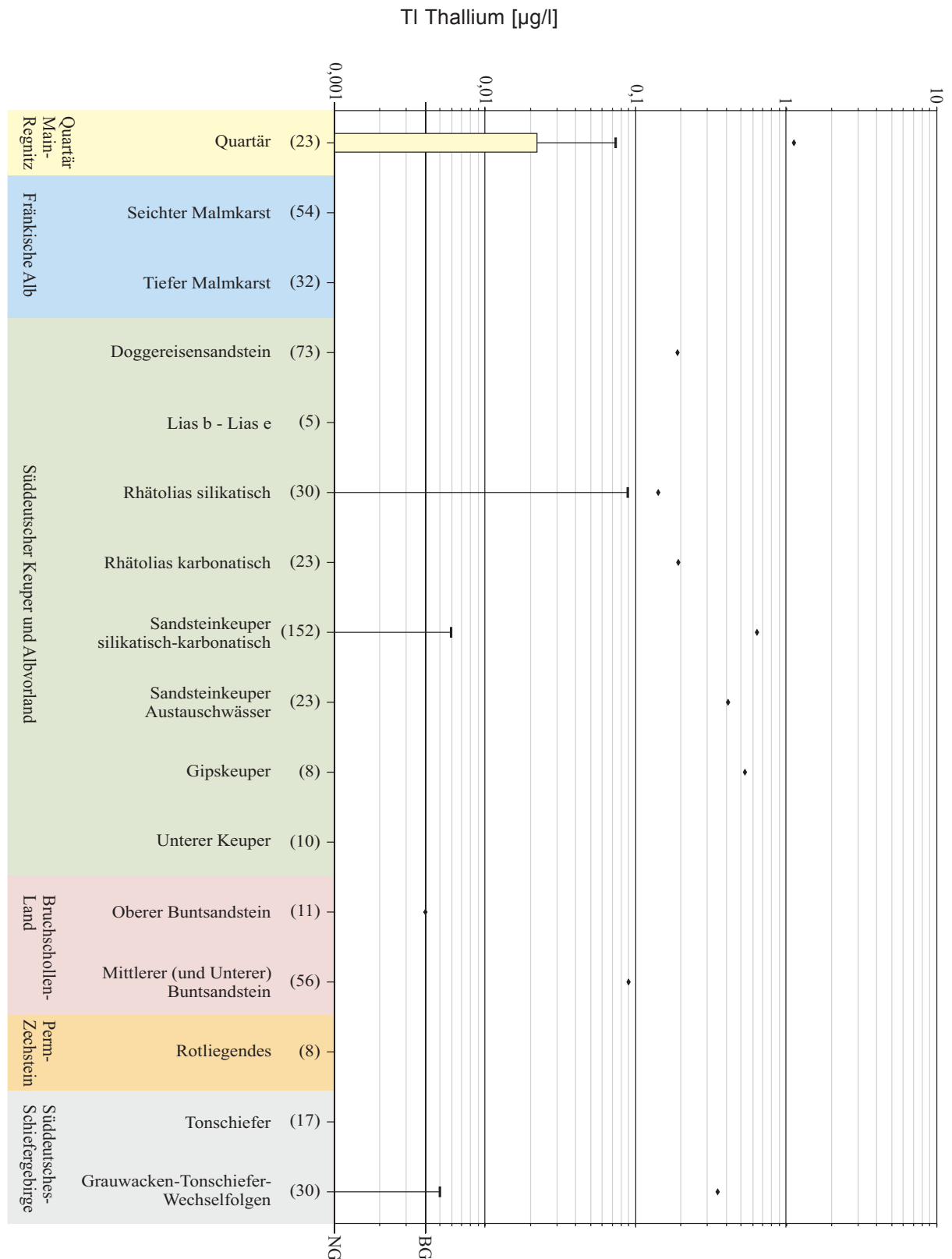
Anhang 3-40: Spannweitendiagramme der Antimonkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



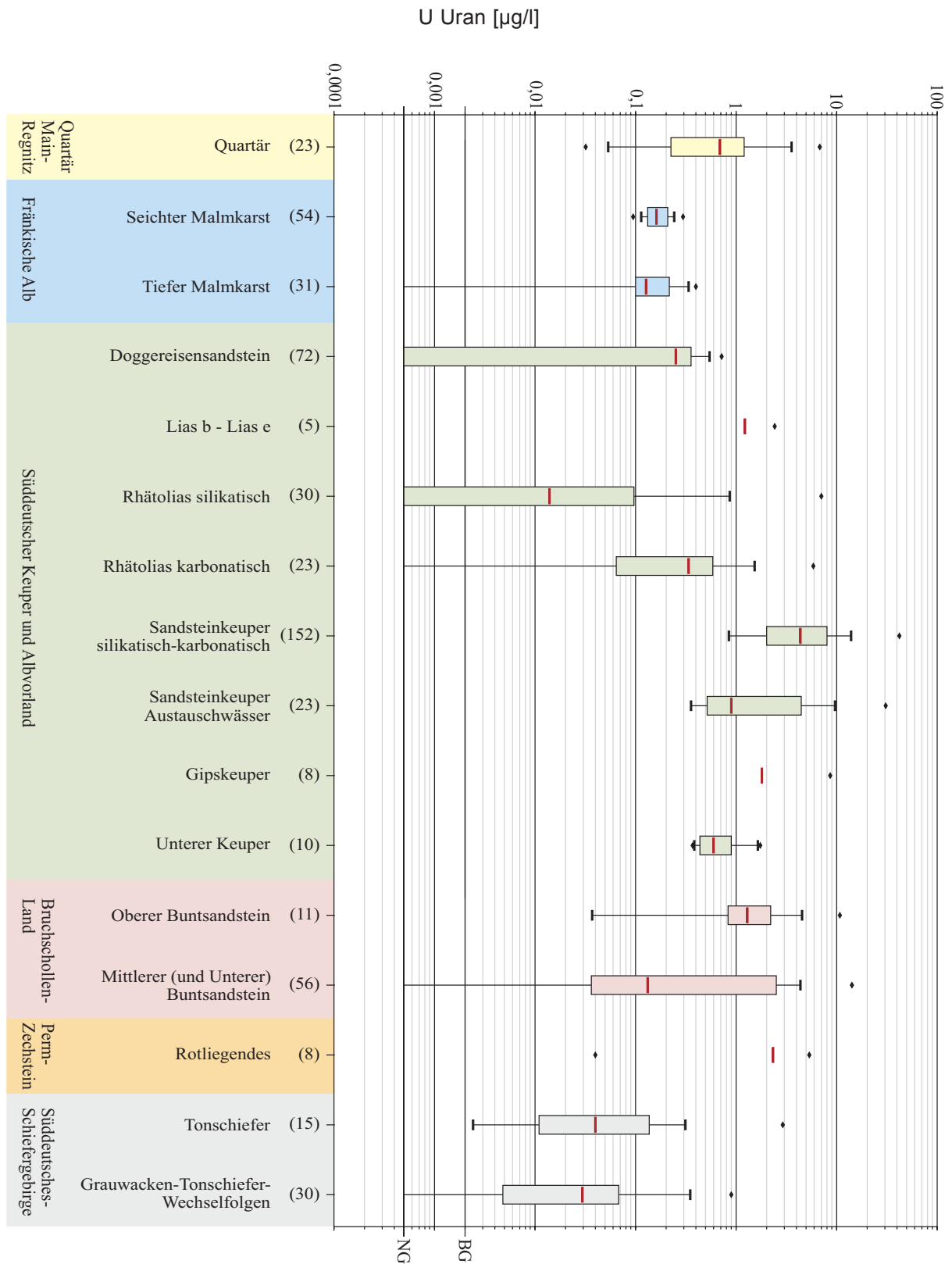
Anhang 3-41: Spannweitendiagramme der Strontiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



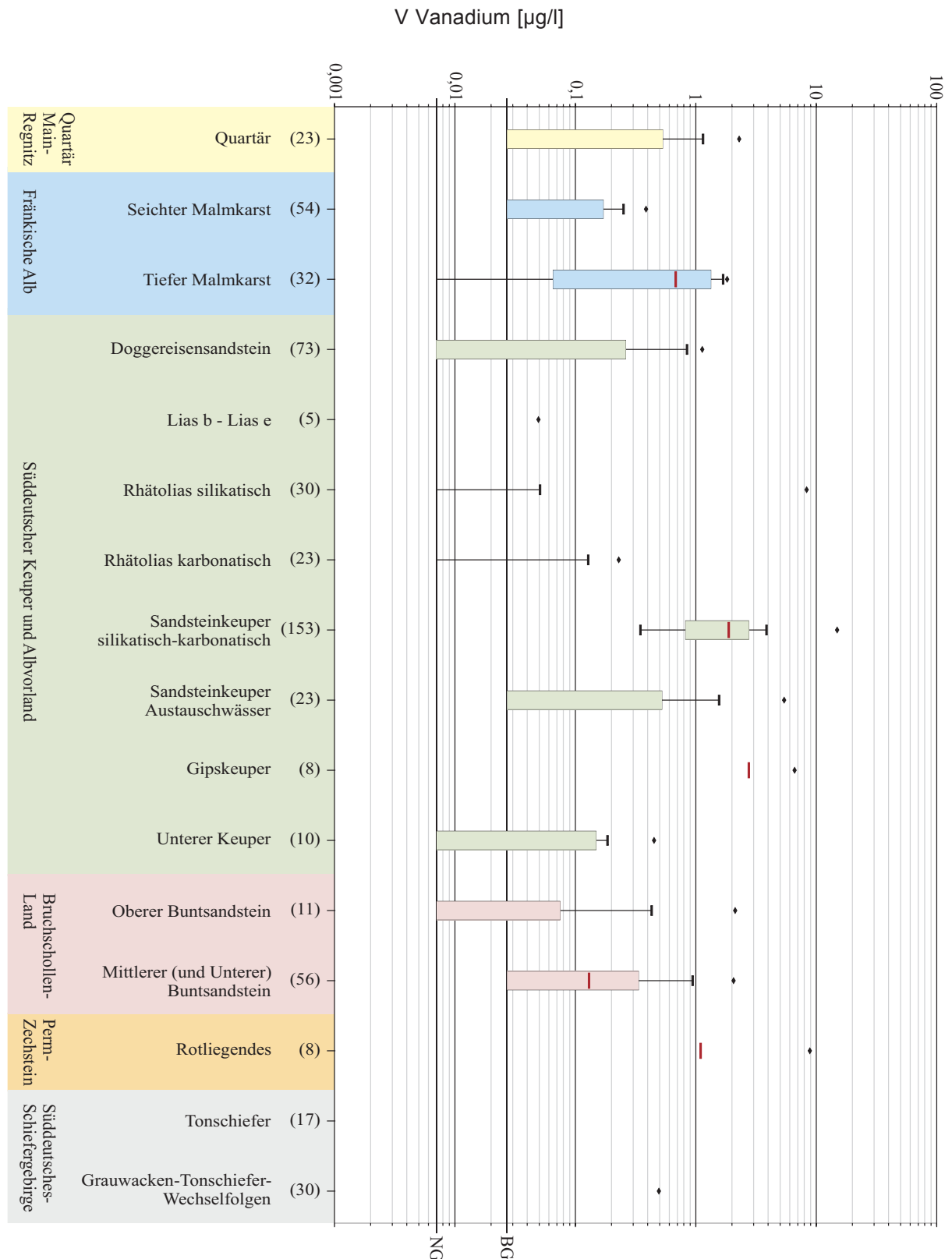
Anhang 3-42: Spannweitendiagramme der Thoriumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



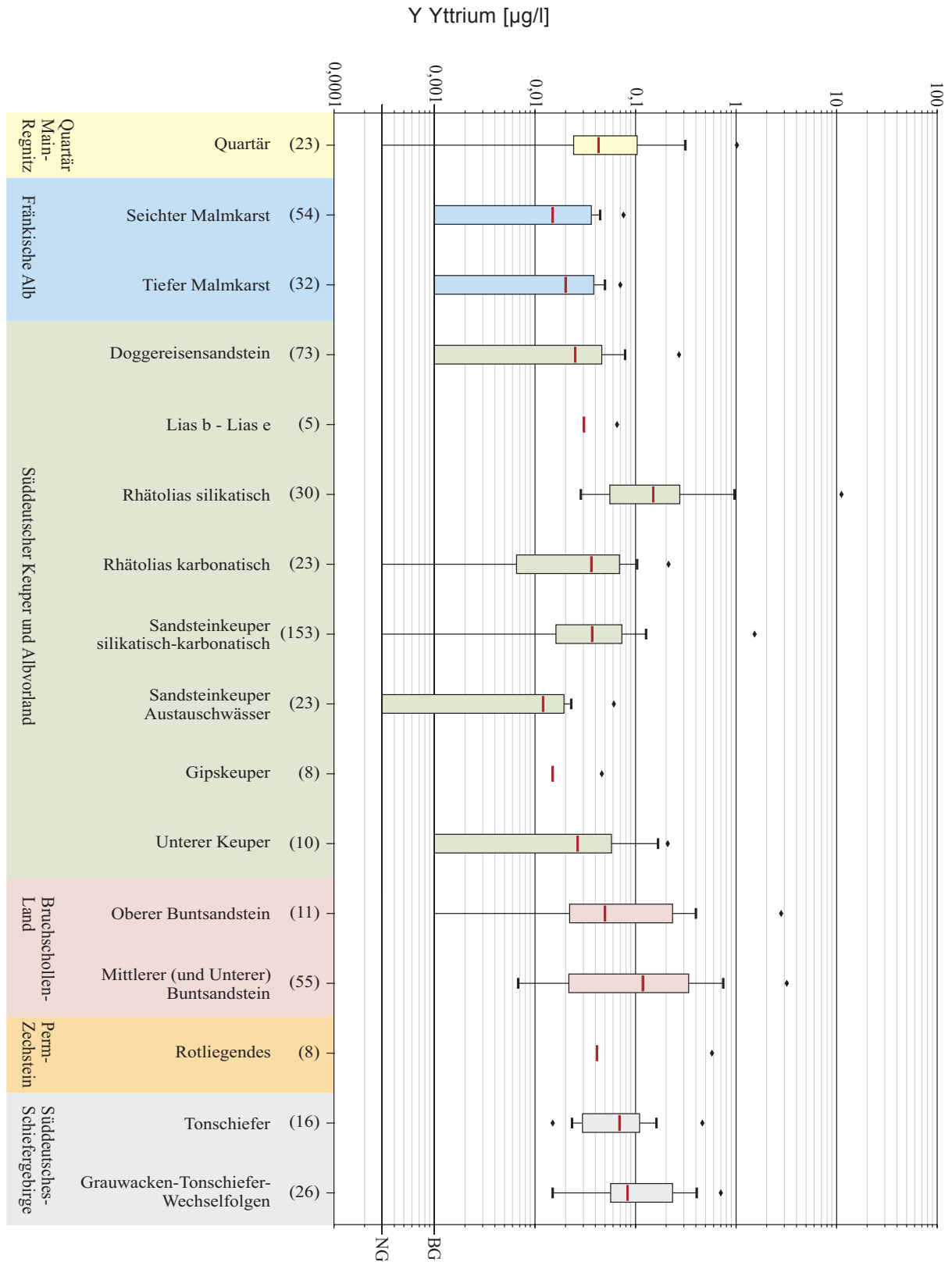
Anhang 3-43: Spannweitendiagramme der Thalliumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



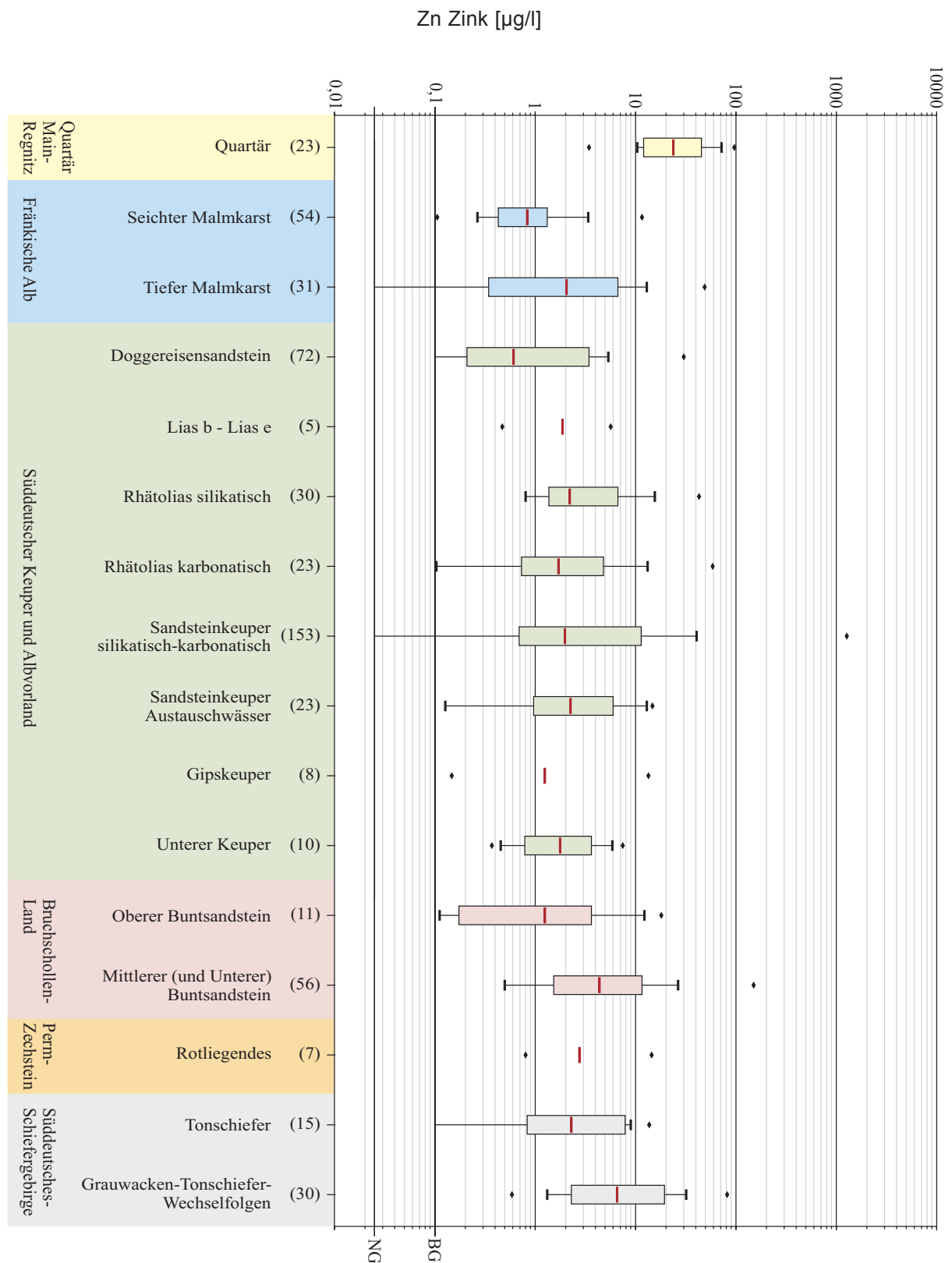
Anhang 3-44: Spannweitendiagramme der Urankonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



Anhang 3-45: Spannweitendiagramme der Vanadiumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



Anhang 3-46: Spannweitendiagramme der Yttriumkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.



Anhang 3-47: Spannweitendiagramme der Zinkkonzentration in den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten inklusive der jeweiligen Austauschwässer.

Anhang 4:

Durchlässigkeitsbeiwerte –Verzeichnis der k_f -Werte der untersuchten hydrogeologischen Einheiten in der Planungsregion 4 Oberfranken West; ermittelt aus Pumpversuchen für Einheiten mit mehr als 10 Einzeldaten.

Hydrogeologische Einheit (n = Anzahl Brunnen)	5%-Quantil [m/s]	Median [m/s]	95%-Quantil [m/s]	Mittelwert [m/s]
Paläozoikum (n = 28)	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$
Unterer und Mittlerer Buntsandstein (n = 62)	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
Gipskeuper (n = 34)	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$
Sandsteinkeuper (n = 323)	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$
Rhätolias (n = 42)	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Malm (n = 31)	$8,4 \cdot 10^{-7}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Quartär (n = 233)	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$

