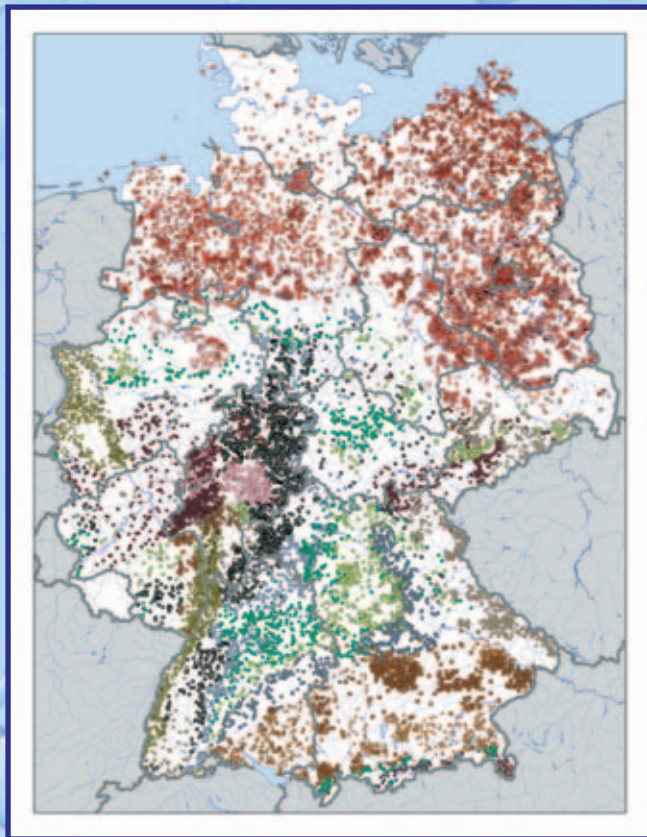


Die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasser- beschaffenheit in Deutschland

R. Kunkel, H.-J. Voigt, F. Wendland, S. Hannappel



Forschungszentrum Jülich GmbH
Programmgruppe Systemforschung und
Technologische Entwicklung

Die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasser- beschaffenheit in Deutschland

Ralf Kunkel, Frank Wendland

Forschungszentrum Jülich GmbH

Hans-Jürgen Voigt

Brandenburgisch-Technische Universität Cottbus

Stephan Hannappel

HYDOR Consult GmbH, Berlin

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben
wurde im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms
„Wasser und Boden“ der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
(LAWA) gefördert

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt/Environment

Band/Volume 47

ISSN 1433-5530

ISBN 3-89336-353-X

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten sind im Internet
über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Herausgeber und Vertrieb:	Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek D-52425 Jülich Telefon: 02461 61-5368 · Telefax: 02461 61-6103 e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de Internet: http://www.fz-juelich.de/zb
Umschlaggestaltung:	Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH
Druck:	Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH
Copyright:	Forschungszentrum Jülich 2004

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt/Environment Band/Volume 47

ISSN 1433-5530
ISBN 3-89336-353-X

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Inhaltsverzeichnis

1.	Hintergrund und Zielsetzung	1
2.	Indikatoren der Grundwasserbeschaffenheit	5
2.1.	Begriffsdefinition	7
2.2.	Grundwasserbeschaffenheitsparameter	9
2.2.1.	<i>Milieuparameter</i>	9
2.2.2.	<i>Summenparameter</i>	10
2.2.3.	<i>Hauptinhaltsstoffe</i>	11
2.2.4.	<i>Nebeninhaltsstoffe</i>	14
2.2.5.	<i>Spurenstoffe</i>	16
3.	Hydrogeologische Bezugseinheiten	21
4.	Methoden	29
4.1	Hydrochemische Präselektion	33
4.2	Trennung von beeinflusster und unbeeinflusster Komponente	35
4.2.1	<i>Natürliche Komponente</i>	37
4.2.2	<i>Beeinflusste Komponente</i>	38
4.2.3	<i>Analyse der beobachteten Konzentrationsverteilungen</i>	41
4.3	Spannbreiten der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit	45
5.	Datenbasis	47
5.1	Verwendete Primärdatenbestände der Länder	50
5.2	Datenaufbereitung	56
5.2.1	Hydrogeologische Zuordnung der Grundwassermessstellen	56
5.2.2	<i>Homogenisierung der Messgrößen</i>	57
5.2.3	<i>Plausibilitätskontrollen</i>	57
5.2.3	<i>Behandlung von Zeitreihen</i>	59
5.3	Datenbasis nach Aufbereitung	60
5.4	Räumliche Darstellung der Bezugseinheiten	64

6.	Auswertungsergebnisse für die hydrogeologischen Bezugseinheiten	65
6.1	Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes	67
6.1.2	<i>Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen unter 10 m</i>	67
6.1.2	<i>Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 10 und 25 m</i>	73
6.1.3	<i>Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 25 und 50 m</i>	79
6.2	Schotter- und Kiesablagerungen des Rheins	85
6.2.1	<i>Schotter und Kiese des Niederrheins</i>	85
6.2.2	<i>Schotter und Kiese des Oberrheins</i>	91
6.3	Schotter- und Moränenablagerungen des Alpenvorlandes	97
6.4	Tertiäre Sedimente	103
6.5	Karbonatische Festgesteinseinheiten	109
6.5.1	<i>Kalksteine des Oberen Jura</i>	109
6.5.2	<i>Kalksteinfohlen des Muschelkalk</i>	115
6.5.3	<i>Kalksteine des alpinen Raumes</i>	121
6.5.4	<i>Paläozoische Kalksteine</i>	127
6.5.5	<i>Karbonatische Wechselfolgen</i>	133
6.6	Silikatische Festgesteinseinheiten	139
6.6.1	<i>Sandsteine und silikatische Wechselfolgen</i>	139
6.6.2	<i>Sandsteinfohlen des Buntsandstein</i>	145
6.6.3	<i>Paläozoische Sedimentgesteine</i>	151
6.6.4	<i>Vulkanite</i>	157
6.6.5	<i>Saure Magmatite und Metamorphite</i>	163
7.	Die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit	169
7.1	Methodische Vorgehensweise	171
7.2	Ubiquitäre Überprägung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit	175
7.3	Bandbreiten der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit	177

7.4	Diskussion der Ergebnisse	181
7.5	Grenzen der Anwendbarkeit	185
8.	Zusammenfassung	189
9.	Ausblick	195
10.	Literaturverzeichnis	199

Durch die Wasserrahmenrichtlinie (EG 2000) sind die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union aufgefordert, den guten mengenmäßigen und chemischen Zustand des Grundwassers europaweit zu sichern oder wiederherzustellen. In einem ersten Schritt („*Erstbeschreibung*“) mussten durch die Mitgliedstaaten, in der Bundesrepublik Deutschland sind hierfür die Bundesländer zuständig, unter anderem Grundwasserkörper definiert und hinsichtlich ihrer Gefährdung durch anthropogene Stoffeinträge charakterisiert werden. Für die gefährdeten Grundwasserkörper ist es in einem nächsten Schritt („*weitergehende Beschreibung*“) erforderlich, die chemische Zusammensetzung des Grundwassers, einschließlich der Beiträge aus menschlichen Tätigkeiten, zu quantifizieren und mit Kriterien für den „guten Zustand“ zu vergleichen. Auf dieser Basis müssen Maßnahmenprogramme entwickelt werden, die den guten Zustand des Grundwassers erhalten bzw. wiederherstellen sollen.

Eine quantitative Definition des guten chemischen Zustands blieb die Wasserrahmenrichtlinie bislang weitgehend schuldig. Im europäischen Rahmen war es, mit Ausnahme von Nitrat und Pflanzenschutzmitteln, bisher nicht möglich, sich auf Grenzwerte für die Unterscheidung zwischen einer guten und schlechten Beschaffenheit des Grundwassers zu einigen. Diesen Mangel soll die Grundwasser-Tochterrichtlinie beheben, die gegenwärtig von der Kommission erarbeitet wird. Obwohl die deutsche Position, eine zusätzliche Grundwasserqualitätsklasse „high status“ (natürliche, anthropogen weitgehend unbeeinflusste Beschaffenheit) einzuführen, nicht durchzusetzen war, so bestand jedoch weitgehend Konsens darüber, dass die natürliche Beschaffenheit des Grundwassers eine wichtige Grundlage für die Definition des „guten chemischen Zustandes“ sein sollte (vgl. RECHENBERG ET AL. 2000).

Eine allgemein anwendbare Methodik, die natürlichen Hintergrundwerte von den durch menschliche Aktivitäten verursachten Stoffkonzentrationen abzugrenzen, war bisher nicht verfügbar. Ebenso fehlte eine Zuordnung natürlicher Hintergrundwerte zu Typologien von Grundwasserkörpern, zu denen die einzelnen Grundwasserkörper bei der Festlegung der natürlichen Hintergrundwerte aus pragmatischen Gründen zusammengefasst werden können. Eine Aufgabe des Vorhabens war es deswegen, eine Methode zu entwickeln, mit der die stoffspezifischen natürlichen von den anthropogen bedingten Stoffgehalten des Grundwassers abgetrennt werden können. Durch den Bezug auf bundesweit definierte hydrogeologische Einheiten soll es dann möglich sein, auf eine aufwändige Differenzierung der natürlichen und anthropogenen Stoffgehalte für jeden einzelnen Grundwasserkörper verzichten zu können.

Zur Ermittlung charakteristischer stoffspezifischer Bandbreiten wurde von den Autoren im Auftrag der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) im Laufe des Jahres

2002 das Forschungsprojekt „*Die natürliche Grundwasserbeschaffenheit ausgewählter hydrostratigrafischer Einheiten Deutschlands*“ (KUNKEL ET AL. 2002) durchgeführt. Dieses Forschungsvorhaben hat wichtige, wissenschaftlich begründete Informationen über die Abgrenzung der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit von der (deutlich) anthropogenen bzw. durch geogene Anomalien beeinflussten Grundwasserbeschaffenheit geliefert. Der Schwerpunkt des im Jahr 2002 bearbeiteten Projektes lag in der Entwicklung einer länderübergreifend anwendbaren, wissenschaftlich begründeten Methodik zur Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit. Die Methodik wurde beispielhaft auf die saalezeitlichen Ablagerungen des nord- und mitteldeutschen Lockergesteins (NL2) die mesozoischen Karbonatgesteine und die Sandsteinfolgen des Buntsandstein angewendet.

Mit der hier dokumentierten Vorgehensweise sollten die Hintergrundwerte für alle anderen, bisher nicht bearbeiteten hydrogeologischen Einheiten ermittelt und länderübergreifende Spannbreiten der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit für die gesamte Bundesrepublik Deutschland abgeleitet werden. Entsprechend den Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) standen hierbei insbesondere die Grundwässer der oberflächennahen Aquifere im Mittelpunkt. In Abstimmung mit dem ehemaligen LAWA-Unterausschuss „*Grundwasserüberwachung und Datenauswertung in der WRRL*“ (Obmann Dr. Schenk, LUA BB) wurden diese Aquifere nach petrografischen, stratigrafischen und hydrodynamischen Gesichtspunkten auf Basis der von den staatlichen geologischen Diensten ausgewiesenen hydrogeologischen Großräume des Locker- und Festgesteinsbereichs Deutschlands zu 17 hydrogeologischen Bezugseinheiten zusammengefasst.

Für diese Bezugseinheiten sollte eine Ableitung der natürlichen Hintergrundwerte für Hauptinhalts-, Nebeninhalts- und Spurenstoffe vorgenommen werden. Grundlage waren vorhandene Grundwasserdaten der Bundesländer, die von den Autoren in ein einheitliches Format überführt und den hydrogeologischen Bezugseinheiten zugeordnet wurden. Zur Ableitung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit sollten parallel zwei Verfahren eingesetzt werden: ein rangstatistisches Verfahren auf der Basis mehrerer hydrochemischer Präselektionsschritte und ein Verfahren der Komponentenseparation durch Analyse und Beschreibung der Form der beobachteten Konzentrationsverteilungen. Die Ergebnisse beider Verfahren sollten untereinander und mit den Ergebnissen anderer Forschungsberichte zur natürlichen Beschaffenheit des Grundwassers in Deutschland verglichen und diskutiert werden. Auf der Basis dieses Vergleichs sollten schließlich bundesweite Spannweiten der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit ausgewiesen werden.



Indikatoren der Grund- wasserbeschaffenheit

2.1. Begriffsdefinition

Der Stoffgehalt des Grundwassers hängt in hohem Maße von der Wechselwirkung des Grundwassers mit dem durchströmten grundwasserführenden Gestein ab. In diesem Zusammenhang kommt der chemisch-petrografischen Gesteinsbeschaffenheit und damit der Löslichkeit der Gesteine eine wesentliche Rolle zu. Da die Löslichkeit zwischen mehreren 100 g/l (einige Salze) und wenigen µg/l (einzelne Silikate) schwanken kann, stellen sich je nach dem Anteil der verschiedenen Minerale im Grundwasserleiter auch sehr unterschiedliche Stoffkonzentrationen ein. Diese werden auch durch die Aufenthaltszeit des Grundwassers im Grundwasserleiter sowie dessen Fähigkeit zum Ionenaustausch und anderen Wechselwirkungsprozessen beeinflusst. Hierbei gilt der Grundsatz, dass der Lösungsinhalt eines Grundwassers mit zunehmender Aufenthaltszeit im Aquifer zunimmt. Neben diesen großräumigen können auch lokale geogene Einflüsse, wie zum Beispiel petrografische Anomalien oder der Aufstieg höher mineralisierter Tiefenwässer, die Grundwasserbeschaffenheit beeinflussen. Darüber hinaus wird der Stoffgehalt des Grundwassers noch maßgeblich durch das Sickerwasser beeinflusst, dessen Stofffrachten durch Wechselwirkungsprozesse mit den Grundwasserdeckschichten bestimmt wird.

Ein rein natürlich geprägtes und durch menschliches Zutun unbeeinflusstes Grundwasser gibt es in Deutschland schon seit Jahrhunderten nicht mehr. Durch Rodungen und Ackerbau, die forstwirtschaftliche Nutzungen der Restwälder, die Regulierung der Vorflut und durch die Grundwasserentnahmen ist die Beschaffenheit des oberflächennahen Grundwassers in der Regel ubiquitär überprägt. Diffuse flächenhafte Einträge über das Sickerwasser, im Wesentlichen aus der Landwirtschaft (mineralische Düngemittel, Gülle, Pflanzenschutzmittel) und der Atmosphäre werden mit dem Niederschlagswasser in den Grundwasserleiter eingetragen und verändern direkt oder indirekt die Grundwasserbeschaffenheit. Neben den diffusen Stoffeinträgen können lokal auch anthropogene Einträge aus punktförmigen Quellen, wie z.B. aus Altablagerungen, eine Rolle spielen. Nicht unerheblich sind die Veränderungen in der Grundwasserbeschaffenheit als Folge eines z.B. durch Grundwasserförderbrunnen, Melioration oder Bergbau veränderten Grundwasserhaushalts (VOIGT 1990). Im Allgemeinen ist der Grad der anthropogenen Einflüsse auf das Grundwasser an die Landnutzung gekoppelt. Grundwässer unter urbanen oder landschaftlich intensiv genutzten Regionen weisen meist erhöhte Lösungsinhalte auf, da es hier häufiger zu zusätzlichen Stoffeinträgen kommt als in extensiver genutzten Gebieten.

Vielfach werden Wässer aus der vorindustriellen Zeit als „natürlich“ bezeichnet. Aus dieser Zeit liegen jedoch keine Messwerte vor. Ein in strengem Sinne *natürliches* Grundwasser tritt heutzutage allenfalls regional eng begrenzt in wasserwirtschaftlich meist unbedeutenden Räumen auf. In Anbetracht dieser Sachverhalte wurde bei der Begriffsdefinition der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit im Wesentlichen einem von der Arbeitsgruppe „Grundwasserbeschaffenheit“ des DVWK ausgearbeiteten Vorschlag (SCHENK 2003) gefolgt:

Eine „natürliche“ Grundwasserbeschaffenheit liegt vor, wenn der Stoffgehalt des Grundwassers rein geogenen Ursprungs ist bzw. durch Einflüsse einer normalen, Jahrhunderte alten Kulturlandschaft ubiquitär überprägt wurde und das Grundwasser keine synthetischen Stoffe enthält.

Diese Definition sieht auch explizit Grundwässer als natürlich an, die zwar im strengen Sinne nicht geogen sind, aufgrund einer normalen, für eine Jahrhunderte alte Kulturlandschaft typischen ubiquitären Überprägung als „natürlich“ angesehen werden können. Bestimmte Stoffe bzw. Stoffgruppen, wie z.B. Pflanzenschutzmittel, PAK, AOX kommen natürlich nicht oder in geringen Konzentrationen nur unter spezifischen geologischen Randbedingungen (kohlehaltige Sedimente) im Grundwasser vor. Ihr Auftreten ist daher meist ein Indikator für ein anthropogen beeinflusstes Grundwasser, auch und gerade im Sinne der obigen Definition.

2.2. Grundwasserbeschaffenheitsparameter

Zur Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit ist es unerlässlich, die geogenen und anthropogenen Faktoren zu beschreiben, die für die im Grundwasser auftretenden Lösungsinhalte verantwortlich sind. Im Allgemeinen machen nur einige wenige Inhaltsstoffe mehr als 99% des Lösungsinhalts des Grundwassers aus. Hierzu gehören die Anionen Hydrogenkarbonat (HCO_3^-), Sulfat (SO_4^{2-}), Chlorid (Cl^-) und Nitrat (NO_3^-) sowie die Kationen Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Natrium (Na^+), Kalium (K^+) und untergeordnet Eisen (Fe^{2+}) und Mangan (Mn^{2+}). Darüber hinaus können auch eine Reihe von Spurenstoffen, wie z.B. Aluminium, Silizium, Arsen und Fluor sowie Schwermetalle und einige organische Verbindungen im Grundwasser gelöst vorliegen. Die Milieuparameter pH-Wert, Redoxpotential bzw. die Sauerstoffkonzentration, aber auch die Summe der gelösten Salze (Ionenstärke ausgedrückt durch die elektrische Leitfähigkeit), bestimmen die Stoffverteilung im Grundwasser. Im Folgenden werden die Parameter beschrieben, die in dieser Studie ausgewertet werden konnten.

2.2.1. Milieuparameter

Zu den wesentlichen Milieuparametern zählen der pH-Wert, die Sauerstoffkonzentration, die Temperatur und das Redoxpotential. Die letzten beiden Parameter konnten jedoch aufgrund fehlender Angaben (Temperatur) bzw. unterschiedlicher Bestimmungsmethoden in den zur Verfügung stehenden Datensätzen (Redoxpotential) nicht ausgewertet werden.

pH-Wert

Der pH-Wert charakterisiert das Puffervermögen des natürlichen Mehrphasensystems Grundwasser/organische Substanz/Gas-Feststoffmatrix. Vor allem das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht bzw. die Verfügbarkeit von CO_2 und Karbonaten sind für den pH-Wert ausschlaggebend. So liegt der pH-Wert von Grundwässern aus gut gepufferten karbonathaltigen Aquiferen höher als der pH-Wert von Grundwässern aus karbonatarmen Gesteinen, wie z.B. Sandsteinen, Quarziten oder Graniten. Gerade die Grundwässer in karbonatarmen Gesteinen sind anfällig für eine Grundwasserversauerung. Auch die dort meist vorherrschenden Böden mit geringer Pufferwirkung (z.B. kalkarme Sandböden) neigen zur Versauerung durch den Eintrag von Schwefelverbindungen und Stickoxiden aus der Luft bzw. dem Niederschlag.

Sauerstoff

Sauerstoff wird über die Grundwasserneubildung in das Grundwasser eingetragen. Im Allgemeinen liegt die Konzentration des im Grundwasser gelösten Sauerstoffs zwischen 2 und 8 mg O₂/l. Die Sauerstoffsättigung bei den typischen Grundwassertemperaturen von 8 bis 10 °C liegt zwischen 9,5 und 12 mg O₂/l. In Anwesenheit sauerstoffzehrender Substanzen kann es zu Umsetzungsprozessen im Aquifer kommen, die zu einem vollständigen Verbrauch des gelösten Sauerstoffs führen können. Ein solches Grundwasser wird als „reduziertes Grundwasser“ bezeichnet (GERB 1958). Typische Merkmale reduzierter Grundwässer sind erhöhte Eisen- und Mangankonzentrationen sowie das Auftreten von Nitrit und Ammonium. Über die Sauerstoffkonzentration, die als Grenze zwischen oxidierten und reduzierten Bedingungen angesehen werden kann, liegen uneinheitliche Angaben vor; generell kann jedoch ein Grundwasser mit einer Sauerstoffkonzentration unter 1 bis 1,5 mg O₂/l als reduziert angesehen werden. Bei Sauerstoffkonzentrationen oberhalb von etwa 5 mg O₂/l sind Grundwässer in der Regel frei von Fe (II), Mn (II), NH₄ und H₂S (DVWK 1992). Reduzierte Grundwässer sind vor allem in den Lockergesteinsaquiferen Norddeutschlands anzutreffen, während oxidierte Grundwässer vor allem für Festgesteinsaquifere typisch sind (WENDLAND & KUNKEL 1999). Auch eine Reihe regional bedeutsamer Lockergesteinsaquifere, z.B. in den Terrassensedimenten des Rheins, weisen oxidierte Bedingungen auf.

2.2.2. Summenparameter

Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Summenparameter für die im Grundwasser gelösten Stoffe und ist in anthropogen unbeeinflussten Regionen primär von der Löslichkeit der im Boden und in den Gesteinen vorhandenen Mineralien abhängig. Aus diesem Grunde weisen beispielsweise Grundwässer aus quartären Sedimenten oder Kalksteinen eine im Allgemeinen höhere Leitfähigkeit auf als Grundwässer aus verwitterungsresistenten Gesteinen (z.B. Granite, Quarzite). Die Leitfähigkeit ist auch von der Aufenthaltszeit des Grundwassers und den physikalisch-chemischen Bedingungen im Aquifer abhängig. Grundwässer aus größeren Tiefen haben in der Regel eine größere Leitfähigkeit als oberflächennahe Grundwässer. Durch anthropogene Einflüsse (z.B. Düngung, Abwässer, Deponien, Streusalz) kann sich die Leitfähigkeit vor allem im oberflächennahen Grundwasser stark erhöhen. Eine hohe Leitfähigkeit kann daher einen ersten Hinweis auf eine anthropogene Überprägung geben.

DOC

Der gelöste organische Kohlenstoff (DOC) ist ein Summenparameter für die im Grundwasser gelösten organischen Kohlenstoffverbindungen. In reduzierten Grundwässern können die DOC-Konzentrationen 5 mg/l und mehr betragen. In oxidierten, unbelasteten Grundwässern sind die DOC-Werte deutlich geringer. Neben Sauerstoff, Eisen(II) und Nitrat kann der DOC-Gehalt daher einen weiteren Hinweis auf reduzierte Verhältnisse im Untergrund liefern. Während die im Grundwasserleiter selbst gelösten Mengen an organischem Kohlenstoff in der Regel natürlichen Ursprungs sind (z.B. aus der Lösung von Kohlepartikeln), können mit dem Sickerwasser auch synthetische Kohlenstoffverbindungen in das Grundwasser eingetragen werden. Vor allem in oberflächennahen Grundwässern können erhöhte DOC-Konzentrationen auf anthropogene Eintragsquellen (Deponien, Abwässer) hinweisen. Bei Grundwasseranalysen älteren Datums ist die gelöste organische Substanz im Grundwasser oftmals pauschal durch den Verbrauch des Oxidationsmittels Kaliumpermanganat (KMnO_4 -Verbrauch) erfasst. Neben den leicht abbaubaren organischen werden hierbei jedoch auch anorganische Verbindungen im Grundwasser aufgeschlossen. Nach LfW RP (2001) sind in unbelasteten Grundwässern vor allem Huminstoffe für den KMnO_4 -Verbrauch verantwortlich. In dieser Weise kann der KMnO_4 -Verbrauch dort, wo Grundwässer durch Moorwässer beeinflusst sind, bei weit über 10 mg/l liegen. In anthropogen unbeeinflussten Gebieten mit aeroben (oxidierten) Grundwasserverhältnissen übersteigt die DOC-Konzentration nur selten 2,5 mg DOC/l. Höhere Werte sind dort häufig ein Anzeichen für eine anthropogene Überprägung.

2.2.3. Hauptinhaltsstoffe

Hydrogenkarbonat

Die Konzentration von Hydrogenkarbonat im Grundwasser wird durch das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht bestimmt, welches gleichzeitig steuernde Funktionen bei vielen geochemischen Wechselwirkungsprozessen im Untergrund ausübt:



Aufgrund der Mineralisierung der organischen Substanzen in der Bodenzone kommt es zu einer Anreicherung von CO_2 in der Bodenluft und in Verbindung damit zu einer Anreicherung von Hydrogenkarbonat und Protonen im Sickerwasser. Das gelöste

CO₂ und seine Dissoziationsprodukte sind die Ursache für eine erhöhte Kalkaggressivität, so dass Kalke aus dem Boden bzw. den Sedimenten gelöst werden. Neben weiteren Hydrogenkarbonationen reichert sich dabei vor allem Calcium im Sicker- und Grundwasser an.

Häufig ist Hydrogenkarbonat das im Grundwasser vorherrschende Anion. Vor allem dort, wo die Grundwasserleiter aus Karbonatgesteinen (z.B. Kalkstein, Dolomit) aufgebaut sind, können im Grundwasser Hydrogenkarbonat-Konzentrationen von 400 bis 500 mg HCO₃/l auftreten (LFW RP 2001, DVWK 1994, HLFU 1998). Reduktionsvorgänge, vornehmlich die Denitrifikation, können über den Abbau organischer Substanzen zu einer Erhöhung der HCO₃-Konzentration führen (TRUDELL ET AL. 1986). Hohe HCO₃-Konzentrationen in karbonatarmen reduzierten Grundwässern können daher unter anderem ein Indikator für Nitratabbauprozesse über organische Substanzen darstellen. In Regionen mit karbonatarmen Gesteinen und Böden sind die natürlichen Hydrogenkarbonatgehalte im Grundwasser im Allgemeinen gering. Durch Kalkung dieser Böden oder durch die landwirtschaftliche Düngung kann es zu einer Erhöhung der Hydrogenkarbonatkonzentration im Grundwasser kommen.

Sulfat

Neben dem Eintrag von Sulfat aus dem Niederschlag oder der Atmosphäre sind Gips und Anhydrit die wichtigsten Sulfatlieferanten im Grundwasser. Sulfat kann auch aus Abbauprodukten tierischer und pflanzlicher Eiweiße stammen. Darüber hinaus kann Sulfat auch durch die Wechselwirkung von Eisensulfiden (Pyrit) mit im Aquifer vorhandenen Oxidationsmitteln (Sauerstoff, Nitrat) entstehen, so dass hohe Sulfatkonzentrationen im Grundwasser auf Denitrifikationsprozesse hinweisen können.

Die Sulfatkonzentration im Grundwasser wird durch flächenhafte anthropogene Einträge, großräumige Grundwasserabsenkungen und lokal durch Abwässer, Bergbauhalden und Deponien beeinflusst. In Stadtgebieten sind erhöhte Sulfatkonzentrationen im Grundwasser häufig an Aufschüttungen (Bauschutt) gebunden (z.B. SENSTADTUM 1986). In unbesiedelten Gebieten kann vor allem eine Sulfatzufuhr durch organische Wirtschafts- oder Mineraldünger erfolgen. Über die lithogenen Sulfatkonzentrationen finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben. Nach DVWK (1994) liegen die Sulfatkonzentrationen unbelasteter Grundwässer üblicherweise zwischen 20 und 50 mg SO₄/l. Von VOIGT (1990) und LUA BB (1996) werden als Referenzbereich für pleistozäne Lockergesteine Konzentrationen zwischen etwa 20 und 120 mg SO₄/l angegeben. Nach MATTHESS (1990) liegt die Obergrenze des natürlichen Sulfatgehaltes im Grundwasser bei 30 mg SO₄/l. Höhere natürliche Sulfatkon-

zentrationen typisieren Bereiche gipshaltiger Schichten, zum Beispiel in Zechstein- und Trias-Aquiferen.

Chlorid

Chlorid kommt in nahezu allen Grundwässern vor und ist in der Regel an die Kationen Natrium und Kalium gebunden. Chlorid ist ein „idealen Tracer“, der weder Abbau- noch Umwandlungsvorgängen im Grundwasser unterliegt. Im Allgemeinen liegen die Chloridkonzentrationen im Grundwasser zwischen 10 und 30 mg Cl/l (LFW BW 1994). Höhere Konzentrationen sind ein deutliches Anzeichen für Salzlagerstätten im Untergrund, für den Aufstieg von Salzwasser aus tieferen Schichten oder für anthropogene Einträge, z.B. durch Düngemittel, Streusalz oder Abwässer.

Calcium

Calcium ist das häufigste Kation in süßen Grundwässern der Sedimentgesteine. Wie das Hydrogenkarbonat wird der Ca-Gehalt im Grundwasser vor allem durch das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht bestimmt. In mineralischer Form ist Calcium vor allem in Karbonatgesteinen (Kalkstein, Dolomit), Sulfatgesteinen (Gips, Anhydrit) und Silikaten (z.B. Feldspäte, Amphibole) gebunden. Nach LFW RP (2001) liegt die Calciumkonzentration in Grundwässern aus Karbonatgesteinen bei etwa 100 mg Ca/l, während sie in Grundwässern aus sulfatischen Gesteinen durchaus 600 mg Ca/l betragen kann. Mit maximal 50 mg Ca/l sind die Calciumkonzentrationen in Grundwässern silikatischer Gesteine deutlich geringer. Durch anthropogene Einflüsse wird der Calciumgehalt von Grundwässern in der Regel erhöht. Die durch atmosphärische Säuredeposition eingetragenen Wasserstoffionen werden in karbonathaltigen Aquiferen gepuffert, wobei Calciumionen freigesetzt werden. Daneben ist Calcium ein Bestandteil vieler Düngemittel, was nach HLFU (1998) zu einer Erhöhung der Calciumkonzentration im Grundwasser um etwa 10 bis 30 mg Ca/l führen kann.

Magnesium

Magnesium ist wie Calcium ein Erdalkalimetall und nach Calcium das zweithäufigste Kation im Grundwasser. Es ist vor allem in Karbonatgesteinen (Dolomit, Magnesit) und Silikatgesteinen (Olivin, Pyroxene) gebunden. Die Magnesiumkonzentration im Grundwasser ist mit bis zu 30 mg Mg/l (LFW RP 2001) meist geringer als beim Calcium, was auf die geringere Verbreitung und schlechtere Löslichkeit magnesiumhaltiger Karbonate zurückzuführen ist. Zu einer großräumigen Erhöhung der Magnesiumkonzentrationen im Grundwasser kann es durch mineralische Düngemittel, lokal durch Deponien und den Einsatz von Laugen im Winterdienst kommen.

Natrium

Natrium ist ein wichtiger Bestandteil von Feldspaten und deren Verwitterungsprodukten (Tonmineralen) sowie von Salzgesteinen (Halogenen). Nach LfU BW (1994) liegen die Natriumkonzentrationen der meisten Grundwässer unter 50 mg Na/l. In Grundwässern der Grundgebirge ist Natrium häufig das dominierende Kation. Hohe Natriumkonzentrationen im Grundwasser (>400 mg Na/l) natürlichen Ursprungs sind in der Umgebung von Salzlagerstätten, bei Meerwasserintrusionen in Küstennähe sowie in den Aufstiegszonen hoch mineralisierter Tiefenwässer anzutreffen. In diesen Fällen sind häufig auch die Chloridkonzentrationen erhöht. Anthropogene Eintragsquellen für Natrium in das Grundwasser sind Streusalze, natriumhaltige Düngemittel (Chilesalpeter) und Abwässer.

Kalium

Kalium ist wie Natrium ein Alkalimetall und findet sich häufig in Silikaten (Feldspaten und Glimmern) sowie in Halogenen. Obschon das Vorkommen des Kaliums in den Gesteinen in etwa der des Natriums entspricht, liegen die Kaliumkonzentrationen im Grundwasser in der Regel unter 5 mg K/l und damit deutlich unterhalb der Natriumkonzentrationen. Ursache hierfür ist die starke Adsorption von Kalium an Tonminerale. Kalium ist wie Stickstoff und Phosphor ein bedeutender Pflanzennährstoff, so dass Kaliumdünger in der Landwirtschaft unverzichtbar sind. Folge hiervon sind anthropogen erhöhte Kaliumkonzentrationen im Grundwasser vor allem in den Regionen, in denen sorptionsschwache Böden vorherrschen. Daneben kann es zu erhöhten Kaliumgehalten im Bereich von Salzlagerstätten und aufsteigenden Tiefenwässern sowie durch Abwässer und Deponien kommen.

2.2.4. Nebeninhaltsstoffe

Nitrat, Ammonium

Der natürliche Anteil an Nitrat im Grundwasser ist gering und stammt in erster Linie aus Abbauprodukten organischer Substanzen im Boden und Grundwasser. Grund hierfür ist die hohe Wasserlöslichkeit der Nitratsalze, die im Laufe der Erdgeschichte nur unter spezifischen Bedingungen (abflusslose, aride Gebiete) die Bildung von Nitratgesteinen erlaubte. Auch Ammonium, das nicht austauschbar in das Silikatgitter eingebaut ist, wird durch die Verwitterung der Gesteine in so geringen Mengen freigesetzt, dass die dadurch entstehende geogene Grundlast im Grundwasser unbedeutend ist. Eine potenzielle Nitratquelle stellen die in der Biosphäre gespeicher-

ten Stickstoffmengen dar. Die dort vorliegenden organischen und anorganischen Stickstoffverbindungen werden jedoch im biogenen Stickstoffkreislauf ineinander überführt, so dass unter natürlichen Bedingungen nur geringe Stickstoffmengen aus der Wurzelzone ausgewaschen werden und in das Grundwasser gelangen. Mit dem Niederschlag gelangen natürliche und anthropogen bedingte Stickoxide, aber auch Ammoniak (NH_3) aus der Luft in das Grundwasser. In der Regel stellt sich ein Gleichgewicht ein, das in sauerstoffreichen Grundwässern zu Nitratkonzentrationen zwischen etwa 10 und 30 mg NO_3/l führt (DVWK 1994).

Als wichtigste flächenhafte Eintragsquelle in das Grundwasser sind aktuell die nicht von Pflanzen aufgenommenen Stickstoffmengen aus der landwirtschaftlichen Düngung zu nennen. Ist ein Grundwasser sauerstofffrei, kann das mit dem Sickerwasser in den Grundwasserleiter eingetragene Nitrat während der Verweilzeit im Aquifer bei Anwesenheit von organischen Kohlenstoffverbindungen und/oder reduzierten Schwefel-Eisen-Verbindungen reduziert werden. Reduzierte Grundwässer sind aus diesem Grunde häufig nitratfrei, während die Ammoniumkonzentrationen oftmals erhöht sind. Ammonium kann auch als Zersetzungsprodukt von Harnstoff entstehen (KÖLLE 2001), so dass neben erhöhten Nitrat- auch erhöhte Ammoniumkonzentrationen auf eine anthropogene Beeinflussung des Grundwassers durch kommunale Abwässer oder Gülle hinweisen. Im Unterschied zum Nitrat geht Ammonium bevorzugt Wechselwirkungsprozesse (Sorptions- und Austauschprozesse) mit der mineralisch/organischen Matrix des Bodens bzw. der Grundwasserleiter ein, die die Anreicherung von Ammonium einerseits zwar limitieren, andererseits aber auch als sekundäre Kontaminationsquelle fungieren können.

Eisen

Eisen kommt in fast allen Böden und Gesteinen vor und ist in den meisten Grundwässern nachweisbar. In basischen Magmatiten sind silikatische Eisenminerale, wie z.B. Olivin, weit verbreitet. Bei Verwitterungsprozessen bilden sich hieraus, je nach hydrochemischem Milieu, Eisensulfide (z.B. Pyrit), Eisenoxide (z.B. Hämatit) und Eisenhydroxide. In sauerstoffhaltigen Grundwässern liegt Eisen zumeist in dreiwertiger Form als ausgefälltes Fe(III)-Hydroxid (FeOOH) vor und ist gelöst entweder nicht oder nur in Spuren nachweisbar. Im Gegensatz zu Fe(III) ist Fe(II) relativ gut wasserlöslich, weshalb das gesamte im Grundwasser gelöste Eisen zumeist als Eisen (II) vorliegt. Hohe Eisenkonzentrationen im Grundwasser sind in der Regel natürlichen Ursprungs und typisch für sauerstoffarme („reduzierte“) Grundwässer. MATTHESS (1990) gibt als typischen Konzentrationsbereich reduzierter Grundwässer einen Bereich zwischen 1 und 10 mg $\text{Fe(II)}/\text{l}$ an. Nach DVWK (1992) ist schon ab Eisen-

konzentrationen oberhalb von etwa 0,2 mg Fe(II)/l die Anwesenheit von Nitrat auszuschließen. Es ist deshalb davon auszugehen, dass hohe Eisenkonzentrationen im Grundwasser mit niedrigen Nitratkonzentrationen einhergehen. Eine großräumige anthropogene Überprägung des Grundwassers durch Eiseneinträge mit dem Sickerwasser ist in der Regel auszuschließen, da in Lösung befindliches Eisen im aeroben Milieu des Sickerwassers ausgefällt würde. Gelöstes Eisen (III) kann nur in sauren Wässern ($\text{pH} < 5$), zum Beispiel unter stark versauerten Waldböden oder in Halden- und Grubenwässern des Kohle- und Erzbergbaus, vorkommen.

Mangan

Mangan hat ähnliche geochemische Eigenschaften wie das Eisen und ist deshalb in der Regel in Gesellschaft mit Eisen anzutreffen. Aufgrund dessen geringerer Verbreitung liegen die Mangankonzentrationen im Grundwasser meist unter 1 mg Mn/l und damit deutlich unterhalb der Eisenkonzentrationen. Eine großräumige anthropogene Überprägung des Grundwassers durch Manganeinträge mit dem Sickerwasser ist, wie beim Eisen, in der Regel auszuschließen. Im Abstrom von Deponien wurden jedoch erhöhte Mangankonzentrationen im Grundwasser festgestellt.

Phosphat

Neben Stickstoff und Kalium zählt Phosphat zu den wichtigsten Pflanzennährstoffen und spielt deshalb in den Stoffwechselkreisläufen eine entscheidende Rolle. Die wichtigste anthropogene Quelle der Phosphate sind Abwässer sowie Düngemittel aus der Landwirtschaft. Unter oxidierten Bedingungen bildet Phosphat mit Eisen, Calcium und Aluminium schlecht lösliche Komplexsalze, die jedoch unter anaeroben Bedingungen instabil sind, so dass unter diesen Bedingungen erhöhte Phosphatkonzentrationen (meist als Orthophosphat) im Grundwasser auftreten können. In reduzierten Grundwässern der Niederungen des Norddeutschen Flachlandes kann Phosphat Konzentrationen von mehr als 0,5 mg PO_4/l erreichen (JAHN & KLEIN 1995) und für die Vorfluter eutrophierend wirken.

2.2.5. Spurenstoffe

Aluminium

Aluminium ist das dritthäufigste Element der Erdkruste. Es ist vor allem an Silikate wie Feldspate, Glimmer, Amphibole und Tonminerale gebunden. In Schieferen können Alaune zu erhöhten Aluminiumkonzentrationen im Grundwasser führen. In Ge-

bieten mit erkennbarer Grundwasserversauerung können die Aluminiumkonzentrationen im Grundwasser mehrere Hundert $\mu\text{g Al/l}$ erreichen (HEM 1985). Im pH-neutralen Bereich ist Aluminium nur wenig mobil; die Konzentrationen erreichen hier meist nur wenige Hundertstel bis Zehntel $\mu\text{g/l}$ (MATTHESS 1990). Erhöhte Konzentrationen sind oftmals auf partikulär gebundenes Aluminium zurückzuführen.

Arsen

Erhöhte Arsenkonzentrationen im Grundwasser sind an sedimentäre Eisenerzlagstätten, Schiefer und Tone, Sulfidminerale (Pyrit) bzw. an kohlige Substanzen gebunden. Unter pH-neutralen Bedingungen tritt Arsen in anionischer Form als HAsO_4^{2-} und unter sauren Bedingungen ($\text{pH} < 6,5$) als H_2AsO_4^- auf, wodurch sich auch seine hohe Mobilität in der wässrigen Phase erklärt. Unter reduzierten Bedingungen bilden sich bei Anwesenheit von Eisen(II) Arsenate, die die Anreicherung von Arsen limitieren. Nach SCHLEYER & KERNDORFF (1992) tritt Arsen im Grundwasser in einem normalen Schwankungsbereich von 0,5 bis 4,5 $\mu\text{g As/l}$ auf. Hauptquellen anthropogener Arseneinträge in das Grundwasser sind Deponien, Abraumhalden aber auch Pflanzenschutzmittel aus der Landwirtschaft und Krankenhausabwässer.

Antimon

Antimon zeigt ähnliche geochemische Eigenschaften wie Arsen, weshalb beide Elemente häufig gemeinsam vorkommen. Bisher wurde Antimon im normal mineralisierten Grundwasser in Konzentrationen deutlich unter 1 $\mu\text{g Sb/l}$ gefunden, nur in sauren Grundwässern wurden höhere Gehalte gemessen (MATTHESS 1990).

Barium

Barium kommt in Magmatiten als Baryt- bzw. Witheritminerale vor. Die Löslichkeit im Grundwasser wird durch die Existenz von Sulfationen limitiert. Nach KÖLLE (2001) dürfte bereits bei geringen Sulfatgehalten (wenige mg/l) eine Konzentration von 1 $\mu\text{g Ba/l}$ nicht erreicht werden. Gruben- und Grundwässer der Grundgebirge weisen zum Teil erhöhte Bariumkonzentrationen auf. MARTIN (1996) fand in Grubenwässern des Freiburger Reviers Bariumkonzentrationen um 25 $\mu\text{g Ba/l}$ und des Erzgebirges Bariumkonzentrationen zwischen 3,5 und 48,6 $\mu\text{g Ba/l}$.

Blei

Blei ist vor allem in den Grundgebirgsregionen in Assoziation mit Erzlagstätten (Bleiglanz, Cerussit, Anglesit u.a.) aber auch mit Feldspaten und Phosphaten verbreitet. In wässriger Lösung ist Blei aufgrund der geringen Löslichkeit seiner Hydro-

xide, Karbonate und Phosphate relativ gering mobil. Organische Komplexverbindungen können jedoch eine erhöhte Mobilität aufweisen. Anthropogene Quellen für Blei waren bis in die nahe Vergangenheit verbleite Kraftstoffe und bleihaltige Zusatzstoffe (MATSCHULLAT ET AL. 1997). Im Grundwasser erreicht die Bleikonzentration selten einen Wert von 20 µg Pb/l, meist liegt sie unterhalb von 5 µg Pb/l.

Bor

Bor wird als typischer Indikator für den Einfluss von Waschmitteln auf die Grundwasserbeschaffenheit angesehen, da sein Eintrag überwiegend über Siedlungsmülldeponien und kommunale Abwässer erfolgt. Bor migriert im Grundwasser als Anion oder ungeladen und ist deshalb relativ mobil. Lediglich in Gegenwart von Magnesium kann seine Anreicherung durch Bildung schwerlöslicher Borate gemindert werden. Die natürlichen Borkonzentrationen süßer Grundwässer liegen in der Regel unter 0,1 µg B/l. In Entlastungsgebieten mineralisierter Tiefenwässer und aktiven vulkanischen Gebieten können im Grundwasser auch Borkonzentrationen von mehr als 100 µg B/l auftreten.

Cadmium

Cadmium ist in der Lithosphäre vor allen an die Verwitterung cadmiumhaltiger Zinkminerale gebunden. Anthropogene Quellen sind vor allem die metallverarbeitende Industrie sowie die Farbenindustrie. Im Grundwasser unter Industriestandorten werden daher häufig erhöhte Cadmiumkonzentrationen von 20 µg Cd/l und mehr beobachtet. Im unbelasteten Grundwasser sind Konzentrationen im Bereich von 0,1 bis 0,3 µg Cd/l typisch (SCHLEYER & KERNDORFF 1992), vereinzelt können jedoch auch Werte bis zu 2 µg Cd/l auftreten.

Chrom

Charakteristisch für Chrom ist die unterschiedliche Mobilität für die verschiedenen Oxidationsstufen. Während dreiwertiges Chrom gering wasserlöslich ist, sind die toxischen sechswertigen Chromverbindungen gut löslich. An Standorten mit Galvanik- und Gerbereibetrieben können erhöhte anthropogene Chromkonzentrationen im oberflächennahen, aeroben Grundwasser auftreten. KÖLLE (2001) führt Chromgehalte von bis zu 1000 µg Cr/l im Untergrund von Holzhandlungen an. Im natürlichen Grundwasser sind Chromgehalte unter 1,5 µg Cr/l typisch, HEM (1985) hält jedoch auch geogene Chromkonzentrationen bis 10 µg Cr/l für plausibel.

Fluorid

Die fluoridhaltigen Minerale Fluorapatit (CaF_2) und Apatit ($\text{Ca}_5[(\text{F}, \text{Cl})(\text{PO}_4)_3]$) sind sowohl in Magmatiten als auch in Sedimentgesteinen vertreten. Da sich das Fluoridanion zum Hydroxidanion isomorph verhält, kann es sich im Gitter von Glimmern und in Aluminosilikaten (und hier insbesondere in Schichtsilikaten) anlagern. Die Fluoridkonzentrationen in süßen Grundwässern betragen meist weniger als 0,5 mg F/l. Im Grundwasser limitiert Calcium die Anreicherung von Fluorid. In calciumarmen Grundwässern wurden nach Angaben von HEM (1985) Fluoridkonzentrationen von 32 mg F/l (Arizona) und 67 mg F/l (Südafrika) beobachtet. KRAJNOV & SVEC (1992) fanden ähnlich hohe Werte (>20 mg F/l) der NaHCO_3 -Wässer Moldawiens, deren Calciumgehalte 5 mg Ca/l nicht überschreiten.

Kobalt, Nickel

Kobalt und Nickel treten fast immer gemeinsam auf. Sie sind in Magmatiten und insbesondere in ultrabasischen Gesteinen relativ häufig (MATTHESS 1990). Erhöhte Konzentrationen im Grundwasser können auf die Oxidation von Sulfiden in schwermetallführenden quartären bzw. tertiären Sanden zurückgeführt werden. Die Kobaltkonzentrationen können unter diesen Bedingungen 200 µg Co/l, die Nickelkonzentrationen 1000 µg Ni/l erreichen. Aufgrund der hohen Sorptionsfähigkeit sind jedoch Co- und Ni-Konzentrationen unter 5 µg/l als typisch für den Grundwasserbereich anzusehen.

Kupfer

Kupfersulfide, -oxide und -hydroxykarbonate sind in der Erdkruste relativ weit verbreitet. Nach MATTHESS (1990) liegt der Kupfergehalt in natürlichen Grundwässern im Allgemeinen unter 10 µg Cu/l. Erhöhte Konzentrationen von mehr als 3000 µg Cu/l werden in sauren Grubenwässern des Harzes, des Mansfelder Kupferschiefergebirges und des Erzgebirges beobachtet.

Lithium

Neben Gneisen, Pegmatiten und glimmerreichen Ergussgesteinen können erhöhte Lithiumgehalte in marinen Tonen, Tonschiefern und Kalken auftreten. Im süßen Grundwasser schwanken die Lithiumkonzentrationen zwischen 1 und 500 µg Li/l (MATTHESS 1990). Erhöhte Konzentrationen sind typisch für salinare Relikt wässer des Buntsandsteins und Zechsteins.

Strontium

Strontium weist ähnliche geochemische Eigenschaften wie Calcium auf, wird jedoch aufgrund seiner geringeren Hydratationsenergie besser an Tonminerale adsorbiert. Kalke weisen daher meist auch erhöhte Strontiumkonzentrationen auf, wobei sie im Zuge ihrer Diagenese von Aragonit zum Calzit und Dolomit Strontium an die wässrige Phase abgeben. In den oberflächennahen Grundwässern liegt die Strontiumkonzentration meist unter 1 µg Sr/l, während erhöhte Werte von 1000 µg Sr/l und mehr typisch für sulfatarme, mineralisierte Grundwässer der Mitteleuropäischen Senke sind (VOIGT 1990).

Selen

Selen ist ein essenzielles Spurenelement, das in der Erdkruste selten und vorrangig in Sulfiden vorkommt. Unter pH-neutralen Bedingungen tritt Selen im oberflächennahen Grundwasser als Komplexanion SeO_3^{2-} in Konzentrationen deutlich unterhalb von 1 µg Se/l auf. Nach QUENTIN & FEILER (1968) wurden in Grundwässern des Dept. Loire et Seine (Frankreich) Selenkonzentrationen zwischen 2 und 35 µg Se/l und in argentinischen Grundwässern magmatischer Gesteine 48 bis 67 µg Se/l beobachtet. Erhöhte Selenkonzentrationen sind in Verbindung mit der Pyritoxidation auch in Haldenwässern möglich. Unter reduzierten Bedingungen ist es nur wenig mobil.

Zink

Dispers verteilt ist Zink in den meisten Gesteinen verbreitet. Erhöhte Konzentrationen zeigen insbesondere montmorillonithaltige Tonsteine. SCHLEYER & KERNDORFF (1992) weisen für die Rohwässer deutscher Wasserwerke mittlere Zinkgehalte zwischen 27 und 117 µg Zn/l aus. Konzentrationen bis 1000 µg Zn/l werden in der Oxidationszone sulfidischer Erzlagerstätten beobachtet. Die an Grundwassermessstellen beobachteten Zinkkonzentrationen können als Artefakte der Verwendung verzinkter Rohr- und Filtermaterialien erhöht sein.

3

Hydrogeologische Bezugseinheiten

Die Grundwasserbeschaffenheit wird von der Stratigrafie, der Petrografie und den hydrodynamischen Verhältnissen der durchströmten Gesteinseinheiten bestimmt. Schon aus diesem Grund ist die Ableitung einer einheitlichen stoffspezifischen Bandbreite natürlicher Stoffkonzentrationen für das gesamte Bundesgebiet weder realitäts- noch praxisnah, was im Übrigen auch durch die Ergebnisse dieser Studie bestätigt wird. Die notwendige Differenzierung der betrachteten Aquifere sollte die unterschiedlichen Verhältnisse, die durch die petrografischen, stratigrafischen und hydrodynamischen Unterschiede hervorgerufen werden, möglichst gut widerspiegeln. Auf der anderen Seite ist es bei einer bundesweiten Auswertung schon aus praktischen Gründen kaum möglich, jeden Aquifer oder Grundwasserkörper separat zu betrachten. In Abstimmung mit dem ehemaligen LAWA-Unterausschuss „Grundwasserüberwachung und Datenauswertung in der WRRL“ wurde daher als Basis für die Ableitung der natürlichen Stoffkonzentrationen eine Differenzierung der Aquifere Deutschlands in 17 hydrogeologische Bezugseinheiten vorgenommen.

Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes

In der hydrogeologischen Bezugseinheit „*Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes*“ sind die glazial geprägten Lockergesteinsgebiete nördlich der Mittelgebirge zusammengefasst. Im Gegensatz zu der im Jahre 2002 durchgeführten Untersuchung, bei der für das norddeutsche Lockergesteinsgebiet nach den „*hydrostratigrafischen Einheiten*“ (MANHENKE ET AL. 2001) unterschieden wurde, erfolgte hier eine Differenzierung nach der Tiefenstufe. Bei der primärstatistischen Analyse¹ der Grundwasserdaten im Vorfeld der durchgeführten Auswertungen zeigte sich nämlich, dass bei einer Untergliederung nach hydrostratigrafischen Kriterien (NL1, NL2, NL3) keine signifikanten Unterschiede in den Stoffkonzentrationen auftreten. Bei einer Differenzierung nach der Tiefenstufe ergaben sich hingegen Unterschiede in den Verteilungsmustern der Stoffkonzentrationen. Aus diesem Grunde wurden die „*Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes*“, im Gegensatz zu dem im Jahre 2002 durchgeführten Vorhaben, getrennt nach Tiefenstufen ausgewertet.

1 Mit diesem Begriff wird im Weiteren das Ergebnis einer statistischen Analyse bezeichnet, bei dem alle Grundwasserentnahmestellen einer hydrogeologischen Bezugseinheit ohne Präselektion betrachtet werden. Hierbei werden die Konzentrationsverteilungen der Grundwasserinhaltsstoffe mit Hilfe der deskriptiven Statistik hinsichtlich der wesentlichen Verteilungskenngrößen (Perzentile, Mittelwerte, Streumaße) charakterisiert, miteinander verglichen und bewertet.

1. *Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen unter 10 m*
In dieser Bezugseinheit wurden Grundwassermessstellen aus den „*Sanden und Kiesen des Norddeutschen Flachlandes*“ mit einem Filterausbau von weniger als 10 m unter Geländeoberkante ausgewertet.
2. *Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 10 und 25 m*
In dieser Bezugseinheit wurden Grundwassermessstellen aus den „*Sanden und Kiesen des Norddeutschen Flachlandes*“ mit einem Filterausbau zwischen 10 und 25 m unter Geländeoberkante ausgewertet.
3. *Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 25 und 50 m*
In dieser Bezugseinheit wurden Grundwassermessstellen aus den „*Sanden und Kiesen des Norddeutschen Flachlandes*“ mit einem Filterausbau zwischen 25 und 50 m unter Geländeoberkante ausgewertet.

Schotter- und Kiesablagerungen des Rheins

Hydrologisch bedeutsame Schotter- und Kiesablagerungen des Rheins treten am Oberrhein und am Niederrhein auf. Es handelt sich hierbei um fluviatile Ablagerungen, deren Liefergebiete in den Alpen sowie in den süd- bzw. mitteldeutschen Mittelgebirgen liegen. Bei der primärstatistischen Analyse der Grundwasserdaten zeigten sich trotz der lithogenetischen Ähnlichkeit dieser Gesteine größere Unterschiede der Lösungsgehalte zwischen den Grundwässern des Oberrheins und denen des Niederrheins. Daher wurden die Schotter- und Kiesablagerungen des Rheins in zwei Untereinheiten differenziert.

4. *Schotter und Kiese des Niederrheins*
In dieser Bezugseinheit wurden die Grundwassermessstellen aus den fluviatilen Terrassenablagerungen der Niederrheinischen Bucht zusammengefasst.
5. *Schotter und Kiese des Oberrheins*
In dieser Bezugseinheit wurden die Grundwassermessstellen aus den fluviatilen Ablagerungen des Oberrheingrabens zusammengefasst.

6. *Schotter- und Moränenablagerungen des Alpenvorlandes*

Bei den Lockergesteinsablagerungen des Voralpenlandes handelt es sich meist um quartäre fluviatile Schotterablagerungen und glazigene Moränenablagerungen. Liefertgebiet für die beiden lithogenetisch unterschiedlichen Gesteinseinheiten sind die Alpen. Da die zunächst getrennt voneinander durchgeführte primärstatistische Auswertung der Beschaffenheitsdaten nahezu identische Ergebnisse lieferte, wurden die beiden Einheiten zusammengefasst.

7. *Tertiäre Sedimente*

Die in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit zusammengefassten Grundwassermessstellen stammen aus tertiären Beckenablagerungen. Überwiegend liegen diese in den Verbreitungsgebieten der Oberen und Unteren Süßwassermolasse Bayerns, aber auch in der hessischen Tertiärsenke in der nördlichen Fortsetzung des Oberrheingrabens.

Karbonatische Festgesteinseinheiten

Bei den karbonatischen Festgesteinseinheiten handelt es sich überwiegend um mesozoische, untergeordnet auch devonische Karbonatgesteine bzw. karbonatisch gebundene Sedimentgesteine (z.B. Mergel).

8. *Kalksteine des Oberen Jura*

Grundwassermessstellen, die dieser Einheit zugeordnet wurden, stammen großflächig aus der Schwäbisch-Fränkischen Alb Baden-Württembergs und Bayerns. Bei den Kalksteinen des Oberen Jura handelt es sich um oftmals verkarstete (Bank-, Riffkalksteine), untergeordnet mergelige Bildungen des west- und süddeutschen Schichtstufen- und Bruchschollenlandes. Im Verbreitungsgebiet dieser Einheit sind die grundwasserführenden Gesteine in Sättel und Mulden gefaltet und an zahlreichen tektonischen Störungen zerbrochen. Die regionale wasserwirtschaftliche Bedeutung ist hoch. Durch die hohen Durchlässigkeiten und Speichervolumina weisen die Grundwasserleiter meist eine hohe Empfindlichkeit für anthropogene Stoffeinträge auf.

9. *Kalksteinfohlen des Muschelkalk*

Grundwassermessstellen aus dieser Einheit kommen innerhalb des hydrogeologischen Raumes „*Süddeutscher Buntsandstein und Muschelkalk*“ überwiegend in Baden-Württemberg und Bayern, untergeordnet auch in Rheinland-Pfalz, Hessen, Thüringen und Niedersachsen vor. Die Kalksteinfohlen des Muschelkalk sind in den Oberen, Mittleren und Unteren Muschelkalk untergliedert. Petrografisch handelt es sich überwiegend um zum Teil verkarstete Karbonatgesteine, wobei jedoch auch Gips- und Mergelgesteine sowie sandige Gesteine auftreten können. Die Grundwasserleiter weisen oftmals relativ große Speichervolumina auf und sind, insbesondere im Bereich von Gipseinschaltungen, durch einen hohen Mineralisierungsgrad gekennzeichnet.

10. *Kalksteine des alpinen Raumes*

Grundwasseranalysen aus dieser hydrogeologischen Bezugseinheit weisen in der Regel einen geringen Mineralisierungsgrad auf. Sie unterscheiden sich dadurch von den Grundwässern aus den anderen triassischen Karbonatgesteinen und wurden daher als eigenständige Klasse ausgewertet. Es handelt es sich hierbei um Sedimentgesteine der Trias, die den nördlichen Kalkalpen zugerechnet werden.

11. *Paläozoische Kalksteine*

Die in dieser Gruppe zusammengefassten Grundwassermessstellen entstammen vorwiegend aus Gesteinen des Mittel- und Oberdevons des Rheinischen Schiefergebirges (Massenkalk) und des Zechsteins. Ein gemeinsames Merkmal der paläozoischen Kalksteine ist die Verkarstung. Grundwasseranalysen aus dieser hydrogeologischen Bezugseinheit wurden aufgrund der besonderen Lösungsinhalte gesondert ausgewertet.

12. *Karbonatische Wechselfolgen*

Grundwasseranalysen dieser Einheit stammen überwiegend aus Gesteinen des Keupers, untergeordnet der Kreide. Es handelt sich hierbei zumeist um kalkhaltige Mergelgesteine mit silikatischen (tonigen oder sandigen) Zwischenlagen. Der Kalkgehalt ist deutlich geringer als bei den Kalksteinen; hydrochemisch sind sie jedoch von den silikatischen Wechselfolgen zu unterscheiden. Im Gegensatz zu diesen enthalten die karbonatischen Wechselfolgen nur untergeordnet silikatische Fazies. Auch die Grundwasseranalysen aus dem alpinen Flysch Bayerns wurden dieser Einheit zugeordnet.

Silikatische Festgesteinseinheiten

In dieser Gruppe sind die Festgesteinseinheiten mit silikatischer Bindung zusammengefasst. Hierzu gehören die mesozoischen Sedimentgesteine (z.B. Buntsandstein) ebenso wie die paläozoischen Sediment- und Kristallingesteine sowie die känozoischen Vulkanite.

13. Sandsteine und silikatische Wechselfolgen

Dieser hydrogeologischen Bezugseinheit wurden Grundwassermessstellen zugeordnet, die aus Wechselfolgen von Sandsteinen und Tonsteinen unterschiedlicher Zeitalter stammen. Insbesondere Grundwassermessstellen aus dem Rotliegenden sowie die nicht zum Buntsandstein gehörenden Sandstein- und Tonsteinwechselfolgen des Mesozoikums wurden dieser Einheit zugeordnet. Letztere enthalten in der Regel, wenn auch untergeordnet, Karbonatgesteine und karbonatisch gebundene Sedimentgesteine.

14. Sandsteinfolgen des Buntsandsteins

Grundwassermessstellen dieser Einheit stammen aus Süd- und Mitteldeutschland, vor allem aus Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg, Hessen und Thüringen. Die Sandsteinfolgen des Buntsandsteins sind im Allgemeinen durch hohe Durchlässigkeiten der sandigen Deckschichten und hohe Speichervolumina gekennzeichnet. Die wasserwirtschaftliche Bedeutung des Buntsandsteins ist daher oftmals sehr hoch. Durch die silikatische Gesteinsausprägung sind die Wässer jedoch zumeist sehr ionenarm und versauerungsgefährdet. Typisch ist hier auch ein ausgeglichener innerjähriger Gang des Grundwasserabflusses (TLUG 1997).

15. Paläozoische Sedimentgesteine

Rheinisches Schiefergebirge, Erzgebirge und Thüringer Schiefergebirge, aus der die dieser Einheit zugehörigen Grundwassermessstellen stammen, werden vorwiegend aus Gesteinseinheiten des Devons und Unterkarbons aufgebaut. Hierbei handelt es sich um stark verfaltete, teilweise auch verschieferte Sedimentgesteine. Die Wasserführung dieser Kluftaquifere ist im Allgemeinen gering. In vielen Teilbereichen finden sich deshalb praktisch keine für die öffentliche Wasserversorgung nutzbaren Grundwasservorkommen.

16. *Vulkanite*

Bei den Vulkanitgesteinen sind überregional nur die basischen Vulkanite von Bedeutung. Vor allem Grundwassermessstellen aus dem wasserwirtschaftlich bedeutsamen Vogelsberg in Hessen gehören zu dieser Einheit. Bei den basischen Vulkaniten handelt es sich überwiegend um aus dem Tertiär stammende Basaltoide. Aufgrund der geringen Anzahl vorhandener Grundwassermessstellen wurde auf die Ausweisung einer hydrogeologischen Bezugseinheit „Saure Vulkanite“ verzichtet.

17. *Saure Magmatite und Metamorphite*

Diese hydrogeologische Bezugseinheit umfasst alle Plutonite (z.B. Granite) und Metamorphite (z.B. Gneise). Es handelt sich überwiegend um paläozoische Gesteine aus Bayern (Bayerischer Wald), Sachsen (Erzgebirge) und Baden-Württemberg (Schwarzwald).

Neben den hier ausgeführten Bezugseinheiten war ursprünglich auch die Auswertung von Grundwassermessstellen aus *quartären Talfüllungen* geplant. Hierbei handelt es sich um geringmächtige, lateral nicht sehr weit ausgedehnte, wasserwirtschaftlich oftmals jedoch bedeutsame quartäre Sedimente im Mittelgebirgsbereich. Typisch für diese Sedimente ist die heterogene Konzentrationsverteilung, die durch den Mineralisierungsgrad der Festgesteinseinheiten bestimmt sind. Da eine flächenhafte Zuordnung zu den entsprechenden Festgesteinseinheiten nicht möglich war, wurde nach Absprache mit dem ehemaligen LAWA-Unterausschuss „Grundwasserüberwachung und Datenauswertung in der WRRL“ darauf verzichtet, Grundwassermessstellen aus dieser Einheit auszuwerten.

4

Methoden

Die Überlagerung einer Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Grundwasserbeschaffenheit und die Unmöglichkeit, in heutiger Zeit vollständig natürliche Grundwässer in großem Umfang in der Natur beobachten zu können (siehe Kapitel 2.1), führen zu nicht unerheblichen Schwierigkeiten, „natürliche Grundwässer“ von „beeinflussten Grundwässern“ zu unterscheiden. Bei der Analyse einer einzelnen Grundwasserprobe ist es im Allgemeinen unmöglich, direkt zu beurteilen, in welchen Ausmaß natürliche und nicht natürliche (anthropogene) Einflüsse zum jeweils beobachteten Beschaffenheitsmuster beitragen. Aufgrund der natürlichen Variabilitäten können bei Einzelproben auch keine repräsentativen Aussagen über die „typische“ Grundwasserbeschaffenheit getroffen werden. Dies ist nur möglich, wenn eine größere Anzahl von Grundwassermessstellen aus einer als „*weitgehend hydrochemisch homogen*“ einzustufenden hydrogeologischen Bezugseinheit betrachtet werden. Um beeinflusste von unbeeinflussten Grundwässern unterscheiden zu können, müssen allerdings auch hier Auswahl-, Separations- und Analyseverfahren angewendet werden, bei denen jedoch generell nicht ausgeschlossen werden kann, dass der Einfluss einer ubiquitären Überprägung nicht vollständig als solcher identifiziert und quantifiziert wird. Die wichtigsten hierzu verwendeten Verfahren sind im folgenden kurz aufgeführt.

1. *Analyse von Tiefenwässern*

Hierbei geht man davon aus, dass Tiefenwässer mit hohem Grundwasseralter nicht durch anthropogene Einträge aus dem Sickerwasser beeinflusst sind und daher natürliche Bedingungen widerspiegeln. Die Grundwasserbeschaffenheit wird durch univariate Statistik durch Maßzahlen der Konzentrationsverteilung (Mittelwert, Median, Perzentile etc.) der Grundwasserinhaltsstoffe charakterisiert. Problematisch hierbei ist jedoch, dass für Tiefenwässer ein erhöhter Mineralisierungsgrad des Grundwassers zu erwarten ist. Es muss daher hinterfragt werden, ob diese Wässer, die häufig nicht in den aktiven Wasserkreislauf eingebunden sind, als Referenz für oberflächennahe, in die Wasserbewirtschaftung einbezogene und für die Trinkwasserversorgung genutzte Grundwässer dienen können. Auch werden diese Tiefenwässer durch die Grundwasserbeobachtungsprogramme der Länder kaum beprobt, so dass eine Datengrundlage mit hinreichender statistischer Relevanz kaum aufzubauen ist.

2. *Analyse von nominell unbeeinflussten Grundwassermessstellen*

Eine weitere Möglichkeit, Aussagen über natürliche Grundwasserverhältnisse zu gewinnen, ist die statistische Analyse von Grundwasserdaten, die aus nominell unbeeinflussten Grundwassermessstellen stammen. Diese müssen durch Detailuntersuchungen identifiziert werden. Für einige Bundesländern liegen diesbezüglich ein-

zelne ausgewählte Grundwassermessstellen vor, die seitens der Länder als unbeeinflusst eingestuft werden (z.B. in Baden-Württemberg, LfU BW 1994). Die Zahl der zur hierfür zur Verfügung stehenden Daten ist jedoch zu gering, um eine bundesweite Datengrundlage mit hinreichender statistischer Relevanz aufbauen zu können.

3. *Hydrochemische Präselektion*

Hierbei werden sowohl beeinflusste als auch unbeeinflusste Grundwassermessstellen betrachtet. Beeinflusste Grundwassermessstellen werden durch Konzentrationsobergrenzen von Leitparametern identifiziert und aus der weiteren Auswertung herausgenommen. Typischerweise werden hierzu das Auftreten von Pflanzenschutzmitteln, organischen Verbindungen (AOX, PAK etc.) oder das Überschreiten bestimmter Schwellenwerte für Nitrat oder Kalium verwendet. Die nach der Präselektion verbleibenden Grundwassermessstellen werden als natürlich angesehen. Die Hintergrundwerte werden, wie auch schon bei den anderen Verfahren, durch Maßzahlen der Konzentrationsverteilungen der Grundwasserinhaltsstoffe charakterisiert. Der Vorteil des Verfahrens ist die universelle Anwendbarkeit und die Möglichkeit, die Proben in der Gesamtheit der analysierten Parameter auswerten zu können. Problematisch ist jedoch die Auswahl der Präselektionskriterien, da nicht unbedingt der gewünschte Wirkungszusammenhang zwischen den Konzentrationen der Leitparameter und dem Grad der Beeinflussung bestehen muss.

4. *Analyse der Konzentrationsverteilungen*

Aussagen zur natürlichen Grundwasserbeschaffenheit werden hierbei aus einer Analyse der Konzentrationsverteilung eines Grundwasserparameters abgeleitet. Unter der Voraussetzung, dass sich die Konzentrationsverteilung eines Grundwasserparameters aus unbeeinflussten Grundwassermessstellen von der aus den beeinflussten Grundwassermessstellen unterscheiden, können diese beiden Komponenten separiert und die natürliche Komponente identifiziert werden. Dies erfolgt durch die Kenngrößen von Verteilungsfunktionen, die auf Basis der beobachteten Werte ermittelt werden. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die Einbeziehung des gesamten zur Verfügung stehenden Datenpools in die Auswertung und die Möglichkeit, Inhomogenitäten im Datensatz direkt identifizieren zu können. Der Nachteil ist die deutlich anspruchsvollere und isolierte, jeweils auf einen einzelnen Grundwasserparameter bezogene Auswertung, die Quervergleiche der Ergebnisse erfordert.

5. *Hydrochemische Modellierung*

Mit Hilfe hydrochemischer/hydrodynamischer Modelle (z.B. PHREEQC) wird der Lösungsgehalt des Grundwassers unter Gleichgewichtsbedingungen modelliert. Unter Nutzung meist numerischer, inversiver Verfahren werden die Prozesse bei der Wechselwirkung zwischen Gestein und Wasser unter Berücksichtigung unter anderem der Stoffkonzentrationen, Löslichkeitsprodukte, Sättigungsindizes, Mineralfällung und der Reaktionskinetik abgebildet. Durch Variation der Randbedingungen kann ein potenziell natürliches Grundwasser simuliert werden. Aufgrund des hohen Aufwandes ist diese Art der hydrochemischen Modellierung jedoch nur für gut untersuchte, räumlich eng begrenzte Gebiete, keinesfalls jedoch für die in diesem Vorhaben verfolgte Zielstellung einsetzbar.

Bei dem im Jahr 2002 von den Autoren bearbeiteten Forschungsprojekt (KUNKEL ET AL. 2002) wurde besonderer Wert auf die Entwicklung von Verfahren gelegt, mit denen sich die natürliche Grundwasserbeschaffenheit länderübergreifend für alle betrachteten Einheiten und Grundwasserparameter ableiten lässt. Es wurden zwei Verfahren entwickelt, die hier eingesetzt werden sollten: zum einen ein Verfahren zur hydrochemischen Präselektion von Grundwassermessstellen und zum anderen ein Verfahren zur Separation der natürlichen und beeinflussten Komponente durch die Analyse der Konzentrationsverteilung eines Grundwasserinhaltsstoffes. Im Folgenden werden die beiden Verfahren näher beschrieben.

4.1 **Hydrochemische Präselektion**

Bei diesem Verfahren geht man davon aus, dass die beeinflussten Grundwassermessstellen in einem Datensatz durch das Auftreten oder Überschreiten von Schwellenwerten von Leitparametern identifiziert werden können. Die betreffenden Grundwassermessstellen werden dann bei der anschließenden statistischen Analyse nicht weiter betrachtet. Die natürliche Grundwasserbeschaffenheit wird mit Hilfe der univariaten Statistik durch Maßzahlen der Konzentrationsverteilung (Mittelwert, Median, Perzentile etc.) der einzelnen Grundwasserinhaltsstoffe charakterisiert. Die explizite Form der Häufigkeitsverteilungen wird hierbei nicht weiter betrachtet.

Aufgrund der Heterogenität der in die vorliegende Auswertung eingeflossenen Datensätze kam in dieser Studie ein mehrstufiges Verfahren zur Präselektion der Daten

zur Anwendung. In einem ersten Schritt wurde die gesamte Probe einer Grundwassermessstelle nicht weiter betrachtet, wenn der Messwert eines einzelnen Grundwasserinhaltsstoffes oberhalb des 95. Perzentils der Verteilung aller Messwerte dieses Inhaltsstoffes in der entsprechenden hydrogeologischen Bezugseinheit lag. Es wurde bewusst darauf verzichtet, lediglich den konkreten Messwert eines Grundwasserinhaltsstoffes aus dem Datenkollektiv zu entfernen. Hierdurch sollte dem Umstand Rechnung getragen werden, dass das *gesamte Grundwasser* dann einer Beeinflussung unterliegt, wenn die Konzentration eines Inhaltsstoffes oberhalb des Schwellenwertes liegt. Die Wahl des 95. Perzentils erfolgte in Anlehnung an SCHLEYER & KERNDORFF (1992), die diesen Wert als den „*Beginn des anthropogen beeinflussten Bereichs*“ definierten.

In einem zweiten Präselektionsschritt wurden Grundwassermessstellen von der weiteren Auswertung ausgeschlossen, wenn die folgenden Kriterien erfüllt waren:

- der Nitratgehalt ist größer als 10 mg NO₃/l oder
- der Ammoniumgehalt ist größer als 0,5 mg NH₄/l oder
- der Kaliumgehalt ist größer als 5 mg K/l.

Stickstoff und Kalium wurden aufgrund ihres verbreiteten Auftretens im Grundwasser als Leitinhaltstoffe zur Präselektion einer Analyse herangezogen. Das Präselektionskriterium für Nitrat wurde in Anlehnung an die in Hessen (HLFU 1998) nach einem ähnlichen Schema vorgenommene Ableitung natürlicher Hintergrundwerte gewählt. Sie wirken sich überwiegend auf Festgesteinsaquifere mit oxidierten bzw. eingeschränkt oxidierten Verhältnissen aus. Grundwässer in Lockergesteinen befinden sich häufig in reduzierten hydrochemischen Verhältnissen, die einen Nitratabbau im Aquifer ermöglichen. Geringe Nitratgehalte im Grundwasser lassen daher nicht notwendigerweise auf ein unbeeinflusstes Grundwasser schließen. Aus diesem Grunde wurde das unter reduzierten Bedingungen stabile Ammonium als Leitinhaltstoff zur Präselektion verwendet. Kalium als Präselektionskriterium betrifft sowohl beeinflusste Grundwässer im Locker-, als auch im Festgesteinsbereich.

Durch die Präselektion sollen die Grundwassermessstellen ausgewählt werden, die als unbeeinflusst angesehen werden können. Die parameter- und einheitenspezifische statistische Auswertung der verbleibenden Grundwassermessstellen soll demnach ein Maß für die natürliche Grundwasserbeschaffenheit liefern. Diese wird durch den Wertebereich charakterisiert, der durch das 10. und 90. Perzentil der Konzentrationsverteilungen begrenzt wird.

Bei der hydrochemischen Präselektion und der univariaten (rang)statistischen Auswertung handelt es sich um eine einfach zu handhabende Methode zur Charakterisierung von Grundwasserdaten. Dieses und ähnlich arbeitende Verfahren haben allerdings den Nachteil, dass die Kriterien der hydrochemischen Präselektion für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit überwiegend auf Erfahrungswissen und/oder subjektiv ausgewählten Kriterien beruhen und unterschiedlich gehandhabt werden. Darüber hinaus führt die hydrochemische Präselektion zu einer signifikanten Reduktion der Anzahl der ausgewerteten Grundwassermessstellen. Diese Reduktion ist von verschiedenen Faktoren abhängig, kann aber, je nach Grundwasserparameter und hydrogeologischer Einheit, bis zu 90% des Gesamtdatenbestandes betragen. Aus diesen Gründen wurde ein zweites Verfahren entwickelt und angewendet, bei dem diese Nachteile nicht auftreten.

4.2 Trennung von beeinflusster und unbeeinflusster Komponente

Die Konzentrationen eines Grundwasserinhaltsstoffes sind bei unterschiedlichen Grundwassermessstellen nicht identisch. Sie bilden vielmehr eine Verteilung, die in ihrer Form und Ausprägung durch die natürlichen Variabilitäten sowie die komplexen physikalischen, chemischen und mikrobiologischen Prozesse im Aquifer bestimmt wird. Abb. 1 zeigt als Beispiel die Häufigkeitsverteilung der Natriumkonzentrationen in den Sanden und Kiesen des Norddeutschen Flachlandes. Die Verteilung ergibt sich aus einer Gruppierung der Konzentrationen in Klassen, deren Breite bzw. Anzahl von der Zahl der eingehenden Messwerte und der Konzentrationsspanne der Werte abhängt (LANGGUTH & VOIGT 1980). Die Klassenhäufigkeiten, in der Abbildung als Punkte dargestellt, können in ihrer Gesamtheit durch eine Wahrscheinlichkeitsfunktion beschrieben und als kontinuierliche Verteilungskurve dargestellt werden.

Bei einer detaillierten Analyse der auftretenden Konzentrationsspektren stellt man fest, dass diese sich meist in zwei deutlich voneinander unterscheidbare Anteile aufteilen lassen. Der untere Konzentrationsbereich mit hohen Häufigkeiten wird von einer asymmetrischen Verteilung dominiert, die sich meist mit sehr guter Übereinstimmung durch eine Lognormalverteilung beschreiben lässt. Im Bereich höherer Konzentrationen werden die beobachteten Verteilungen in vielen Fällen durch eine deutlich von der ersten unterscheidbaren zweiten Komponente dominiert, die ebenfalls

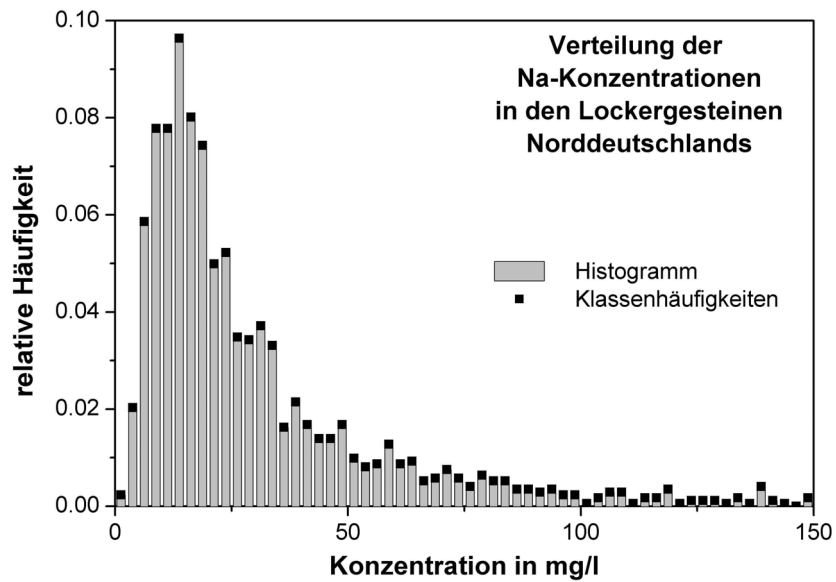


Abb. 1: Natriumkonzentration in den Sanden und Kiesen des Norddeutschen Flachlandes.

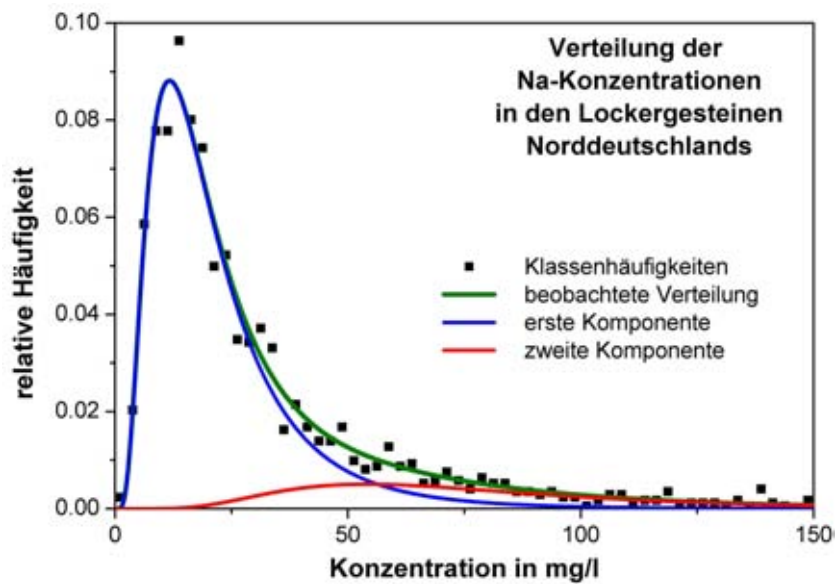


Abb. 2: Verteilungskomponenten der Natriumkonzentrationen in den Sanden und Kiesen des Norddeutschen Flachlandes.

einen meist asymmetrischen Verlauf hat. In Abb. 2 ist dies erneut am Beispiel der Natriumkonzentrationen in den Sanden und Kiesen Norddeutschlands illustriert. Die relativen Klassenhäufigkeiten sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht als Histogrammbalken sondern als Datenpunkte dargestellt.

Bereits SCHLEYER & KERNDORFF (1992) stellten fest, dass sich die erfassten Messwert- und Konzentrationspektren aus sich überlagernden Häufigkeitsverteilungen zusammensetzen, die dem natürlichen und dem beeinflussten Bereich zugeschrieben werden können. Basierend hierauf wird im Folgenden postuliert, dass sich die beobachtete Konzentrationsverteilung eines Grundwasserinhaltsstoffes f_{beob} in einer homogenen hydrogeologischen Bezugseinheit durch die Überlagerung von zwei Einzelverteilungen ausdrücken lässt. Die beiden Einzelverteilungen entsprechen der *natürlichen* und der *beeinflussten* Komponente, wobei die natürliche Komponente die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit beschreibt:

$$f_{\text{beob}}(c) = f_{\text{nat}}(c) + f_{\text{beein}}(c) \quad \text{Gl. 2}$$

mit: $f_{\text{beob}}(c)$: beobachtete Konzentrationsverteilung
 $f_{\text{nat}}(c)$: natürliche Komponente in der beobachteten Konzentrationsverteilung
 $f_{\text{beein}}(c)$: beeinflusste Komponente in der beobachteten Konzentrationsverteilung
 c : Konzentration eines Grundwasserinhaltsstoffs

Die Form der beiden Einzelverteilungen ist a priori nicht bekannt. Auf Basis der beobachteten Konzentrationsverteilungen wurden Annahmen hierzu getroffen, die im Verlaufe der Modellanalysen auf ihre Gültigkeit hin überprüft wurden.

4.2.1 *Natürliche Komponente*

Bei einem (hypothetischen) anthropogen unbeeinflussten Grundwasser, welches einer hydrogeologischen Bezugseinheit ohne fazielle Unterschiede entstammt, ergeben Messungen der Konzentration eines Grundwasserinhaltsstoffes an einer Reihe von Grundwassermessstellen dieser Bezugseinheit über einen längeren Zeitraum eine Konzentrationsverteilung, deren Form und Breite ausschließlich durch die natürlichen Variabilitäten bei der reaktiven Wechselwirkung des Grundwassers mit dem

durchströmten Gestein bestimmt wird. Die Konzentrationsverteilung ist daher das Resultat eines komplexen Gleichgewichts der Konzentrationen und Löslichkeiten einer Vielzahl von Stoffen. Bei derartigen Abhängigkeiten treten oftmals Lognormalverteilungen der Systemgrößen auf. Bei einer Reihe von Grundwasserparametern, bei denen keine Beeinflussung nachweisbar war, wurde überprüft, ob die auftretenden Konzentrationen ebenfalls Lognormalverteilungen folgen. Hierzu wurden die logarithmierten Messwerte mit verschiedenen statistischen Tests (Shapiro-Wilk und Kolmogoroff-Smirnoff) auf Normalität untersucht. Hierbei ergab sich, dass die untersuchten Verteilungen mit hoher Signifikanz lognormalverteilt sind. Aus diesem Grunde wurde postuliert, dass sich die natürliche Komponente f_{nat} in guter Näherung durch eine Lognormalverteilung ausdrücken lässt:

$$f_{\text{nat}}(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot c} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(c/\mu)}{\sigma} \right)^2} \quad \text{Gl. 3}$$

mit: $f_{\text{nat}}(c)$: natürliche Komponente in der beobachteten Konzentrationsverteilung
 c : Konzentration eines Grundwasserinhaltsstoffs
 σ : Streubreite der Verteilung
 μ : Median der Verteilung

Die Lognormalverteilung wird durch die Transformation $c \rightarrow \ln(c)$ aus der Normalverteilung abgeleitet. Die Verteilung wird durch zwei Parameter, den Median μ und die Streubreite σ bestimmt. Im Gegensatz zur Normalverteilung ist die Lognormalverteilung rechtsschief; der Mittelwert der Konzentrationen ist größer als der Median.

4.2.2 Beeinflusste Komponente

Im Allgemeinen kann nicht festgestellt werden, ob und in welchem Umfang die an einer Grundwassermessstelle gemessenen Konzentrationen auf anthropogene Stoffeinträge zurückzuführen sind. Bei der Betrachtung einer größeren Anzahl von Grundwassermessstellen können jedoch auch die anthropogenen Einträge durch eine Konzentrationsverteilung f_{anth} beschrieben werden. Da die Stoffeinträge in den Boden und damit auch die Stoffausträge aus dem Sickerwasser unabhängig vom Lö-

sungsgehalt des Grundwassers sind, ist auch die anthropogen bedingte *Erhöhung* der Konzentration eines Grundwasserparameters weitestgehend unabhängig von der sich natürlich einstellenden Konzentration. In anderen Worten ausgedrückt bedeutet dies, dass gleich hohe anthropogene Stoffeinträge in das Grundwasser auch zu einer gleich hohen Konzentrationserhöhung im Aquifer führen und zwar unabhängig vom ursprünglichen natürlichen Gehalt des Stoffes. Die natürliche f_{nat} und die anthropogene Verteilung f_{anth} können daher auch als unabhängig voneinander betrachtet werden. Die Verteilung $f_{\text{beein}}(c)$ der beobachteten Konzentrationen ergibt sich damit aus einer Überlagerung der beiden Einzelverteilungen in Form eines Faltungsintegrals:

$$f_{\text{beein}}(c) = \int_0^{\infty} f_{\text{nat}}(c-\xi) \cdot f_{\text{anth}}(\xi) d\xi \quad \text{Gl. 4}$$

mit: $f_{\text{beein}}(c)$: Konzentrationsverteilung der beeinflussten Komponente
 $f_{\text{nat}}(c)$: Konzentrationsverteilung der natürlichen Komponente
 $f_{\text{anth}}(c)$: Konzentrationsverteilung der anthropogenen Stoffeinträge
 c : Konzentration des Grundwasserinhaltsstoffs
 ξ : Integrationsparameter

Dieser Beziehung liegt die Vorstellung zugrunde, dass sich die Verteilung der beeinflussten Komponente für eine bestimmte Konzentration c aus der Häufigkeit der natürlichen Komponente f_{nat} an der Stelle $c-\xi$ und den durch die Verteilung f_{anth} gewichteten anthropogenen Einträgen zusammensetzt. Der Einfluss dieser Überlagerung auf die Verteilung beeinflussten Komponente ist in Abb. 3 schematisch skizziert. Auf der linken Seite der Abbildung ist die Verteilung der anthropogenen Stoffeinträge und die sich aus der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit ergebende Konzentrationsverteilung eines Grundwasserparameters in einer hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Beide Verteilungen weisen im Allgemeinen, da sie als unabhängig voneinander zu betrachten sind, eine unterschiedliche Form, Breite und Median auf. Die Faltung beider Beiträge führt, wie die rechte Seite der Abbildung skizziert, zu einer deutlich verbreiterten und zu höheren Konzentrationen hin verschobenen resultierenden Verteilung. Die Form dieser Verteilung ergibt sich auf meist nicht analytische Weise aus den Primärverteilungen. Die Analyse der beobachteten Häufigkeitsverteilungen hat ergeben, dass sich die beeinflusste Komponente in sehr guter Näherung durch eine Lognormalverteilung beschreiben lässt.

Im Falle einer ubiquitären Überprägung des Grundwassers kann es dazu kommen, dass es sich bei einer beobachteten, eventuell als „natürlich“ identifizierten Konzentrationsverteilung, bereits um eine durch anthropogene Einträge verbreiterte und zu höheren Konzentrationen hin verschobene Konzentrationsverteilung handelt. Durch die Faltung gehen nämlich alle Informationen über die beitragenden Komponenten verloren. So ist es aus der Analyse der resultierenden beeinflussten Komponente allein prinzipiell nicht möglich, Aussagen über die Ausgangsverteilungen f_{nat} und f_{anth} zu machen. Dies betrifft nicht nur die Form und Breite, sondern auch die Mittelwerte bzw. Mediane sowie die Anteile, mit denen die jeweiligen Ausgangsverteilungen zur beeinflussten Komponente beitragen. Es sei an dieser Stelle besonders betont, dass schon allein aus diesen Gründen die oft angeführte Verknüpfung hoher Stoffkonzentrationen im Grundwasser mit anthropogenen Einflüssen im Allgemeinen nicht zutreffend ist. Vielmehr ist es so, dass *jeder* Konzentrationswert in einer durch anthropogene Einträge beeinflussten Verteilung *sowohl durch natürliche als auch anthropogene Quellen* verursacht sein kann.

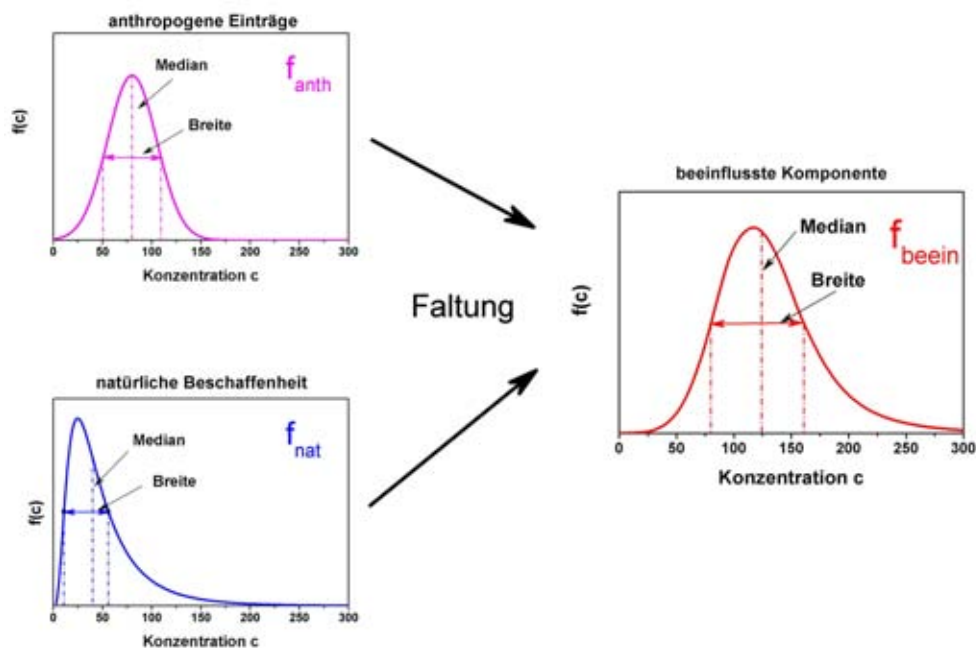


Abb. 3: Schematische Darstellung des Einflusses der Überlagerung von anthropogenen Einträgen und natürlichen Einflüssen auf die Konzentrationsverteilung der beeinflussten Komponente.

4.2.3 Analyse der beobachteten Konzentrationsverteilungen

Zur Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit wurde nach dem oben Gesagten vorausgesetzt, dass sich die beobachtete Häufigkeitsverteilung eines Grundwasserinhaltsstoffes nach Gl. 2 in eine natürliche (ubiquitär überprägte) und eine beeinflusste Komponente separieren lässt. Die natürliche Komponente wurde hierbei generell durch eine Lognormalverteilung beschrieben. Die Form der beeinflussten Komponente ist, wie bereits dargelegt, von einer Reihe von Faktoren abhängig, konnte aber meist mit guter Genauigkeit ebenfalls durch eine Lognormalverteilung beschrieben werden. Das wurde im Übrigen auch durch eine Reihe von Beispielrechnungen untersetzt.

Abb. 4 illustriert dies am bereits angeführten Beispiel der Natriumgehalte in den Sanden und Kiesen des Norddeutschen Flachlandes. In der oberen Grafik sind die kumulierten Häufigkeiten der Analysewerte (insgesamt 2031) als Punkte dargestellt. Die in rot skizzierte durchgezogene Linie zeigt die Summe der berechneten kumulierten Häufigkeiten der natürlichen und beeinflussten Komponente, die beide als lognormalverteilt angenommen wurden. Wie auch die untere Grafik, in der die Differenzen zwischen den gemessenen und berechneten Häufigkeiten dargestellt sind, verdeutlicht, sind die Abweichungen sehr gering. Ein Kolmogoroff-Smirnoff Test bestätigt mit einer Signifikanz von etwa 85% die Hypothese, dass die Messwerte tat-

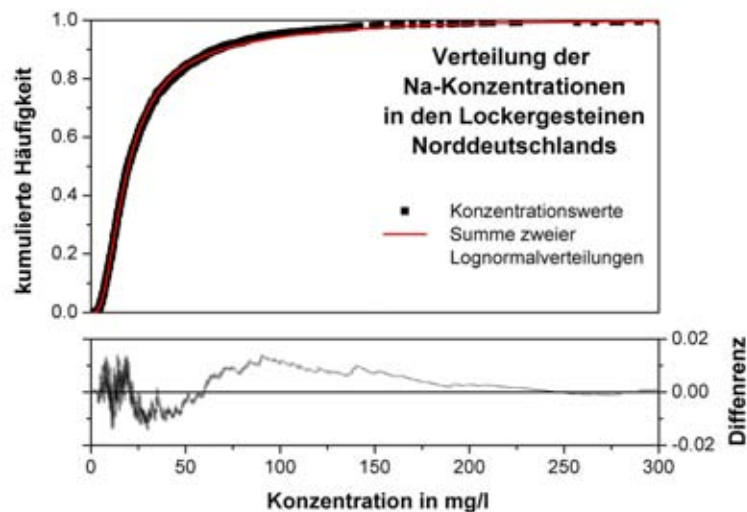


Abb. 4: Kumulierte Häufigkeiten der beobachteten und modellierten Konzentration der Na-Gehalte in den Sanden und Kiesen des Norddeutschen Flachlandes.

sächlich der Summe von zwei Lognormalverteilungen folgen. Dieses Ergebnis ist übrigens unabhängig von einer Klassenbildung der Messwerte (Abb. 1 und Abb. 2), da dieser Test die kumulierten Häufigkeiten direkt vergleicht. Ähnlich gute Übereinstimmung ergeben sich auch für andere Grundwasserparameter.

Im Rahmen der Auswertungen wurde auch die Möglichkeit untersucht, die Konzentrationsverteilungen mit anderen Verteilungsformen zu beschreiben. Hierbei zeigte sich, dass andere Verteilungsformen keine generell bessere Übereinstimmung mit den beobachteten Konzentrationsprofilen lieferte. Die abgeleiteten Perzentile der Komponentenverteilungen waren hingegen nahezu identisch. Die Wahl der Verteilungsformen (zwei Lognormalverteilungen) führt demnach zu keiner Beschränkung der Gültigkeit und praktischen Anwendbarkeit des Verfahrens und der Ergebnisse.

Zur Ableitung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit wird das gemessene Konzentrationsprofil eines Grundwasserparameters zunächst in zwei Einzelverteilungen separiert². Die beobachtete Konzentrationsverteilung f_{beob} wird durch fünf unabhängige Parameter beschrieben. Dies sind die Mediane μ_{nat} , μ_{beein} und die Streubreiten σ_{nat} , σ_{beein} der beiden Einzelverteilungen sowie der Anteil der natürlichen Komponente an der Gesamtverteilung:

$$f_{\text{beob}}(c) = \frac{S}{\sqrt{2\pi} \cdot c} \cdot \left\{ \frac{A}{\sigma_{\text{nat}}} \cdot e^{-\frac{(\ln(c) - \ln(\mu_{\text{nat}}))^2}{2 \cdot \sigma_{\text{nat}}^2}} + \frac{(1-A)}{\sigma_{\text{beein}}} \cdot e^{-\frac{(\ln(c) - \ln(\mu_{\text{beein}}))^2}{2 \cdot \sigma_{\text{beein}}^2}} \right\} \quad \text{Gl. 5}$$

mit:	$f_{\text{beob}}(c)$:	beobachtete Konzentrationsverteilung
	A:	Anteil der natürlichen Komponente an der beobachteten Verteilung
	S:	Breite der Konzentrationsklassen
	c:	Konzentration eines Grundwasserinhaltsstoffs
	σ :	Streubreite der Verteilung
	μ :	Median der Verteilung

2 Die Separation in mehr als zwei Komponenten wurde im Rahmen der hier durchgeführten Auswertung ebenfalls untersucht, z.B. für den Fall nachgewiesener fazieller Unterschiede. Es konnte allerdings in keinem Fall mit hinreichender statistischer Relevanz eine sinnfällige dritte Komponente identifiziert werden.

Mittels eines Iterationsverfahrens werden dann die Parameterwerte ermittelt, für die sich eine optimale Übereinstimmung zwischen der beobachteten Häufigkeitsverteilung und der Summe der berechneten Komponentenhäufigkeiten ergibt (vgl. Gl. 2). Die Güte der auf diese Weise erzielten Übereinstimmung zwischen den beobachteten Häufigkeitsverteilungen und den berechneten Summenkurven war mit Korrelationskoeffizienten von $r^2=0,98$ oder höher außerordentlich zufriedenstellend.

Die bei niedrigeren Konzentrationen dominante lognormalverteilte Komponente wird generell der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugeschrieben (siehe Abb. 5). Diese ist für das Beispiel der Natriumkonzentrationen in den Sanden und Kiesen des Norddeutschen Flachlandes (Abb. 2) eindeutig identifizierbar. Die natürliche Komponente repräsentiert die Auswirkungen aller Einflussfaktoren, welche die Grundwasserbeschaffenheit großräumig bestimmen. Dies sind überwiegend die geogenen (hydrologische, pedologische, biologische) Einflüsse und die Einflüsse einer ubiquitären Überprägung. In diesem Sinne entspricht dieser, hier im weiteren als „*natürliche Komponente*“ bezeichnete Anteil weitgehend der „*natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit*“ im Sinne der in Kap. 2.1 vorgenommenen Begriffsbe-

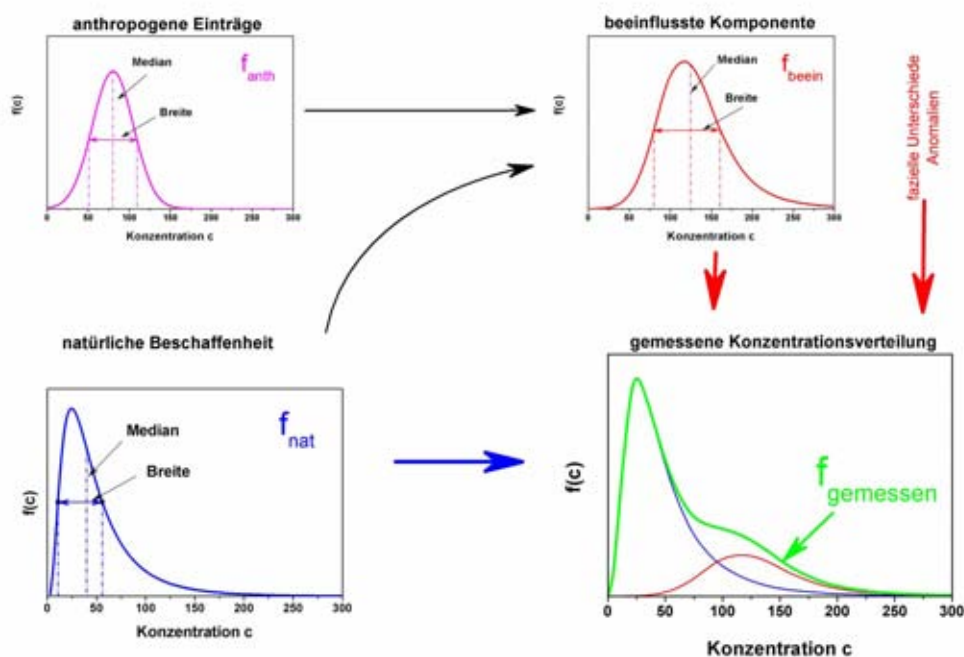


Abb. 5: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Form der gemessenen Konzentrationsverteilung.

stimmung. Ist eine zweite Komponente bei höheren Konzentrationen auszugliedern, kann diese im Allgemeinen als Konsequenz den Wirkungen aller anderen Einflussfaktoren auf die Grundwasserbeschaffenheit zugeordnet werden (siehe Abb. 5). Damit repräsentiert diese Komponente die Überlagerung von beeinflussten und unbeeinflussten Einflüssen auf die Grundwasserbeschaffenheit sowie die auf lokaler Skala wirkenden, als „untypisch“ bzw. „anormal“ einzustufenden lithogenen Einflüsse. In diesem Sinne wird dieser Anteil der beobachteten Verteilung eines Grundwasserparameters im Weiteren als „*beeinflusste Komponente*“ bezeichnet.

Neben dem allgemeinen Fall der eindeutigen Identifizierung einer natürlichen und beeinflussten Komponente treten auch Sonderfälle auf. Ist beispielsweise nur eine einzige Komponente zu identifizieren, so kann zunächst keine Aussage darüber getroffen werden, ob das gemessene Konzentrationsprofil geogen bedingt oder ubiquitär überprägt ist. In diesem Fall müssen für die Identifizierung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit unabhängige Informationen hinzugezogen werden. Doch auch das Auftreten von zwei Komponenten muss nicht notwendigerweise bedeuten, dass eine Beeinflussung vorliegt. Geogene fazielle Unterschiede in den hydrogeologischen Bezugseinheiten können bei einzelnen Grundwasserparametern zu mehrkomponentigen Konzentrationsverteilungen führen. Ein Beispiel hierfür ist die geogene bimodale Konzentrationsverteilung von Calcium und Magnesium im Grundwasser der Kalksteine des Oberen Jura, die durch einen unterschiedlichen Dolomitierungsgrad hervorgerufen wird (siehe KUNKEL ET AL. 2002). Auch unterschiedliche Redoxverhältnisse im Grundwasser können zu geogenen mehrkomponentigen Konzentrationsverteilungen führen, wie die Fe (II)-, Mn (II)-, Sauerstoff- oder auch Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen in den Lockergesteinsaquiferen des Norddeutschen Flachlandes zeigen (siehe Kapitel 6.1). Um eine korrekte Interpretation der beobachteten Konzentrationsprofile vornehmen zu können, müssen daher die hydrochemischen Verhältnisse in der betrachteten Einheit als Ganzes berücksichtigt werden. Es müssen insbesondere auch die Konzentrationsverteilungen anderer Grundwasserparameter in die Interpretation einbezogen werden. Eine unreflektierte Anwendung des Verfahrens, in der dies nicht angemessen berücksichtigt wird, kann in diesem Sinne zu unzutreffenden Aussagen führen.

4.3 Spannbreiten der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit

Die natürliche Grundwasserbeschaffenheit wird durch Konzentrationsbereiche charakterisiert. Die Konzentrationsbereiche werden über Perzentile quantifiziert, die sich aus einer statistischen Analyse Konzentrationsverteilungen der Grundwasserparameter ergeben. Beim rangstatistischen Verfahren werden ausschließlich die aufgetretenen Werte einer empirischen, aus einem Präselektionsverfahren ermittelten Häufigkeitsverteilung berücksichtigt. In diesem Sinne ist der kleinste bzw. größte Wert der ausgewerteten Häufigkeitsverteilung immer auf einen tatsächlich beobachteten Wert bezogen. Dies gilt auch für die Perzentile, so dass nicht beobachtete Zwischenwerte auch nicht als Perzentile ausgewiesen werden können.

Bei der Komponentenseparation wird die beobachtete Häufigkeitsverteilung durch Verteilungsfunktionen beschrieben. Hierbei ist keine hydrochemische Präselektion erforderlich, so dass alle zur Verfügung stehenden Grundwasseranalysen ausgewertet werden können. Das Ergebnis stützt sich vornehmlich auf Messwerte, die mit hoher Häufigkeit auftreten, so dass der Einfluss von Ausreißern, unrealistisch hohen (z.B. durch fehlerhafte hydrogeologische Zuordnung) oder fehlerhaften Werten im Allgemeinen vernachlässigbar ist. Als Ergebnis erhält man die charakteristischen Kenngrößen einer Wahrscheinlichkeitsfunktion, die der natürlichen Komponente der beobachteten Häufigkeitsverteilung entspricht. Damit gibt sie an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Konzentrationswert als „natürlich“ anzusehen ist und zwar unabhängig davon, ob die betreffende Konzentration im Datensatz auch tatsächlich enthalten war. Dies ist mit einem rangstatistischen Verfahren nicht ohne weiteres möglich.

Da eine Verteilungsfunktion formal für alle Konzentrationen von 0 bis ∞ definiert ist, stellt sich auf der anderen Seite die Frage, wie man einen „typischen“ Konzentrationsbereich definieren kann. Generell ist die Form der Verteilung durch die Verteilungsparameter Median und Streubreite definiert, so dass die Angabe der Zahlenwerte dieser Parameter eigentlich ausreicht, um die natürliche Komponente vollständig zu beschreiben. Diese beiden Größen sind jedoch wenig anschaulich und ermöglichen es nicht direkt, die hier ermittelten Werte mit den Ergebnissen anderer Studien oder Literaturwerten zu vergleichen. Konzentrationsspannbreiten, die auf der Basis bestimmter Perzentile der Verteilung der natürlichen Komponente ermittelt werden, sind hierfür wesentlich geeigneter. Zwei Perzentile beschreiben die Verteilung der

natürlichen Komponente genauso vollständig wie Median und Streubreite, so dass man bei der Wahl der Perzentile frei ist. Bei der hier durchgeführten rangstatistischen Analyse sowie einer Anzahl von früher durchgeführter Studien (LFU BW 1994, HLFU 1998, LUA BB 1996, LUNG 1996) wurden als „typische“ Perzentile das 10. und 90. Perzentil der Verteilungen angegeben. Aus Gründen der Übertragbar- und Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden deshalb auch hier Konzentrationsspannbreiten angegeben, die auf diesen beiden Perzentilen beruhen.

5

Datenbasis

Die Auswertungen wurden ausschließlich auf der Basis von Datenbeständen durchgeführt, die von den Bundesländern digital zur Verfügung gestellt wurden. Hierzu standen Grundwasserdaten der Länder Baden-Württemberg, Bayern, Berlin, Brandenburg, Bremen, Hamburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen zur Verfügung.

Bei der Datenakquisition wurde besonderer Wert darauf gelegt, Grundwasserdaten mit einer möglichst großen Bandbreite erfasster Parameter zur Verfügung gestellt zu bekommen. Dies konnte auch weitgehend erreicht werden: Stammdaten, Milieu- und Summenparameter, Haupt- und Nebeninhaltsstoffe sowie die wichtigsten Spurenstoffe wurden von allen oben aufgeführten Bundesländern zur Verfügung gestellt und von den Autoren in einer Datenbank zusammengeführt. Aufgrund unterschiedlicher Beprobungsstrategien der Länder bzw. unterschiedlicher Probennahmedaten waren für eine Reihe von Spurenstoffen und insbesondere die künstlichen Stoffe keine länderübergreifenden Daten verfügbar. Die Parameter, die in die länderübergreifende Auswertung einbezogen wurden, sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Übersicht über die in die Auswertung eingehenden Parameter.

Stammdaten	Milieu- und Summenparameter	Hauptinhaltsstoffe	Nebeninhaltsstoffe	Spurenstoffe
Lagekoordinaten	el. Leitfähigkeit	Natrium	Ammonium	Aluminium
Bezeichnung	Sauerstoff	Kalium	Eisen (II)	Arsen
Messstellen-ID	pH-Wert	Calcium	Mangan (II)	Bor
Messstellenart	DOC	Magnesium	Orthophosphat	Blei
Filterangaben		Chlorid		Cadmium
Hydrogeologie		Sulfat		Chrom
Stratigrafie		Hydrogenkarbonat		Kupfer
Petrografie		Nitrat		Nickel
Datenherkunft				Nitrit
				Quecksilber
				Zink
				weitere ...

5.1 Verwendete Primärdatenbestände der Länder

Die in die Auswertungen eingeflossenen Datensätze wurden von den Dienststellen der jeweiligen Bundesländer bis Dezember 2003 an die Autoren übermittelt. Während dieser Zeit wurden durch eine Reihe von Gesprächen in den jeweiligen Landesdienststellen zusätzliche Hintergrundinformationen über die Besonderheiten der Datensätze und die Strategie der Auswahl der Grundwassermessstellen zusammengetragen. Nach Abschluss der Datenübergabe durch die Länder lagen insgesamt 159745 Proben von 40314 Grundwassermessstellen vor. Diese wurden aufbereitet, homogenisiert und in einer Projektdatenbank zusammengeführt.

Baden-Württemberg

Aus Baden-Württemberg wurden Grundwasserdaten von der *Landesanstalt für Umweltschutz* (LfU BW) zur Verfügung gestellt. Hierbei handelt es sich um 2807 Grundwassermessstellen und Quellen des differenziert aufgebauten Landesmessnetzes, aber auch um Daten von Wasserversorgern und anderen Betreibern aus dem Zeitraum von 1990 bis 1999. Die Struktur der Messnetze ist in den jährlich herausgegebenen Berichten des Landesamtes detailliert beschrieben (z.B. LfU BW 2003). Für jede Grundwassermessstelle waren die geographische Lage, die Messstellenart und meist auch der Filterausbau und die Entnahmetiefe angegeben. Weiterhin lag eine stratigrafische Einordnung vor. Tiefe, aus mehreren Stockwerken stammende oder hoch mineralisierte Grundwassermessstellen waren gesondert gekennzeichnet und wurden bei der Auswertung nicht weiter betrachtet. In den 16931 Proben waren insgesamt 51 Grundwasserparameter erfasst, für die statistische Angaben, wie z.B. Anzahl der Analysen, Anzahl der Überschreitungen pro Warn- bzw. Grenzwert, Extrem-, Perzentil- sowie Mittelwerte vorlagen.

Bayern

Aus Bayern wurden sowohl vom *Landesamt für Wasserwirtschaft* (LfW BY), als auch vom *Geologischen Landesamt* (BayGLA) Grundwasserdaten zur Verfügung gestellt. Die Daten des LfW BY entstammen dem Landesmessnetz *Grundwasserbeschaffenheit* des LfW BY und umfassen 241 Grundwassermessstellen mit insgesamt 7552 Proben aus dem Zeitraum von 1990 bis 1999. Für jede Grundwassermessstelle lagen der Rechts- und Hochwert sowie die hydrogeologische Zuordnung (BSLU 1993) vor. In den Proben waren 27 hydrochemische Parameter angegeben.

Der Datensatz des *Bayerischen Geologischen Landesamtes* beinhaltet Beschaffungsdaten aus 5779 Grundwasseraufschlüssen. Sie entstammen einer Datenbank, die zeitlich parallel im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes aufgebaut wurde (BAYGLA 2003). Es handelt sich hierbei überwiegend um Bohrungen und Brunnen von Eigenwasserversorgungsanlagen und kleineren Wasserwerken im ländlichen Raum, die sehr gut über die Landesfläche und die unterschiedlichen hydrogeologischen Einheiten Bayerns verteilt sind. Als Stammdaten waren die Grunddaten (Name und Kennnummer, gerundete Rechts- und Hochwerte) sowie die Messstellenhöhe und zum Teil die Entnahmetiefe angegeben. Darüber hinaus waren die Grundwassermessstellen durch eine sehr differenzierte hydrogeologische Zuordnung mit insgesamt 26 „Grundwassergroßeinheiten“ und nachgeordneten Untereinheiten bzw. hydrogeologischen Einheiten charakterisiert. Zur Verfügung standen insgesamt 6710 Proben, in denen 32 Grundwasserparameter spezifiziert waren.

Berlin

Die *Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin* (SenStadt BE) stellte sowohl Daten aus dem routinemäßig betriebenen Beschaffungsmessnetz als auch aus den hydrogeologischen Erkundungen tieferer Grundwasserleiter zur Verfügung. Der Datenbestand entstammt einer aktuell durchgeführten Untersuchung zur hydrogeochemischen Charakterisierung des Grundwassers in Berlin (SENSTADT 2002) aus dem Zeitraum von 1995 bis 2001 und repräsentiert vorwiegend das oberflächennahe, auch für die Trinkwasserversorgung der Stadt genutzte Grundwasser in Berlin. Die Daten der Erkundungen (sog. *Bohrprogramme Nord und Süd*, SENSTADT 1997) aus dem Zeitraum von 1970 bis 1980 repräsentieren in ihrer überwiegenden Mehrheit die tieferen, derzeit nicht für die Wasserversorgung genutzten, altquartären und tertiären Grundwasserleiter oberhalb des Rupeltons. Insgesamt lagen Angaben zu 3763 Proben aus 803 Grundwassermessstellen vor.

Brandenburg

Bei den vom *Landesumweltamt Brandenburg* (LUA BB) zur Verfügung gestellten Daten handelt es sich um hydrochemische Daten des HYRA-Datensatzes (Hydrogeologisch Relevante Aufschlüsse), der in der ehemaligen DDR angelegt und bis 1989 gepflegt wurde (LUA BB 1996a). Die Daten wurden im Rahmen von hydrogeologischen Erkundungsarbeiten zur Einrichtung von Wassergewinnungsanlagen für die öffentliche Trinkwasserversorgung erhoben. Die Grundwassermessstellen entstammen allen hydrogeologischen Einheiten des nord- und mitteldeutschen Lockergesteins bis zum Rupelton, weisen eine hohe räumlicher Dichte auf und repräsentieren

Verhältnisse, die zum Entnahmezeitpunkt als weitgehend anthropogen unbeeinflusst angesehen wurden (HANNAPPEL 1996). In der überwiegenden Mehrzahl handelt es sich um einfach ausgebaute Grundwassermessstellen, für die im Zeitraum von 1960 bis 1989 Einfach-, zum Teil aber auch Mehrfachbeprobungen vorgenommen wurden. Für Brandenburg umfasst der Datensatz 6201 Grundwassermessstellen mit jeweils einer undatierten Probe. Alle Grundwassermessstellen waren, neben den Grunddaten, durch Angaben zur hydrostratigrafischen Einheit und zur hydrogeologischen Struktur (Durchfluss-, Neubildungs- oder Entlastungsgebiet) charakterisiert. Darüber hinaus waren die Entnahmetiefe spezifiziert. Im Datensatz waren insgesamt 15 anorganische Grundwasserparameter angegeben.

Da im HYRA-Datensatz keine Angaben zu Spurenstoffen und Schwermetallen vorlagen, wurden zusätzlich aktuelle Daten des Landesmessnetzes Brandenburg aus dem Zeitraum von 1992 bis 2002 einbezogen. Für insgesamt 2491 Proben aus 266 Grundwassermessstellen, für die Rechts- und Hochwerte sowie die Entnahmetiefe spezifiziert waren, standen Konzentrationen für 9 Spurenstoffe und Schwermetalle in partikulärer bzw. gelöster Form zu Verfügung.

Bremen

Aus Bremen wurden durch den *Senator für Bau und Umwelt* (BauUm HB) für 146 Grundwassermessstellen 1231 Proben aus dem Zeitraum von 1996 bis 2002 zur Verfügung gestellt, in denen insgesamt 24 Grundwasserparameter erfasst waren. Hierbei handelt es um Grundwassermessstellen aus drei Messnetzen der Grundwassergüteüberwachung, die ausschließlich im oberflächennahen Grundwasserleiter verfiltert sind. Dabei werden 42 Grundwassermessstellen (Basis- und Trendmessnetz) halbjährlich mit jährlich variierendem Parameterumfang untersucht. Die restlichen 104 Grundwassermessstellen (ursprüngliche Brunnen der Notwasserversorgung) werden in jedem fünften Jahr beprobt.

Hamburg

Aus Hamburg wurden von der *Behörde für Umwelt und Gesundheit* (BUG HH) Daten von 103 Grundwassermessstellen aus dem oberflächennahen Grundwasser zur Verfügung gestellt (sog. *UPOG-Messnetz*, UHH 1998). Für jede Grundwassermessstelle waren die Rechts- und Hochwerte, die Entnahmetiefe sowie eine hydrogeologische Zuordnung, die vom *Geologischen Landesamt Hamburg* nach dem einheitlichen Schema für den norddeutschen Raum vorgenommen wurde, angegeben. Für diese Grundwassermessstellen lagen 972 Proben aus dem Zeitraum von 1993 bis 2002 vor, in denen 33 Grundwasserinhaltsstoffe analysiert wurden.

Hessen

Bei den Daten aus Hessen handelt es sich um Proben von 5699 Grundwassermessstellen aus der Grundwasserdatenbank des *Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie* (HLfU), die sowohl Daten von Wasserversorgern als auch die Grundwassermessstellen des Landesmessnetzes beinhaltet. Die hydrogeologische Zuordnung der Grundwassermessstellen erfolgte durch das HLfU anhand der in Hessen verwendeten regionalgeologischen Gliederung (HLfU 1998), die auch in einer Übersichtskarte im Maßstab 1:300 000 dokumentiert ist. Für 39 Grundwasserparameter standen 54568 zum Teil undatierte Analysen in Form von Mittelwerten und Medianen, zum Teil aber auch datierte Analysewerte zur Verfügung.

Mecklenburg-Vorpommern

Die vom *Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie des Landes Mecklenburg-Vorpommern* (LUNG MV) zur Verfügung gestellten Daten aus 4828 Grundwassermessstellen entstammen dem HYRA-Datensatz (LUNG 1996). Herkunft und Struktur sind identisch zu den bereits für Brandenburg beschriebenen Daten. Zusätzlich lagen Analysendaten von 10 Spurenelementen und Schwermetallen aus 82 Grundwassermessstellen des aktuellen Landesmessnetzes mit 553 Proben aus dem Zeitraum von 1992 bis 2001 vor.

Niedersachsen

Die vom *Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung* (NLfB) für das Bundesland Niedersachsen zur Verfügung gestellten Daten weisen eine große räumliche Dichte auf und entstammen den „*Wasserwirtschaftlichen Rahmenplanungen*“, die in Niedersachsen in den siebziger und achtziger Jahren zur Erkundung des wasserwirtschaftlichen Dargebotes durchgeführt wurden (mdl. Auskunft, J. Baumann, NLfB). Vom NLfB wurde der Gesamtdatenbestand zur Verfügung gestellt, der insgesamt 15972 Proben aus dem Zeitraum von 1954 bis 2000 von 5673 Grundwassermessstellen umfasst. Bei den Stammdaten waren die Grunddaten (Kennnummer und/oder Name sowie Rechts- und Hochwert der Messstelle), die verfilterten Tiefenlagen und die zugehörigen stratigrafischen Einordnungen spezifiziert. Die stratigrafischen Angaben wurden zusammen mit der *Quartärgeologischen Übersichtskarte von Niedersachsen und Bremen* (NLfB 1995) für die hydrogeologische Einordnung der Messstellen verwendet. Messstellen, die den hier betrachteten hydrogeologischen Einheiten nicht eindeutig zugeordnet werden konnten oder mehreren Einheiten entstammen, wurden aus der Auswertung herausgenommen. Analysiert waren insgesamt 62 anorganische Elemente, Milieu- und Summenparameter.

Nordrhein-Westfalen

Aus Nordrhein-Westfalen wurden für das Projekt Stamm- und Beschaffenheitsdaten aus unterschiedlichen Quellen zur Verfügung gestellt. Entsprechend dem an das *Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen* (LUA NW) herangetragenen Wunsch, eine möglichst breite und die hydrogeologische Vielfalt des Landes abdeckende Spanne an Daten verwenden zu wollen, wurden Daten zu Grundwasseraufschlüssen aus der landesweiten Grundwasserdatenbank (MUNLV 2002) zur Verfügung gestellt. Es lagen Stamm- und Probedaten für 1806 Grundwassermessstellen vor, wobei zum Teil keine stratigrafische Einordnung durch das LUA vorgenommen wurde. Diese erfolgte im Zuge der Datenaufbereitung auf der Basis unabhängiger Quellen (siehe Kapitel 5.2). In den 22643 zur Verfügung gestellten Proben aus dem Zeitraum von 1984 bis 2002 waren 34 anorganische Elemente und Summenparameter erfasst.

Rheinland-Pfalz

Die Grundwasserdaten aus Rheinland-Pfalz entstammen der Grundwasserdatenbank des *Landesamtes für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz* (LfW RP). Diese enthält, analog zu Hessen, sowohl Daten von Wasserversorgern als auch Daten des Landesmessnetzes (LfW RP 2001) aus dem Zeitraum von 1992 bis 2003. Für 1394 Grundwassermessstellen, für die Grunddaten, Entnahmetiefe, hydrogeologische Lage, Landnutzung und Messstellenart spezifiziert wurden, lagen 4931 Proben mit bis zu 40 analysierten Grundwasserparametern vor.

Sachsen

Die vom *Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie* (LfUG SN) zur Verfügung gestellten Daten entstammen den aktuellen sächsischen Messnetzen (LfUG SN 2002) sowie Wasserwerken und anderen Betreibern. Die 582 Grundwassermessstellen des sächsischen Messnetzes entstammen sowohl dem Grund-, als auch verschiedenen Sondermessnetzen (z.B. Nitratmessnetz). Die restlichen 873 Grundwasseraufschlüsse entstammen zumeist den Datenbeständen von Wasserversorgern und sind sehr heterogener Struktur. Für jede Grundwassermessstelle lag eine repräsentative Probe vor, in der bis zu 36 Grundwasserparameter angegeben waren.

Sachsen-Anhalt

Vom *Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt* (LAU SA) lagen sowohl Daten aus dem bereits beschriebenen HYRA-Datensatz als auch aktuelle Daten des Landesmessnetzes vor. Letztere umfassen 1279 Proben mit bis zu 31 Grundwasserparametern von 120 Grundwassermessstellen, welche zumeist in den letzten Jahren

im Zuge der Messnetzrekonstruktion in Sachsen-Anhalt neu errichtet wurden (LAU SA 1998). Neben den Stammdaten liegen hydrogeologische Zuordnungen vor.

Die wesentlich größere Datenmenge aus dem Locker- und dem Festgesteinsbereich (2669 Proben aus 2220 Grundwassermessstellen) entstammt dem HYRA-Datensatz. Dieser enthält allerdings nur 15 Hauptinhaltsstoffe und Summenparameter. Die hydrogeologische Zuordnung wurde im Zuge der Arbeiten zum landesweiten „Grundwasserkataster nach Menge und Beschaffenheit in Sachsen-Anhalt“ vorgenommen (HANNAPPEL ET AL. 1999).

Schleswig-Holstein

Die vom *Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein* (LANU SH) zur Verfügung gestellten Grundwasserdaten stammen sowohl dem Landesmessnetz als auch Beständen der Wasserversorger. Die 40 Grundwassermessstellen des Landesmessnetzes sind dem „*Oberen Grundwasserleiter*“ zuzuordnen, welcher in Schleswig-Holstein überwiegend Neubildungsbeeinflusstes Grundwasser führt (LANU SH 2002). Hier lagen 485 Proben aus dem Zeitraum von 1985 bis 2002 mit bis zu 41 beprobten Grundwasserparametern vor.

Die Daten der übrigen 329 Grundwasseraufschlüsse entstammen Rohwasseranalysen von Wasserwerksbrunnen, die ebenfalls im Oberen Grundwasserleiters mit einer angegebenen Tiefenlage bis maximal 70 Meter unter Gelände ausgebaut sind. Für jeden Brunnen waren Mittelwerte von bis zu 28 Grundwasserparametern aus langjährigen Analyse-Reihen angegeben.

Thüringen

Auch für das Bundesland Thüringen wurden von der *Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie* (TLUG) Daten dem HYRA-Datensatz und Daten aus den aktuellen Monitoring-Messnetzen (TLUG 1997) zur Verfügung gestellt. Bei den 1343 Grundwassermessstellen der HYRA-Daten lagen die Grunddaten, Aufschlussart, Filtertiefen und -längen, weitere Ausbaudaten sowie eine tiefenabhängige stratigraphische Einordnung vor. Analog zu den Grundwasserdaten aus Niedersachsen wurde die hydrogeologische Zuordnung der Messstellen auch hier auf Grundlage der angegebenen Bohrungsstratigrafien und der Ausbaudaten vorgenommen. Es wurden nur Messstellen berücksichtigt, für die eine eindeutige Zuordnung zu den betrachteten Einheiten möglich war. Es lagen insgesamt 2141 Proben aus dem Zeitraum von 1960 bis 1989 mit einer großen Vielfalt analysierter Grundwasserparameter vor.

Für die 274 Grundwassermessstellen der aktuellen Messnetze (Grundmessnetz, Sondermessnetze) lagen 3754 Proben aus dem Zeitraum von 1992 bis 2002 mit bis zu 53 erfassten Grundwasserparameter vor. Die Stammdaten beinhalteten, neben den Grunddaten, Bohrungs- und Ausbaudaten inklusive der Filterlagen und -breiten, auch Angaben zur anthropogenen Beeinflussung sowie der stratigrafischen und lithostratigrafischen Klassifizierung.

5.2 Datenaufbereitung

5.2.1 *Hydrogeologische Zuordnung der Grundwassermessstellen*

In einem ersten Schritt wurde eine Zuordnung der von den Ländern zur Verfügung gestellten Grundwassermessstellen zu den hydrogeologischen Einheiten vorgenommen. Hierzu wurden in erster Linie die Informationen genutzt, die in den Stammdaten zu den Grundwassermessstellen bereits enthalten waren. Dies waren stratigrafische, hydrogeologische oder lithologisch/petrografische Angaben, wie beispielsweise die im jeweiligen Bundesland verwendete Grundwassereinheit. Waren derartige Angaben nicht vorhanden, wurde eine Zuordnung über die Lagekoordinaten der Grundwassermessstellen und Informationen zum Filterausbau anhand der folgenden analogen oder digitalen geologisch-hydrogeologischer Karten bzw. Daten vorgenommen. War keine eindeutige Zuordnung zu einer hydrogeologischen Einheit möglich, wurde die betreffende Grundwassermessstelle nicht weiter ausgewertet. :

- „*Internationale Hydrogeologische Karte von Europa*“ (IHME), Blätter Berlin und Bern (BGR 1990),
- „*Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1:1000000*“ (BGR 1993),
- digitale Karte „*Hydrogeologische Großräume, Räume und Teilräume*“ der Bundesrepublik Deutschland (UAG EU-WRRL 2002a),
- „*Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland 1:200000*“, HÜK 200, (BGR 2003),
- Tabellen zur Hydrostratigrafie des Mesozoikums und Paläozoikums (UAG EU-WRRL 2002b),
- „*Quartärgeologische Übersichtskarte von Niedersachsen und Bremen*“ (NLfB 1991),

- „Geologische und hydrogeologische Übersichtskarte von Sachsen“ (LFUG SN 1992, 2003),
- „Hydrogeologische Übersichtskarte von Sachsen-Anhalt 1:400000“ (GLA SA 1996),
- „Hydrogeologisches Kartenwerk Hessen 1:300000“ (HLFB 1991).

5.2.2 Homogenisierung der Messgrößen

Die gemessenen Beschaffenheitsdaten wurden für eine Reihe von Parametern in den einzelnen Datensätzen über unterschiedliche Analyseverfahren ermittelt. Der Summenparameter *DOC* wurde beispielsweise je nach Alter und Herkunft der Grundwasseranalyse entweder direkt, über die Oxidierbarkeit mit Kaliumpermanganat oder über die Oxidierbarkeit mit Kaliumdichromat bestimmt. Ähnliches galt auch für die *elektrische Leitfähigkeit*, die in manchen (in der Regel alten) Datensätzen über den Abdampfrückstand und in anderen Datensätzen über den elektrischen Widerstand der Probe bestimmt wurde. In diesen Fällen wurden die vorliegenden Konzentrationsangaben über Umrechnungsfaktoren (z.B. KÖLLE 2001) ineinander überführt.

5.2.3 Plausibilitätskontrollen

Ziel der hydrochemischen Plausibilitätskontrollen ist es, aus den verschiedenen Datenquellen die Grundwasseranalysen aufzufinden und auszusortieren, die mögliche Mess- oder Eingabefehler aufweisen bzw. a priori nicht ausgewertet werden sollen. Hierzu existiert eine Reihe von Kriterien die, z.B. in DVWK (1999) aufgeführt sind. In der Regel konnte für die von den Ländern übermittelten Datensätze davon ausgegangen werden, dass die Prüfvorgänge bereits stattgefunden haben. Dennoch wurde als zusätzliche Qualitätskontrolle eine analysenbezogene Ionenbilanz nach DVWK (1999) und eine einzelparameterbezogene Ausreißerprüfung nach UBA (2000) durchgeführt. Hierzu wurden in einem ersten Schritt die Summen der analytisch gefundenen Kationen- und Anionenäquivalente ermittelt:

$$\begin{aligned} \sum \text{Kationen} &= 2[\text{Ca}^{2+}] + 2[\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^{+}] + [\text{K}^{+}] + [\text{NH}_4^{+}] + 2[\text{Fe}^{2+}] + 2[\text{Mn}^{2+}] \\ \sum \text{Anionen} &= [\text{HCO}_3^{-}] + [\text{NO}_3^{-}] + 2[\text{SO}_4^{2-}] + x[\text{PO}_4^{3-}] \end{aligned} \quad \text{Gl. 6}$$

Die eckigen Klammern bezeichnen die molare Konzentration des jeweiligen Grundwasserinhaltsstoffes. Für Phosphorsäure liegt eine vom pH-Wert abhängige Dissoziation vor. Die für PO_4 anzusetzende Wertigkeit (x) liegt im Bereich von 1,1 (pH 6) und 1,88 (pH 8) (KÖLLE 2001).

Im nächsten Schritt wurde der Ionenbilanzfehler berechnet (MATTHESS 1990):

$$\Delta I[\%] = 200 \cdot \frac{\sum \text{Kationen} - \sum \text{Anionen}}{\sum \text{Kationen} + \sum \text{Anionen}} \quad \text{Gl. 7}$$

Im Hinblick auf die Heterogenität der zur Verfügung stehenden Datensätze, die unterschiedlichen Entnahmezeiträume und die damit verbundenen Unterschiede in der jeweiligen Analytik wurden Proben dann verworfen, wenn der Ionenbilanzfehler mehr

Tabelle 2: Überblick über den zur Verfügung stehenden und den sich nach den einzelnen Homogenisierungsschritten und Plausibilitätstests ergebenden Datenbestand.

Bundesland	Zur Verfügung gestellte Grundwassermessstellen	Zur Verfügung gestellte Proben	Grundwassermessstellen in betrachteten Einheiten
Baden-Württemberg	2807	16931	2151
Bayern (GLA)	5799	6710	4885
Bayern (LFW)	241	7552	213
Berlin	803	3763	362
Brandenburg	5756	7598	4406
Bremen	146	1231	118
Hamburg	103	972	101
Hessen	5699	54568	3378
Meck.-Vorpommern	4306	4762	2386
Niedersachsen	5673	15972	3039
Nordrhein-Westfalen	1806	22643	1229
Rheinland-Pfalz	1394	4931	845
Sachsen	1455	1455	777
Sachsen-Anhalt (LAU)	120	1279	90
Sachsen-Anhalt (HYRA)	2220	2669	1370
Schleswig-Holstein (LANU)	40	485	37
Schleswig-Holstein (WW)	329	329	131
Thüringen (HYRA)	1343	2141	266
Thüringen (TLUG)	274	3754	105
Summe:	40314	159745	25889

als $\pm 10\%$ beträgt. Unabhängig hiervon wurden durch eine Ausreißerprüfung unplausible Einzelwerte, die häufig die Folge von Dimensions- und Kommafehlern sind, identifiziert und eliminiert. Diese Prüfung entspricht dem für die Datenbank „Grundwasser“ (UBA 2000) am Umweltbundesamt entwickelten Verfahren. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die sich aus den oben beschriebenen Homogenisierungsschritten ergebende Reduktion des Datenbestandes.

5.2.3 *Behandlung von Zeitreihen*

Für viele der Grundwassermessstellen lagen Mehrfachbeprobungen vor. Diese Zeitreihendaten erlauben es, im Einzelfall Rückschlüsse über die zeitliche Entwicklung anthropogener Einflüsse auf die Grundwasserbeschaffenheit zu ziehen. Dies war jedoch nicht Ziel der hier durchgeführten Arbeiten. Hier sollten vielmehr aus relativ heterogenen Datensätzen mit unterschiedlichen Probenahmezeitpunkten typische Grundwasserverhältnisse für die jeweilige hydrogeologische Bezugseinheit abgeleitet werden. Die Einbeziehung von Zeitreihendaten würde dazu führen, dass häufiger beprobte Grundwassermessstellen einen stärkeren Einfluss auf das Gesamtergebnis haben als einfach beprobte Messstellen. Der für eine Grundwassermessstelle vorliegende Datenbestand musste daher auf eine „repräsentative“ Probe reduziert werden. Da die für eine Grundwassermessstelle vorliegenden Proben aus einem Zeitraum von mehreren Jahren bis hin zu Jahrzehnten stammen, ist davon auszugehen, dass die anthropogenen Einflüsse und der analysetechnische Stand bei der Probennahme auch bei einer Grundwassermessstelle sehr unterschiedlich sein können. Die Auswahl einer realen Analyse aus den bestehenden Zeitreihendaten schloss sich daher aus. Durch das Vorliegen von mehreren Tausend Messstellen- und Analysedaten hätte dies den Projektrahmen auch deutlich gesprengt.

Statt dessen wurde aus den Zeitreihendaten einer Messstelle durch Medianbildung eine repräsentative Analyse generiert. Nach Durchlaufen aller oben bereits beschriebenen Plausibilitätstests wurde der Median jedes Einzelparameters berechnet und als typischer Wert für die Messstelle angesetzt. Im Gegensatz zum arithmetischen Mittelwert ist der Median weitgehend unempfindlich gegenüber einzelnen Extrembeobachtungen. Einzelne verbleibende untypisch hohe oder niedrige Stoffkonzentrationen, z.B. aufgrund von Extrembeobachtungen, Falschanalysen oder Datenübermittlungsfehlern spielen, insbesondere beim Vorliegen einer größeren Anzahl von Analysen einer Messstelle, nur eine untergeordnete Rolle.

Darüber hinaus liefert der Median bei Grundwasserparametern, bei denen öfters Werte unterhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze angegeben sind, deutliche realistischere Werte als der Mittelwert. Dies betrifft an erster Stelle die Spurenstoffe und Schwermetalle, bei denen mit relativ hoher Häufigkeit Werte „unter Bestimmungsgrenze“ angegeben waren. In den Median gehen die Analysewerte nicht ein, solange sie unterhalb des 50. Perzentils der Verteilung liegen. Für die Mittelwertbildung muss hingegen jeder Analysewert mit einem konkreten Zahlenwert belegt sein. Die Schätzung des tatsächlichen Wertes bei der Angabe „unter Bestimmungsgrenze“ (z.B. $1/2 \cdot \text{Bestimmungsgrenze}$ oder $2/3 \cdot \text{Bestimmungsgrenze}$) wirkt sich direkt auf den Mittelwert aus, beim Median hingegen nur dann, wenn mehr als 50% der Werte unter der Bestimmungsgrenze liegen. In diesem Fall muss jedoch generell hinterfragt werden, in welchem Maße eine quantitative Auswertung der Analysen überhaupt sinnvoll ist.

5.3 Datenbasis nach Aufbereitung

Nach der Zuordnung der Messstellen zu den 17 betrachteten hydrogeologischen Bezugseinheiten, den Plausibilitätsprüfungen und der Eliminierung von Zeitreihen durch Medianbildung wurden insgesamt 25889 Grundwassermessstellen mit je einer Grundwasseranalyse ausgewertet (siehe Tabelle 2). Betrachtet man die vorliegenden Grundwasserdaten hinsichtlich der analysierten Grundwasserparameter, so stellt man fest, dass für die Milieuparameter sowie die Haupt- und Nebeninhaltsstoffe wesentlich mehr Analysen zur Verfügung stehen als für die Spurenstoffe. Wie Abb. 6 zeigt, lagen für die Milieuparameter sowie die Haupt- und Nebeninhaltsstoffe zwischen 15000 und 25000 Analysewerte vor. Für die Parameter Bor, Arsen, Aluminium und Phosphat war die Anzahl der Analysewerte mit 8000 bis 10000 deutlich geringer. Für die Schwermetalle (Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, Ni) lagen in der Regel noch Messwerte von ca. 4000 Messstellen vor, für die übrigen Spurenstoffe (Bi, Br, Co, F, J, Li, Sb, Si, Sn, Sr, Ag, Te) standen selten für mehr als 500 Grundwassermessstellen Analysewerte zur Verfügung. Darüber hinaus waren eine Reihe von Spurenstoffe nicht in allen von den Bundesländern übermittelten Datensätzen enthalten.

Karte 1 zeigt die regionale Verteilung der in die Auswertung eingeflossenen Grundwassermessstellen. Wie man sieht, liegt eine recht homogene Verteilung der Grundwassermessstellen über die Fläche der Bundesrepublik vor. Im Bereich des Nord-

und Mitteldeutschen Lockergesteinsgebietes sind Inhomogenitäten in der regionalen Verteilung zu erkennen, die aber in vielen Fällen auf hydrogeologische Ursachen zurückgeführt werden können. Grundwasserhöfliche oder wasserwirtschaftlich genutzte Aquifere weisen in der Regel eine höhere Messstellendichte auf als wasserwirtschaftlich unbedeutende Gebiete.

Für die Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe (Ca, Mg, Na, K, NH_4 , Fe(II), Mn(II), HCO_3 , Cl, SO_4 und NO_3), für die Summen- und Milieuparameter (el. Leitfähigkeit, O_2 , pH, DOC) sowie für fünf Spurenstoffe (PO_4 , Al, As, B, Zn) lagen genügend Daten vor, so dass die natürliche Grundwasserbeschaffenheit flächendeckend für die betrachteten hydrogeologischen Bezugseinheiten abgeleitet werden konnte. Aufbauend auf einer primärstatistischen Analyse der Daten, die einen Überblick über die typischen Wertespannen der Grundwasserparameter lieferte, wurden die Spannbreiten der natürlichen Grundwasserkonzentrationen für jede hydrogeologische Bezugseinheit und jeden Parameter ausgewiesen. Dies erfolgte parallel durch die Komponentenseparation und die hydrochemische Präselektion.

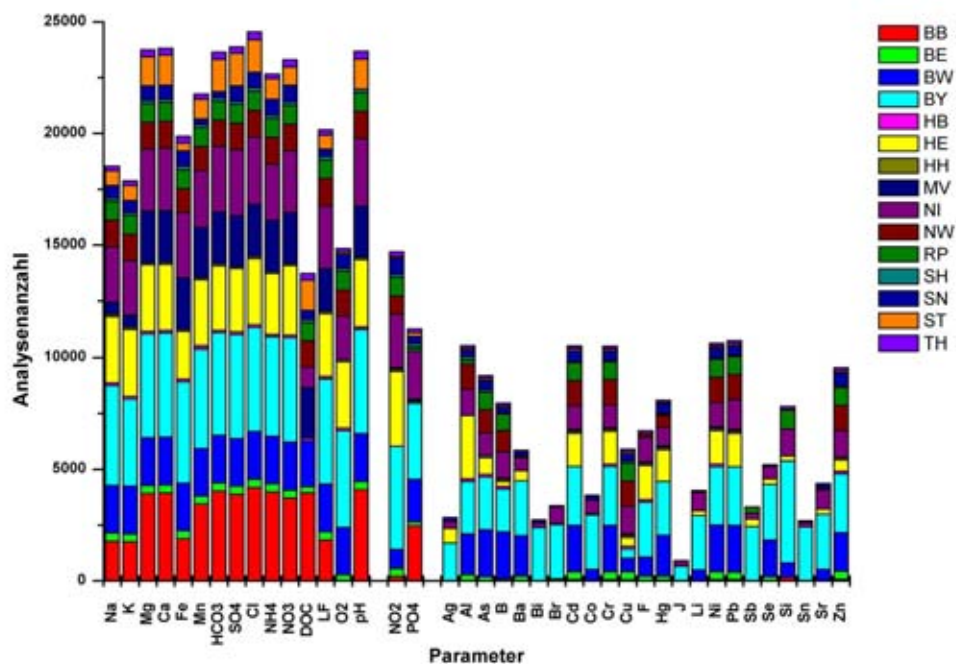
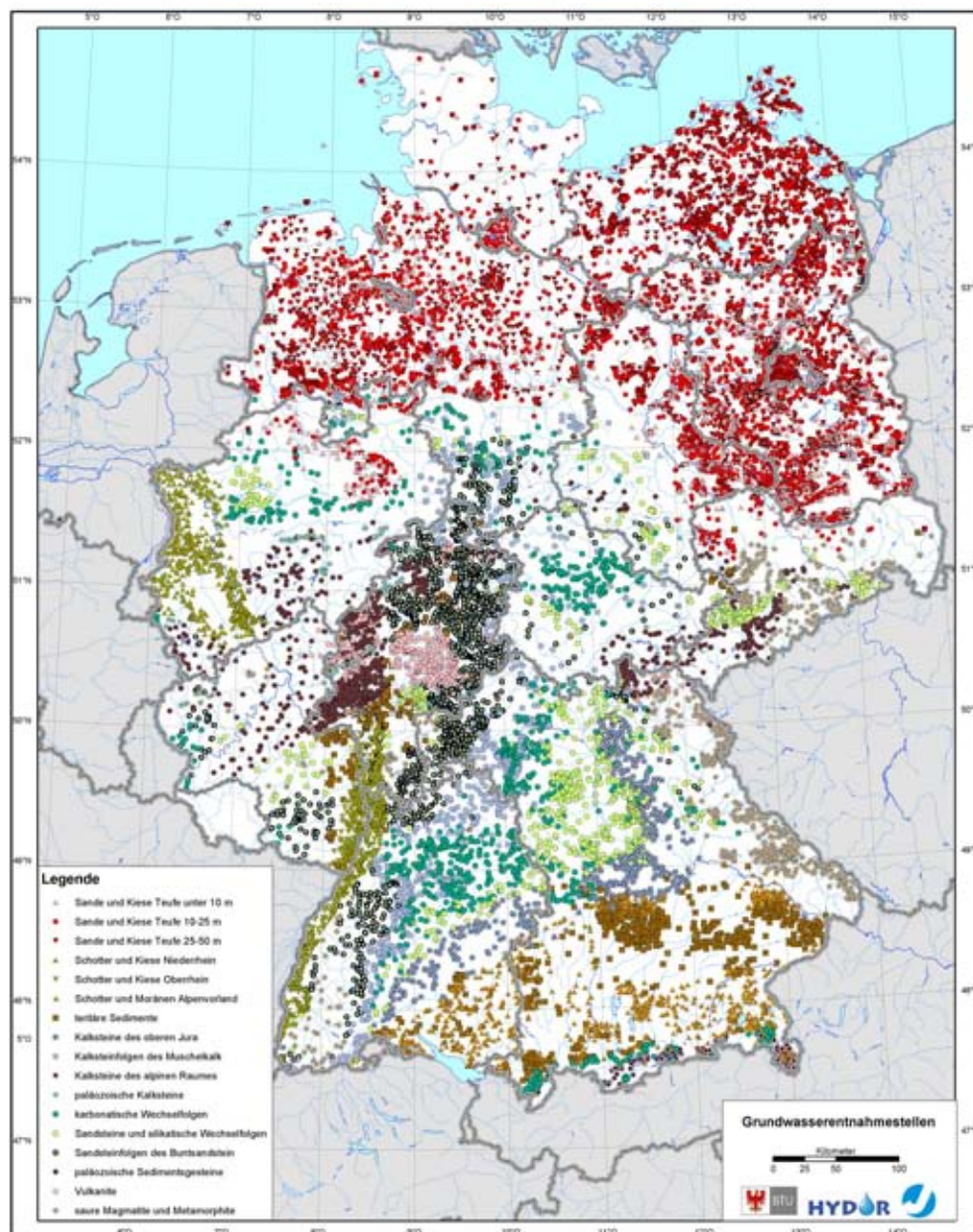
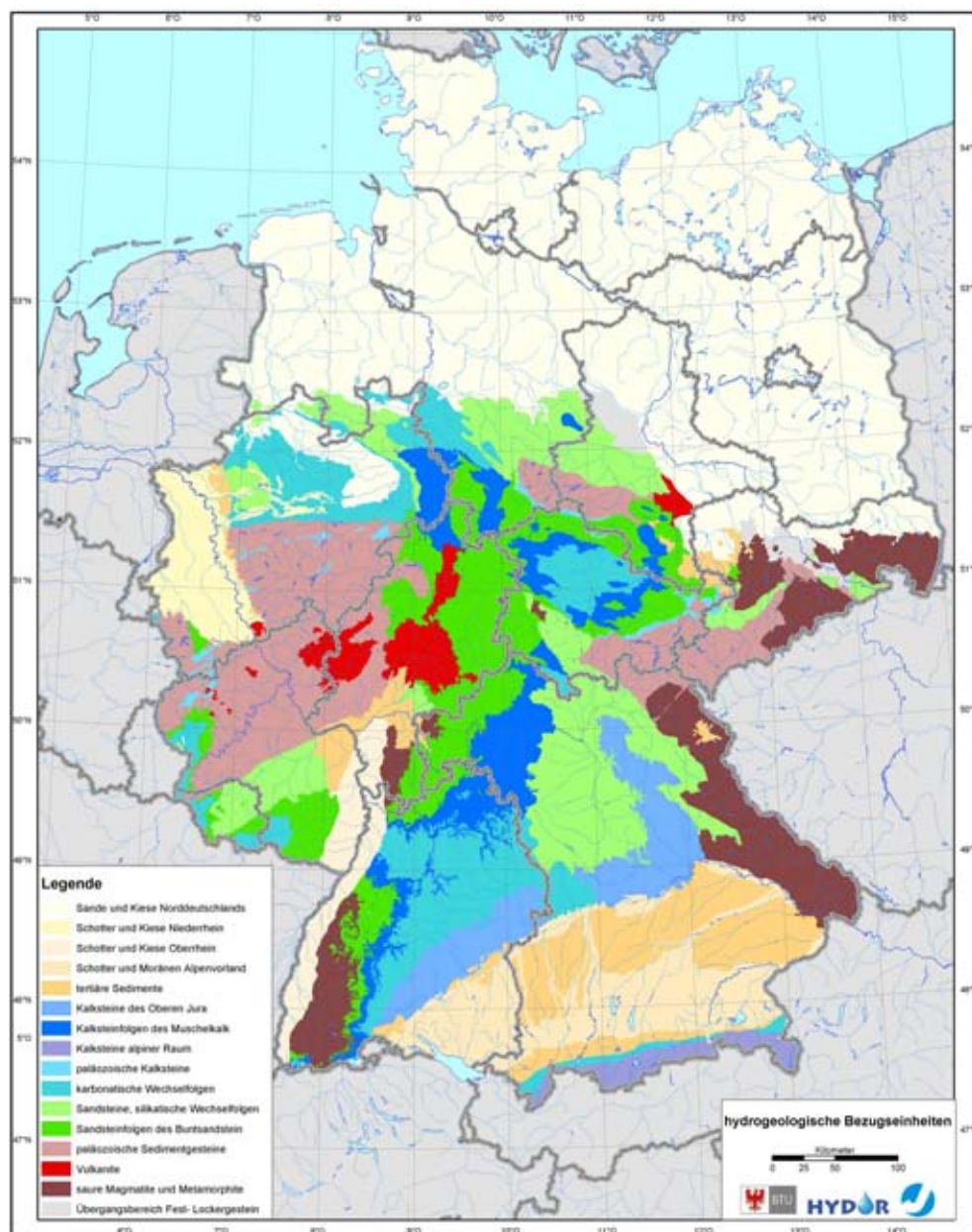


Abb. 6: Übersicht über die Anzahl der ausgewerteten Analysen für die einzelnen Grundwasserparameter aufgeschlüsselt nach Bundesländern.



Karte 1: Räumliche Verteilung der ausgewerteten Grundwassermessstellen.



Karte 2: Übersicht über die Hauptverbreitungsgebiete der hydrogeologischen Bezugseinheiten der Grundwassermessstellen.

Für 10 Parameter (Cd, Cr, Ni, Pb, Ba, Cu, Hg, NO₂, Se) lagen nur für einige hydrogeologische Bezugseinheiten länderübergreifend genügend Messwerte vor. Für diese Parameter wurden nach einer primärstatistischen Beschreibung der Daten nur im Einzelfall natürliche Grundwasserkonzentrationen ausgewiesen. Für 12 Parameter (Bi, Br, Co, F, J, Li, Sb, Si, Sn, Sr, Ag) lagen meist nur wenige Daten oder Daten aus einzelnen Bundesländern vor. Um zu vermeiden, dass Werte in die öffentliche Diskussion einfließen, die auf einer möglicherweise nicht repräsentativen Datenbasis beruhen, wurden für diese Parameter keine Hintergrundwerte angegeben.

5.4 Räumliche Darstellung der Bezugseinheiten

Die Differenzierung der Grundwasserleiter Deutschlands in 17 hydrogeologische Bezugseinheiten erfolgte primär auf der Basis der petrografischen, hydrogeologischen und geochemischen Verhältnisse der durchströmten Gesteinseinheiten. Die Zuordnung der Grundwassermessstellen erfolgte standortbezogen durch Informationen, die in den Stammdaten enthalten waren (siehe Kapitel 5.2.1). Basierend hierauf wurde auch die Ausweisung der Hintergrundwerte vorgenommen.

Unabhängig davon wurde eine Übersichtskarte der 17 hydrogeologischen Bezugseinheiten erstellt (Karte 2), der die ausgewerteten Grundwassermessstellen überlagert wurden. Als Basis hierfür diente die von den staatlichen geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland erarbeitete Karte der „*Hydrogeologischen Großräume des Locker- und Festgesteinsbereichs 1:200000*“ (BGR 2003). Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der räumlichen Generalisierung der HÜK nicht alle Grundwassermessstellen in den jeweiligen Flächeneinheiten der Übersichtskarte liegen. Dies spielt insbesondere im Festgesteinsbereich eine Rolle, bei dem die hydrogeologischen Verhältnisse oftmals sehr kleinräumig variieren. Die einer hydrogeologischen Bezugseinheit zugeordneten Polygone sind daher nicht in jedem Fall identisch mit dem in der HÜK200 ausgewiesenen Verbreitungsgebiet. Dies ist jedoch für die hier durchgeführten Auswertungen ohne Bedeutung, da die hydrogeologische Zuordnung der Grundwassermessstellen punktbezogen erfolgte. In diesem Sinne dient Karte 2 ausschließlich der groben Übersicht über die Hauptverbreitung der hydrogeologischen Bezugseinheiten im Hinblick auf die untersuchten Grundwassermessstellen.

6

Auswertungsergebnisse für die hydrogeologi- schen Bezugseinheiten

6.1 Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes

In der hydrogeologischen Bezugseinheit „*Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes*“ wurden die glazial geprägten Lockergesteinsgebiete nördlich der Mittelgebirge zusammengefasst. Diese Einheit wurde als Ergebnis einer im Vorfeld durchgeführten primärstatistischen Auswertung der Grundwasserdaten nach Tiefenstufen weiter differenziert. Die Auswertungsergebnisse für die unterschiedenen Tiefenstufen werden in den folgenden Abschnitten dokumentiert und in Kapitel 7.4 gemeinsam diskutiert.

6.1.2 *Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen unter 10 m*

In dieser hydrogeologischen Bezugseinheit wurden die oberflächennahen Grundwassermessstellen mit einem Filterausbau von weniger als 10 m unter Geländeoberkante betrachtet. Karte 3 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 3637 Grundwassermessstellen ausgewertet. In Abb. 7 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die unterschiedlichen Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn aus der Mehrzahl der zu dieser Einheit beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

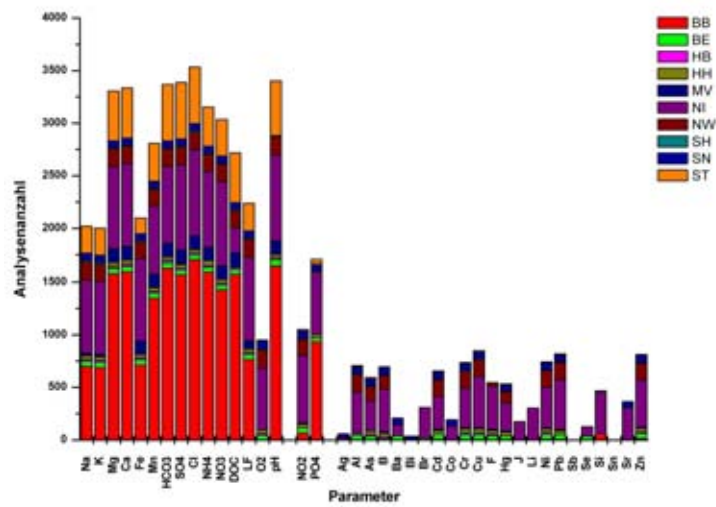


Abb. 7: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen unter 10 m“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 3: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen unter 10 m“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 3: Auswertungsergebnisse für die hydrogeologische Bezugseinheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen unter 10 m“.

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	2019	7,7	19,6	67	6,9	16,2	38,1	683	6,5	13,0	33,5
K	mg/l	2002	1,1	3,4	21,0	1,0	1,9	3,8	670	0,9	2,0	3,6
Mg	mg/l	3307	3,4	9,1	22,6	3,4	8,7	22,2	1405	3,0	6,8	15,6
Ca	mg/l	3337	27,2	71	150	27,1	71	153	1425	24,3	60	113
Fe	mg/l	2097	0,06	1,685	17,5	0,06	0,7	8,0	713	0,10	1,2	7,6
Mn	mg/l	2809	0,03	0,3	1,4	0,06	0,3	1,4	1193	0,04	0,2	0,8
HCO ₃	mg/l	3369	24,7	146	320	28,9	150	351	1476	30,5	137	262
SO ₄	mg/l	3387	24,0	89	231	7,0	36,4	189	1438	18,0	69	162
Cl	mg/l	3533	12,4	36,0	105	12,2	32,6	87	1528	10,0	25,0	57
NH ₄	mg/l	3154	0,06	0,2	2,0	0,011	0,03	0,1	1291	0,10	0,1	0,4
NO ₂	mg/l	1050	0,003	0,02	0,07	0,004	0,02	0,06	187	0,007	0,02	0,06
NO ₃	mg/l	3034	0,1	0,5	35,6	0,1	0,3	0,9	1244	0,1	0,1	2,2
PO ₄	mg/l	1705	0,001	0,05	0,5	0,01	0,04	0,11	667	0,001	0,05	0,2
DOC	mg/l	2720	1,1	3,1	11,0	1,0	3,0	8,8	1282	0,9	2,3	6,5
LF	µS/cm	2237	205	500	1034	226	474	993	781	176	353	645
O ₂	mg/l	951	0,2	0,9	6,5	0,2	1,0	6,0	123	0,2	0,8	5,8
H	µg/l	3401	0,01	0,1	2,0	0,01	0,03	0,2	1500	0,01	0,06	0,8
pH	-	3401	5,7	7,0	7,9	6,8	7,5	8,2		6,1	7,2	7,9
F	mg/l	546	0,06	0,1	0,3							
Br	mg/l	309	0,05	0,13	0,4							
J	mg/l	174	0,001	0,003	0,01							
Ag	µg/l	59	0,03	0,12	6,7							
Al	µg/l	708	6,7	70	753	9,1	50,7	283	71	5,0	60	410
As	µg/l	594	0,3	1,3	7,5	0,3	1,1	4,4	60	0,4	1,0	3,4
B	µg/l	696	9,17	60	220	14,3	58	233	77	10,0	30,0	78
Ba	µg/l	208	30,0	59	180							
Bi	µg/l	37	0,07	0,07	0,07							
Cd	µg/l	656	0,07	0,3	0,8	0,1	0,2	0,3	90	0,07	0,3	0,7
Co	µg/l	194	0,7	1,4	10,0							
Cr	µg/l	736	0,5	2,8	6,7	0,6	1,1	2,3	85	0,4	2,5	6,7
Cu	µg/l	848	0,7	3,0	10,0	1,0	3,1	10,1	99	0,7	3,3	10,0
Hg	µg/l	533	0,02	0,1	0,3	0,03	0,10	0,29	69	0,02	0,1	0,7
Li	µg/l	304	2,0	5,0	10,0							
Ni	µg/l	743	1,0	5,9	20,0	1,9	5,0	13,3	87	1,0	3,3	7,7
Pb	µg/l	818	0,7	2,0	6,7	0,84	1,9	4,3	96	0,7	2,7	6,7
Sb	µg/l	1	0,05	0,05	0,05							
Se	µg/l	128	0,7	2,0	3,33							
Si	mg/l	466	3,3	6,9	11,0							
Sn	µg/l											
Sr	µg/l	364	120	335	681							
Zn	µg/l	813	6,0	20,0	238	1,2	15,1	196	102	5,8	20,0	291

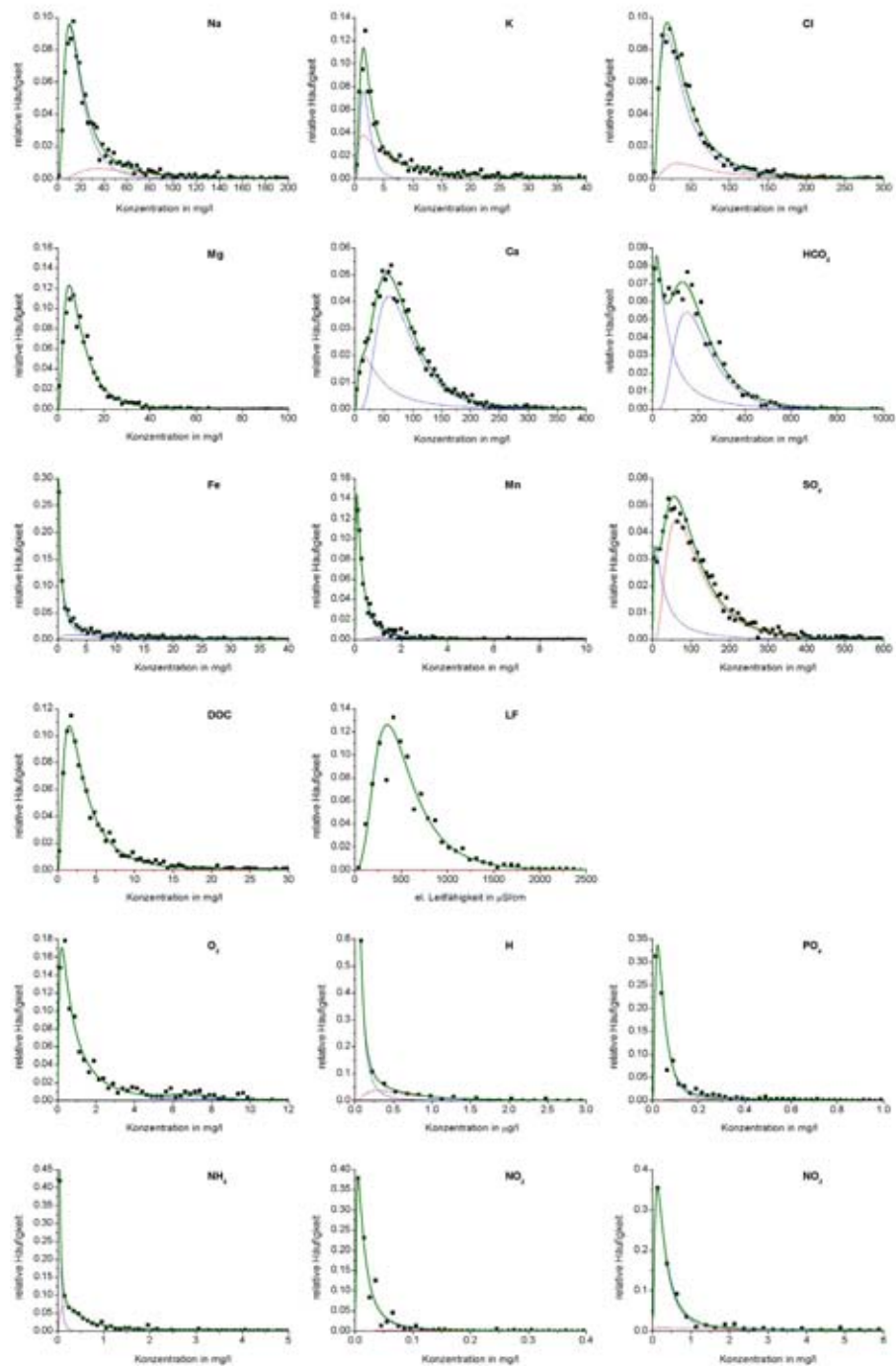


Abb. 8: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen unter 10 m“.

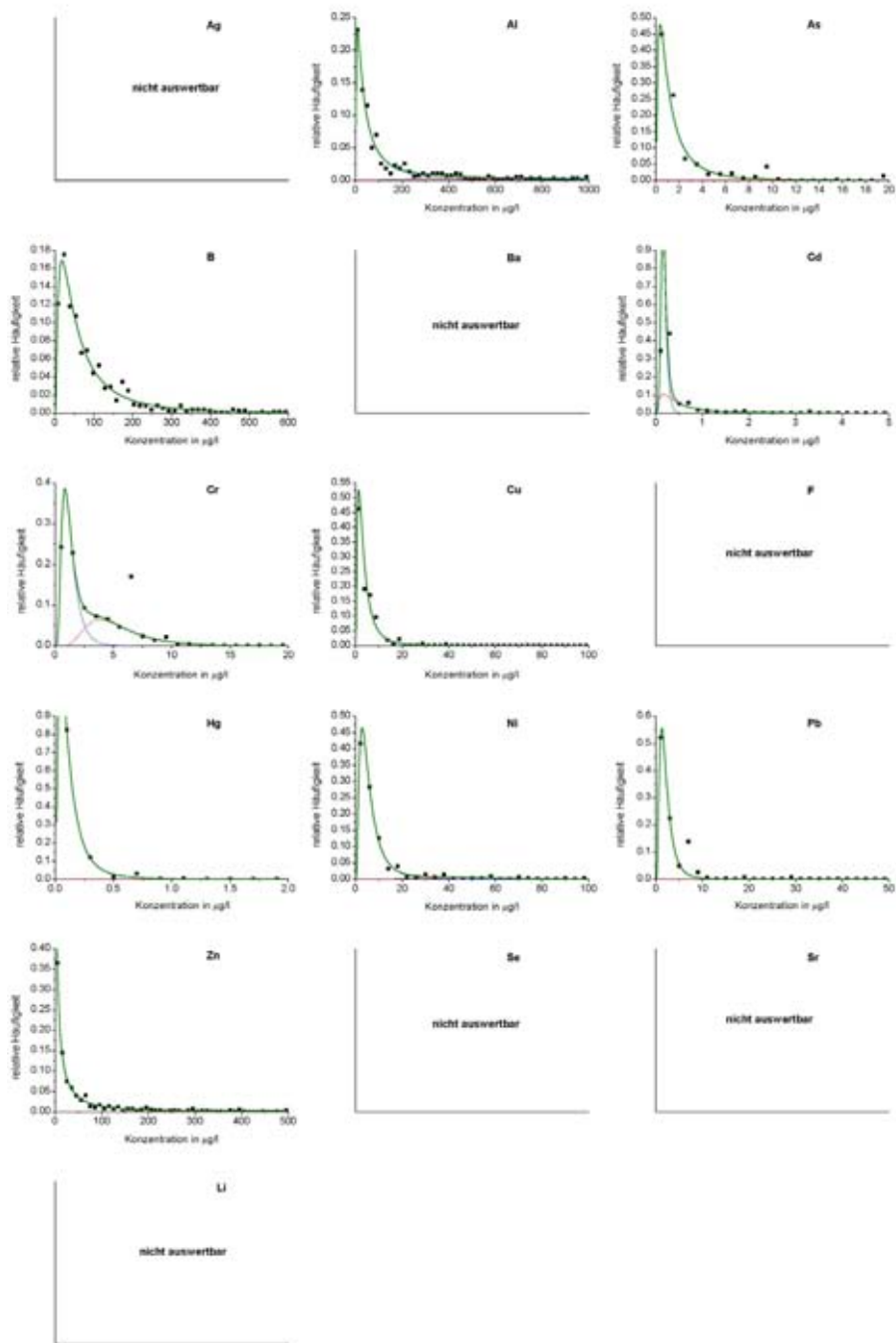


Abb. 9: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen unter 10 m“.

In Abb. 8 und Abb. 9 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

6.1.2 *Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 10 und 25 m*

Auch in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit wurden die glazial geprägten Lockergesteinsgebiete nördlich der Mittelgebirge zusammengefasst, wobei jedoch Grundwassermessstellen mit einem Filterausbau zwischen 10 m und 25 m unter Geländeoberkante betrachtet wurden. Karte 4 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 4358 Grundwassermessstellen ausgewertet. In Abb. 10 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die unterschiedlichen Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn aus der Mehrzahl der zu dieser Einheit beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 11 und Abb. 12 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

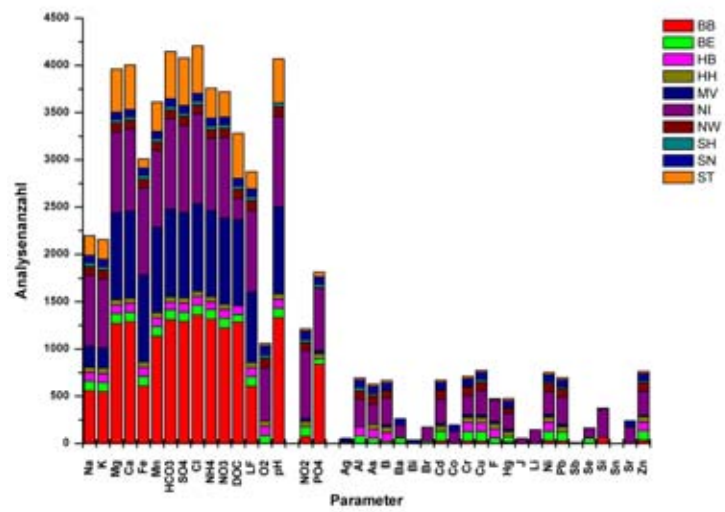


Abb. 10: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 10 und 25 m“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 4: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 10 und 25 m“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 4: Auswertungsergebnisse für die hydrogeologische Bezugseinheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 10 und 25 m“.

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	2197	7,0	17,8	60	6,5	14,4	31,9	961	6,0	12,0	27,3
K	mg/l	2157	1,0	2,5	11,0	0,8	2,1	5,1	938	0,9	1,6	3,3
Mg	mg/l	3962	3,0	8,7	23,7	3,0	8,9	26,5	2092	2,5	6,8	17,0
Ca	mg/l	4005	25,0	73	150	20,9	69	149	2116	24,1	65	121
Fe	mg/l	3012	0,05	1,4	12,0	0,02	0,7	4,8	1403	0,09	1,1	5,9
Mn	mg/l	3613	0,01	0,2	0,8	0,05	0,2	0,7	1846	0,01	0,2	0,5
HCO ₃	mg/l	4149	30,5	171	340	32,2	167	332	2196	42,7	157	290
SO ₄	mg/l	4079	12,1	60	170	4,3	29,2	197	2166	12,9	50	123
Cl	mg/l	4207	11,5	32,0	85	11,3	29,3	76	2226	10,0	23,5	52
NH ₄	mg/l	3759	0,01	0,115	1,25	0,001	0,02	0,4	1901	0,01	0,1	0,4
NO ₂	mg/l	1215	0,007	0,02	0,06	0,006	0,02	0,04	427	0,007	0,02	0,06
NO ₃	mg/l	3721	0,1	0,4	21,4	0,1	0,3	0,5	1841	0,1	0,1	2,5
PO ₄	mg/l	1814	0,001	0,06	0,5	0,01	0,03	0,08	918	0,001	0,06	0,4
DOC	mg/l	3281	1,0	2,3	7,1	0,9	2,3	6,2	1818	0,8	1,9	4,8
LF	µS/cm	2875	200	468	1013	191	440	1013	1337	142	369	691
O ₂	mg/l	1061	0,1	0,7	6,9	0,1	0,9	7,3	316	0,1	0,6	4,2
H	µg/l	4070	0,01	0,06	1,0	0,02	0,06	0,2	2197	0,01	0,05	0,5
pH	-		6,0	7,2	7,9	6,6	7,2	7,8		6,3	7,3	7,9
F	mg/l	474	0,05	0,1	0,2							
Br	mg/l	172	0,06	0,06	0,4							
J	mg/l	54	0,06	0,06	0,06							
Ag	µg/l	54	0,03	0,12	0,7							
Al	µg/l	695	5,4	40	241	4,9	28,1	162	187	5,6	60	130
As	µg/l	629	0,3	1,3	6,5	0,5	1,2	2,7	133	0,6	1,2	3,3
B	µg/l	667	10,0	50	182	18,5	56	169	184	5,4	30,0	90
Ba	µg/l	261	6,7	52	180							
Bi	µg/l	36	0,07	0,07	0,07							
Cd	µg/l	670	0,06	0,3	0,7	0,1	0,2	0,5	215	0,06	0,2	0,7
Co	µg/l	195	0,4	3,3	10,0							
Cr	µg/l	710	0,4	1,3	6,7	0,5	1,5	4,2	198	0,2	1,3	6,7
Cu	µg/l	775	0,7	2,3	10,0	0,5	2,0	8,0	227	0,5	1,5	6,7
Hg	µg/l	475	0,02	0,1	0,3	0,08	0,16	0,29	134	0,02	0,2	0,3
Li	µg/l	146	3,0	10,0	10,0							
Ni	µg/l	751	0,9	3,3	17,3	1,1	4,2	15,8	208	0,9	2,7	6,7
Pb	µg/l	697	0,5	2,0	10,0	0,01	0,3	8,5	223	0,6	1,4	10,0
Sb	µg/l	8	0,02	0,03	0,04							
Se	µg/l	164	0,9	2,0	3,33							
Si	mg/l	374	3,8	7,3	11,7							
Sn	µg/l											
Sr	µg/l	240	60	258	805							
Zn	µg/l	764	3,0	10,0	104	1,2	10,6	91	221	3,3	10,0	53

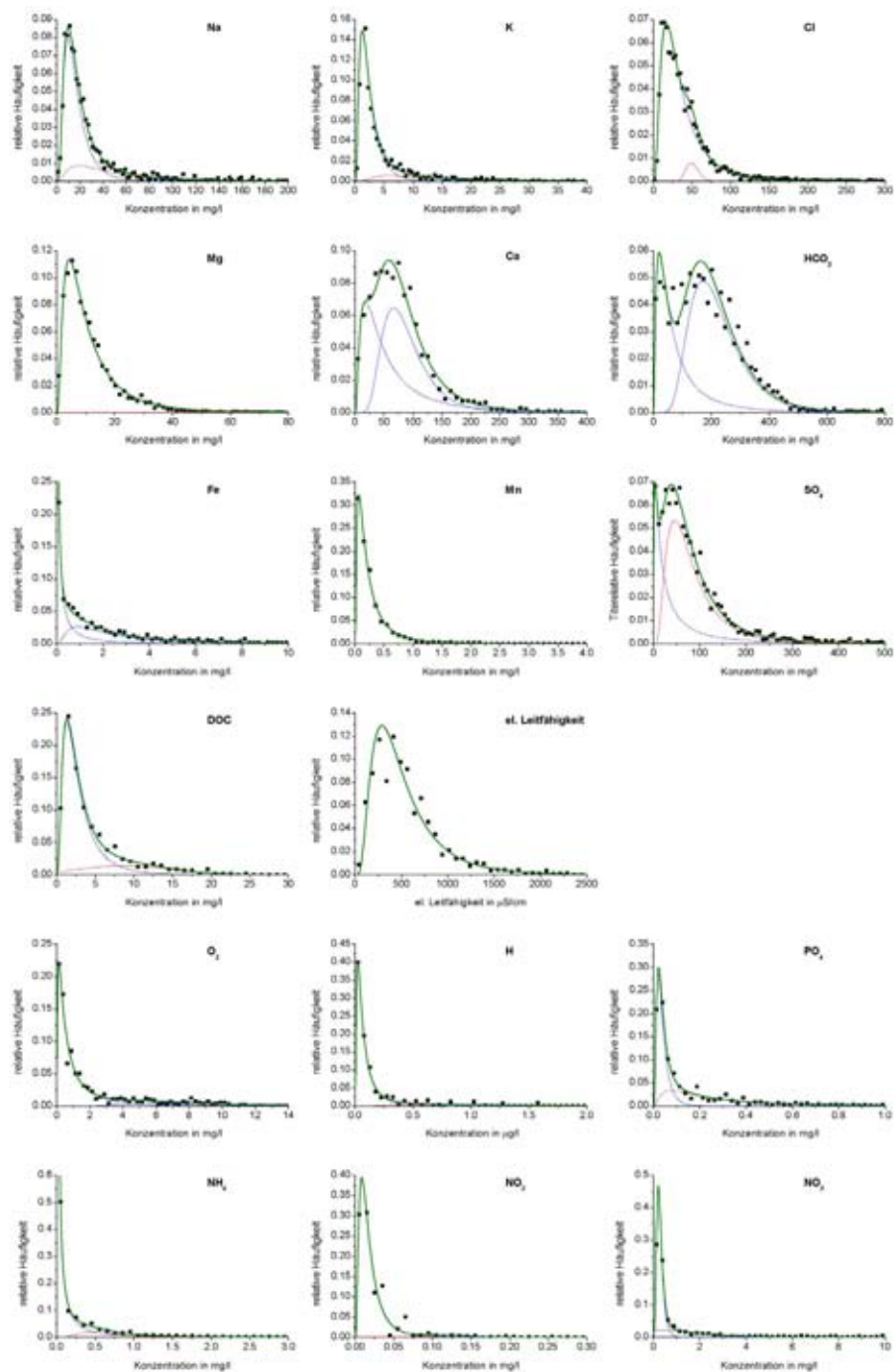


Abb. 11: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 10 und 25 m“.

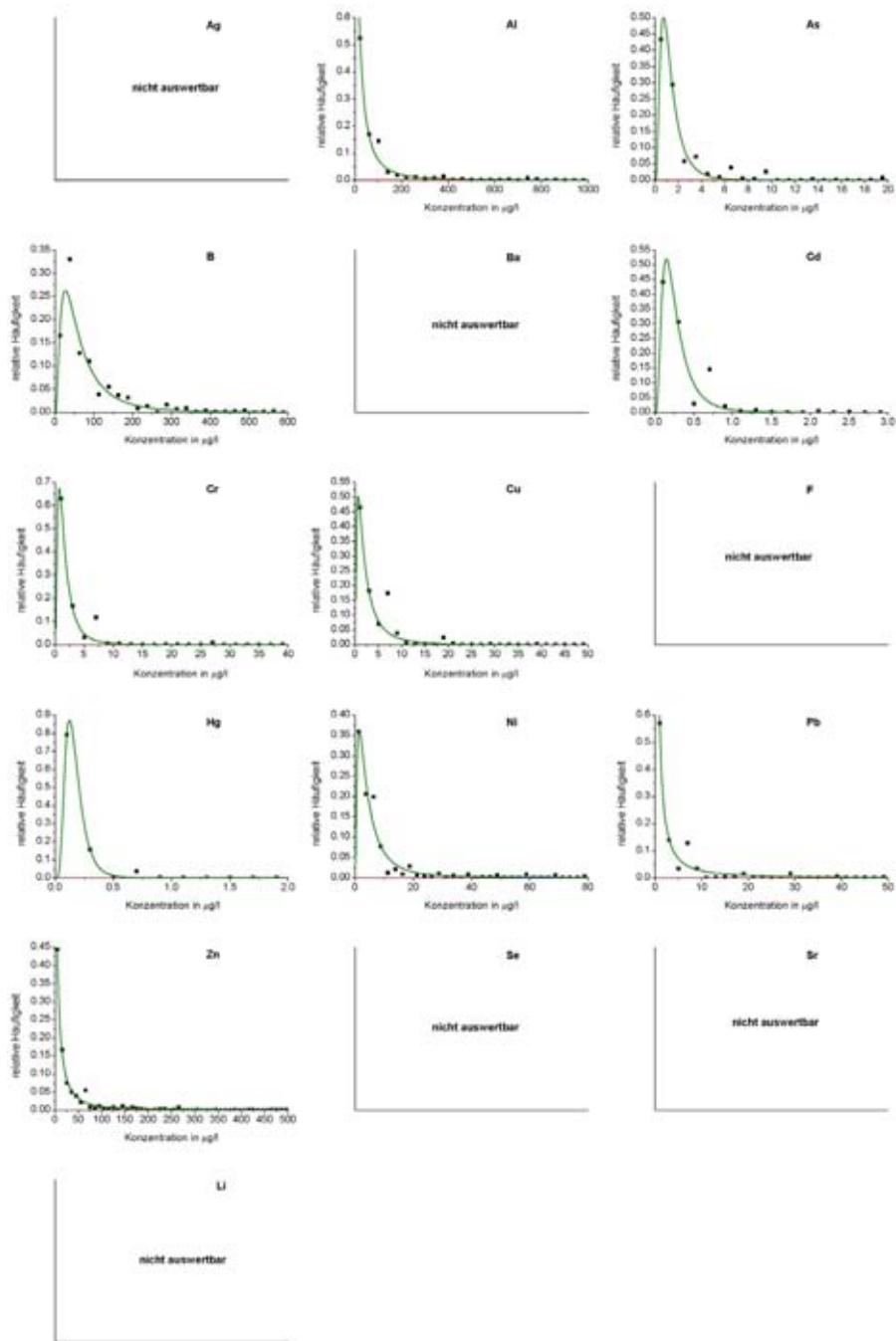


Abb. 12: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 10 und 25 m“.

6.1.3 *Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 25 und 50 m*

Auch in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit wurden die glazial geprägten Lockergesteinsgebiete nördlich der Mittelgebirge zusammengefasst, wobei jedoch Grundwassermessstellen mit einem Filterausbau zwischen 10 m und 25 m unter Geländeoberkante betrachtet wurden. Karte 5 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 4054 Grundwassermessstellen ausgewertet. In Abb. 13 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die unterschiedlichen Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswertungsverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn aus der Mehrzahl der zu dieser Einheit beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 14 und Abb. 15 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

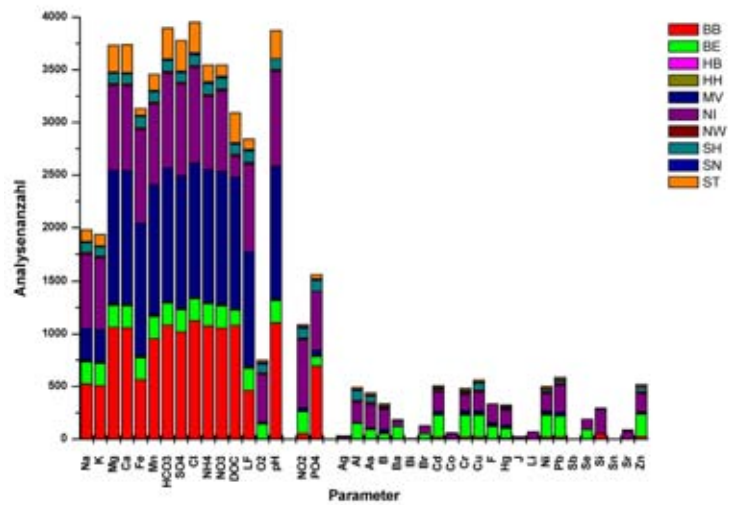


Abb. 13: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 25 und 50 m“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 5: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 25 und 50 m“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 5: Auswertungsergebnisse für die hydrogeologische Bezugseinheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 25 und 50 m“.

Parameter	Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
	N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na mg/l	1977	6,5	13,5	44,6	5,6	9,8	17,1	1076	6,0	10,2	23,5
K mg/l	1934	0,9	2,0	5,6	0,8	1,8	4,2	1051	0,8	1,6	3,3
Mg mg/l	3733	2,9	9,2	24,2	2,6	9,2	23,5	2132	2,4	7,4	19,2
Ca mg/l	3739	22,0	75	145	21,8	76	157	2136	22,0	68	124
Fe mg/l	3130	0,1	1,6	7,4	0,08	1,4	9,3	1683	0,1	1,4	4,4
Mn mg/l	3457	0,01	0,2	0,5	0,05	0,2	0,5	1904	0,01	0,1	0,3
HCO ₃ mg/l	3897	57	214	378	35,7	174	340	2212	60,1	189	323
SO ₄ mg/l	3780	5,0	35,2	121	1,1	8,8	73	2152	6,6	32,0	86
Cl mg/l	3951	10,0	24,8	67	9,2	20,6	46	2250	9,0	20,0	44,0
NH ₄ mg/l	3546	0,01	0,2	1,1	0,002	0,03	0,4	1943	0,01	0,1	0,4
NO ₂ mg/l	1089	0,006	0,02	0,04	0,006	0,02	0,04	502	0,007	0,02	0,03
NO ₃ mg/l	3546	0,1	0,1	3,91	0,07	0,2	0,6	1924	0,1	0,1	1,0
PO ₄ mg/l	1564	0,001	0,09	0,7	0,01	0,03	0,05	902	0,001	0,06	0,4
DOC mg/l	3090	1,0	2,2	5,6	0,9	2,1	4,8	1818	0,9	1,9	4,1
LF µS/cm	2843	150	448	892	159	383	922	1544	100	375	646
O ₂ mg/l	749	0,1	0,5	5,2	0,1	0,6	3,3	339	0,1	0,5	3,4
H µg/l	3872	0,01	0,05	0,5	0,02	0,05	0,1	2201	0,01	0,04	0,3
pH -		6,3	7,3	7,9	6,8	7,3	7,7		6,6	7,4	7,9
F mg/l	335	0,06	0,13	0,27							
Br mg/l	127	0,03	0,06	0,4							
J mg/l	24	0,06	0,06	0,06							
Ag µg/l	29	0,03	0,2	6,7							
Al µg/l	493	0,2	30,0	100	3,9	17,6	80	209	3,33	30,0	100
As µg/l	438	0,6	1,9	6,7	0,6	1,2	2,2	177	0,3	1,3	3,5
B µg/l	337	0,33	30,0	130	14,1	48,0	163	146	9,5	31,7	89
Ba µg/l	184	13,33	63,0	138							
Bi µg/l	7	0,04	0,07	0,07							
Cd µg/l	510	0,02	0,1	0,7	0,08	0,2	0,4	225	0,06	0,1	0,7
Co µg/l	60	0,1	3,3	4,0							
Cr µg/l	483	0,1	1,3	4,2	0,6	1,1	1,9	202	0,3	1,3	4,8
Cu µg/l	560	0,5	2,0	11,0	0,2	1,5	9,9	256	0,7	1,7	6,7
Hg µg/l	325	0,017	0,2	0,5	0,05	0,2	0,6	163	0,01	0,2	0,7
Li µg/l	69	4,0	10,0	10,0							
Ni µg/l	501	0,6	2,0	6,7	0,7	1,7	4,3	209	0,7	2,0	6,7
Pb µg/l	587	0,6	2,0	18	0,2	1,2	5,9	240	0,7	1,4	8,4
Sb µg/l	3	0,01	0,02	0,03							
Se µg/l	189	0,7	2,0	3,33							
Si mg/l	295	3,7	7,9	12,16							
Sn µg/l	1	0,003	0,003	0,003							
Sr µg/l	86	60,0	145	516							
Zn µg/l	520	0,0	6,7	40	0,2	2,9	48,7	222	0,0	6,7	36,6

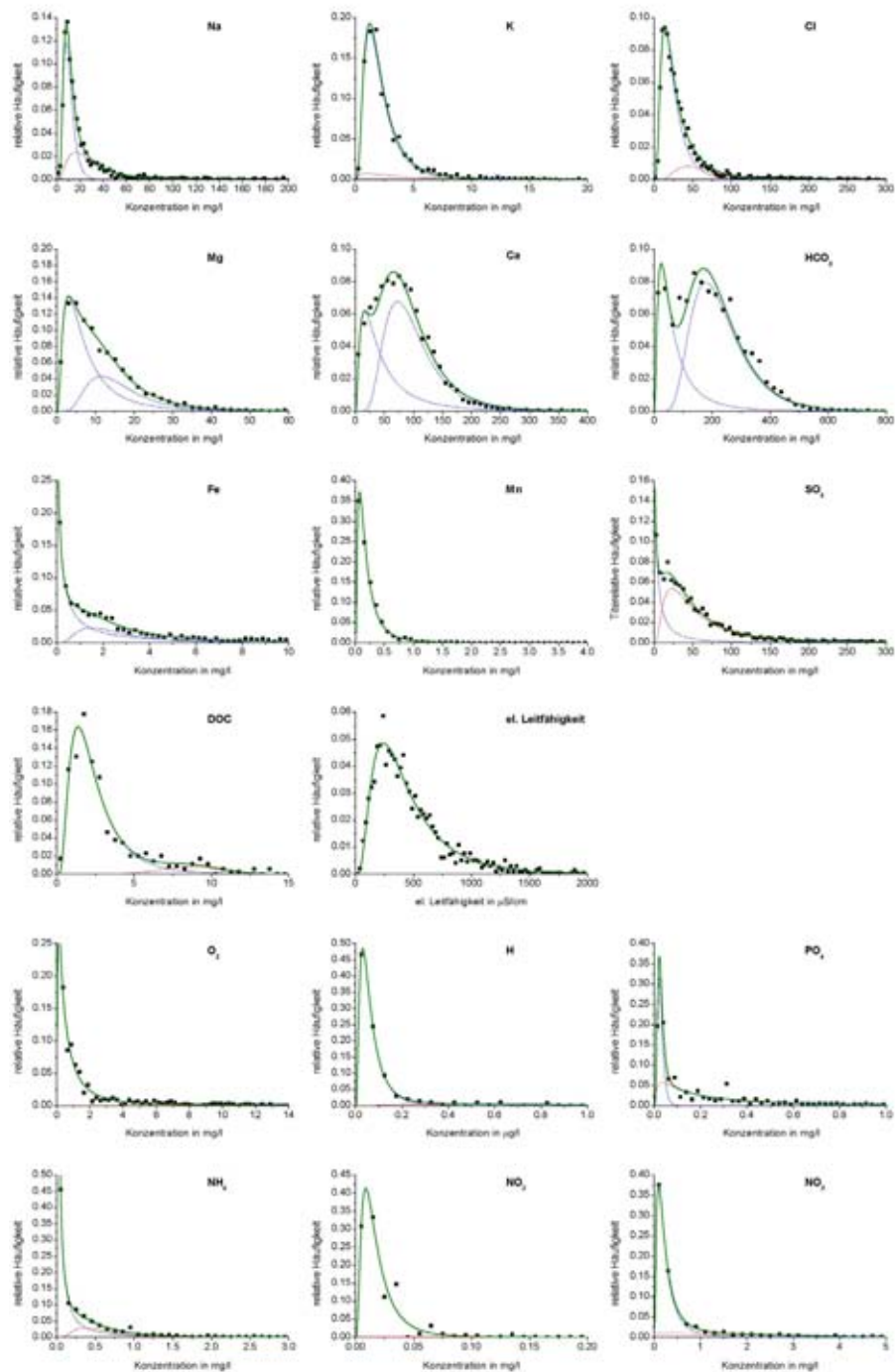


Abb. 14: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 25 und 50 m“.

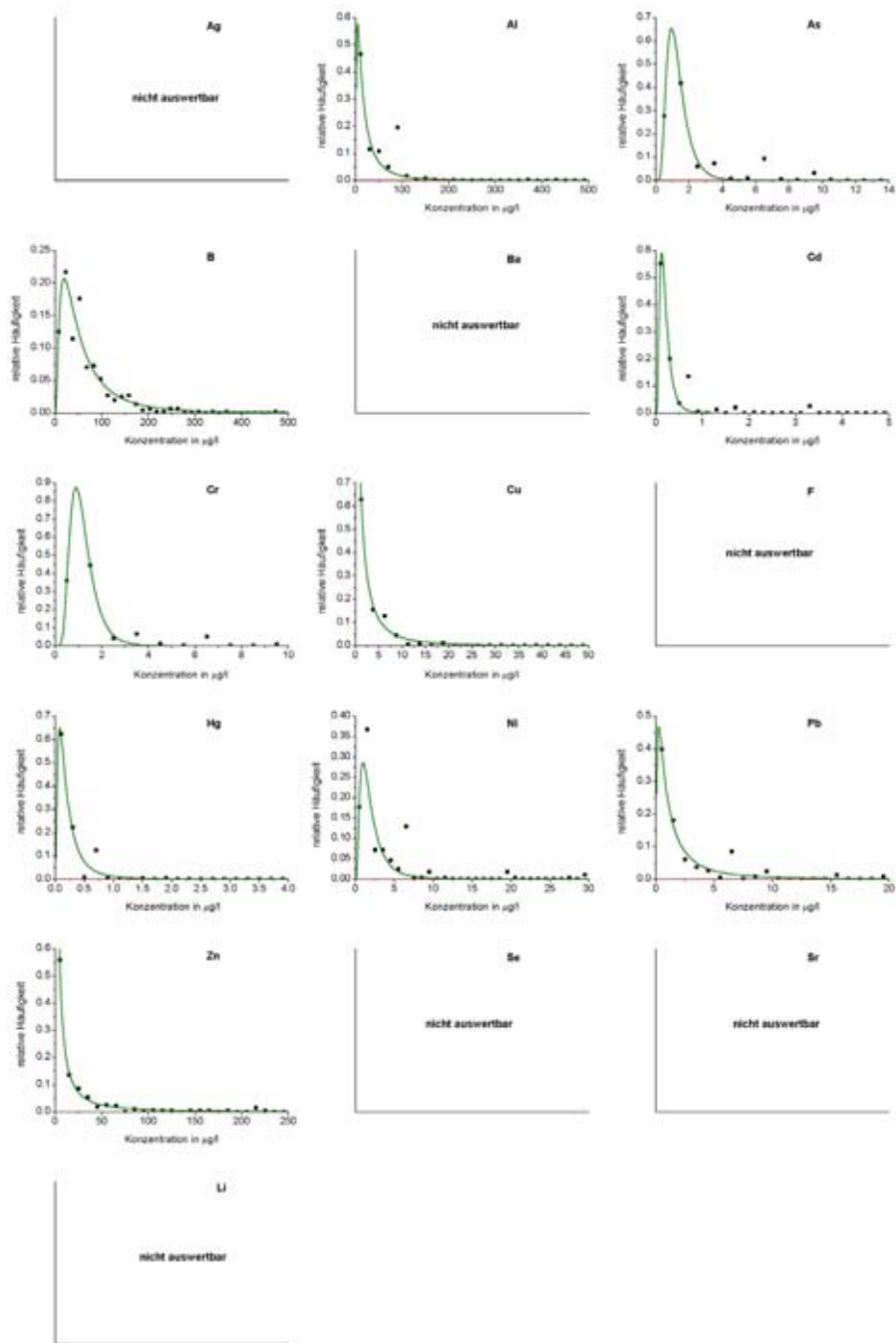


Abb. 15: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen zwischen 25 und 50 m“.

6.2 Schotter- und Kiesablagerungen des Rheins

Schotter- und Kiesablagerungen des Rheins treten sowohl am Oberrhein als auch am Niederrhein auf. Obwohl es sich in beiden Fällen um fluviatile Ablagerungen handelt, treten trotz der großen lithogenetischen Ähnlichkeit größere Unterschiede in den Lösungsgehalten der Grundwässer auf. Aus diesem Grunde wurden die Schotter- und Kiesablagerungen des Rheins in zwei Untereinheiten differenziert. Die Auswertungsergebnisse für die beiden Einheiten werden in den folgenden Abschnitten dokumentiert und in Kapitel 7.4 gemeinsam diskutiert.

6.2.1 *Schotter und Kiese des Niederrheins*

In dieser hydrogeologischen Bezugseinheit wurden die Grundwassermessstellen aus den fluviatilen Terrassenablagerungen der Niederrheinischen Bucht zusammengefasst. Karte 6 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 582 Grundwassermessstellen ausgewertet. Alle Grundwassermessstellen dieser hydrogeologischen Einheit stammen aus dem Bundesland Nordrhein-Westfalen. In Abb. 16 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn Daten von mehr als 200 Grundwassermessstellen vorlagen.

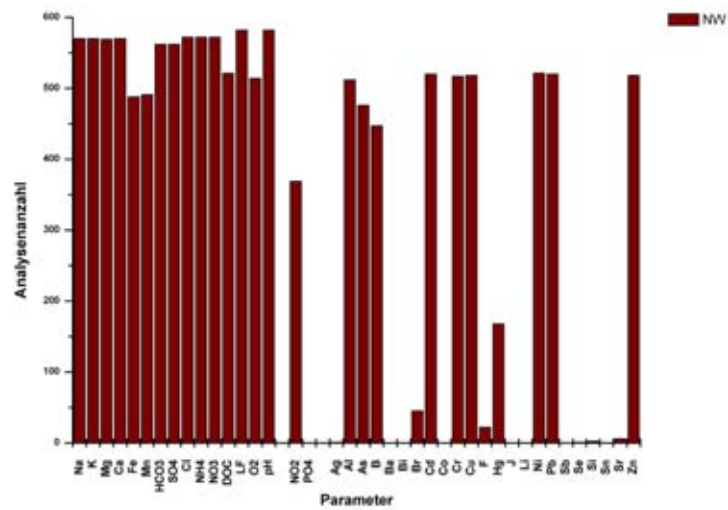


Abb. 16: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „Schotter und Kiese des Niederrheins“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 6: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „Schotter und Kiese des Niederrheins“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 6: Auswertungsergebnisse für die hydrogeologische Bezugseinheit „Schotter und Kiese des Niederrheins“

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	570	11,0	22,0	52	11,1	19,7	35,1	45	6,2	14,0	28,2
K	mg/l	570	1,7	3,8	13,2	1,5	3,4	7,9	45	1,0	2,0	4,0
Mg	mg/l	569	6,9	14,0	26,5	7,5	11,5	17,9	45	2,4	7,2	18,5
Ca	mg/l	570	37,2	94	169	38,2	100	169	45	13,6	59	150
Fe	mg/l	488	0,007	0,03	5,2	0,01	0,03	0,2	32	0,03	0,7	6,2
Mn	mg/l	491	0,007	0,03	1,1	0,0001	0,0007	0,07	32	0,007	0,08	0,9
HCO ₃	mg/l	562	23,2	183	377	24,4	170	377	46	28,5	127	343
SO ₄	mg/l	562	44,0	107	177	31,6	74	172	46	9,7	72	150
Cl	mg/l	572	22,0	50	97	25,4	52	106	47	11,1	28,5	68
NH ₄	mg/l	572	0,03	0,1	0,3	0,04	0,09	0,2	47	0,05	0,1	0,2
NO ₂	mg/l	369	0,01	0,02	0,07				40	0,01	0,02	0,07
NO ₃	mg/l	572	2,0	35,4	111	0,4	2,3	12,8	47	0,2	2,1	8,5
PO ₄	mg/l											
DOC	mg/l	521	0,7	1,1	3,4	0,6	1,0	2,5	39	0,7	0,8	2,6
LF	µS/cm	582	370	740	1169	576	818	1161	57	184	550	930
O ₂	mg/l	514	0,2	3,8	8,1	0,1	3,9	9,1	44	0,2	2,1	6,0
H	µg/l	582	0,06	0,2	1,6	0,06	0,2	0,4	57	0,05	0,1	1,1
pH	-		5,8	6,7	7,2	6,4	6,8	7,2		5,9	7,0	7,3
F	mg/l	22	0,008	0,1	0,2							
Br	mg/l	45	0,1	0,1	0,3							
J	mg/l											
Ag	µg/l	1	3,3	3,3	3,3							
Al	µg/l	512	6,7	60,0	130	33,4	49	73	37	6,7	60	60
As	µg/l	476	0,7	0,7	2,9	0,5	0,8	1,2	37	0,7	1,1	1,8
B	µg/l	447	20,0	130	172	41,6	94	212	28	10	130	130
Ba	µg/l											
Bi	µg/l											
Cd	µg/l	520	0,06	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	38	0,2	0,3	0,4
Co	µg/l											
Cr	µg/l	517	3,0	6,7	6,7				38	1,3	6,7	6,7
Cu	µg/l	518	6,7	6,7	13,3	4,0	5,8	8,4	37	6,7	6,7	13,3
Hg	µg/l	168	0,06	0,06	0,1				11	0,1	0,1	0,1
Li	µg/l											
Ni	µg/l	521	3,3	6,7	30,0	2,5	4,5	8,0	38	2,4	6,7	14,3
Pb	µg/l	520	3,3	3,3	3,3				38	3,1	3,3	3,3
Sb	µg/l											
Se	µg/l	1	2,7	2,7	2,7							
Si	mg/l	2	5,6	6,3	7,0							
Sn	µg/l											
Sr	µg/l	6	480	535	755							
Zn	µg/l	518	6,7	6,7	60,0	1,16	6,1	31,6	37	6,7	10,0	50

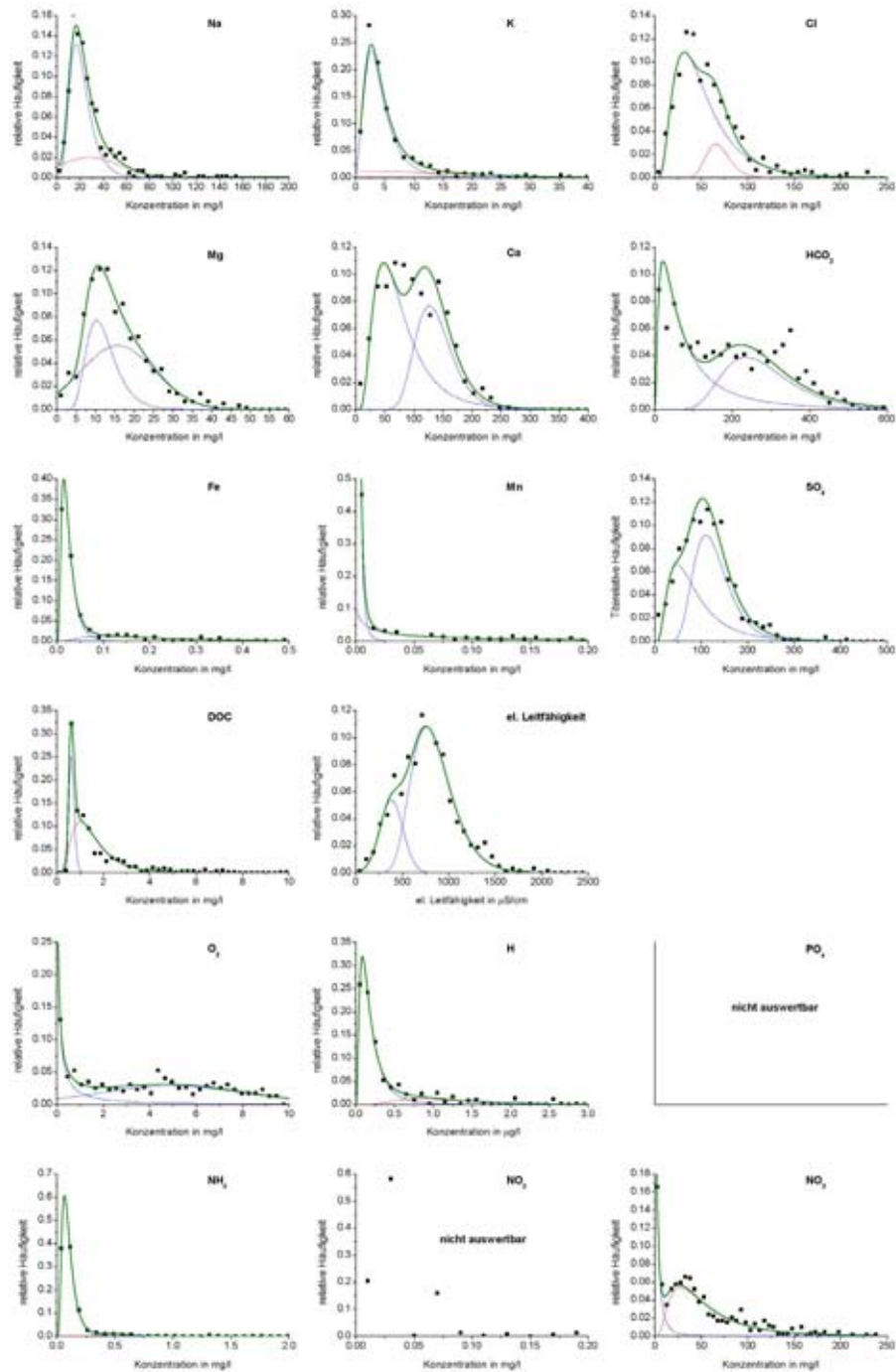


Abb. 17: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Schotter und Kiese des Niederrheins“.

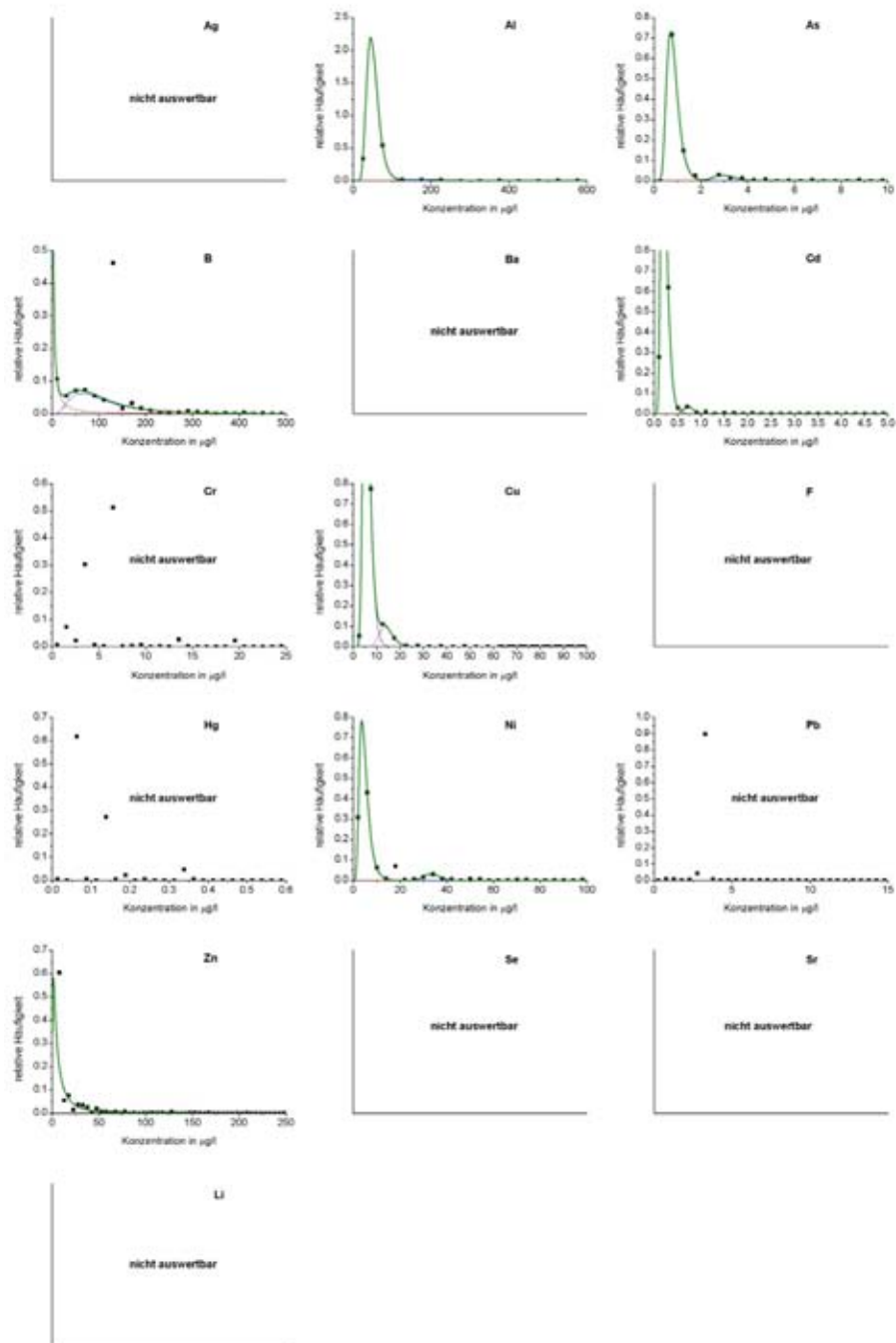


Abb. 18: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Schotter und Kiese des Niederrheins“.

In Abb. 17 und Abb. 18 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

6.2.2 *Schotter und Kiese des Oberrheins*

In dieser hydrogeologischen Bezugseinheit wurden die Grundwassermessstellen aus den fluviatilen Ablagerungen des Oberrheingrabens zusammengefasst. Karte 7 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 1292 Grundwassermessstellen ausgewertet. Die Grundwassermessstellen dieser hydrogeologischen Einheit stammen aus den Bundesländern Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz. In Abb. 19 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn aus der Mehrzahl der zu dieser Einheit beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 20 und Abb. 21 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

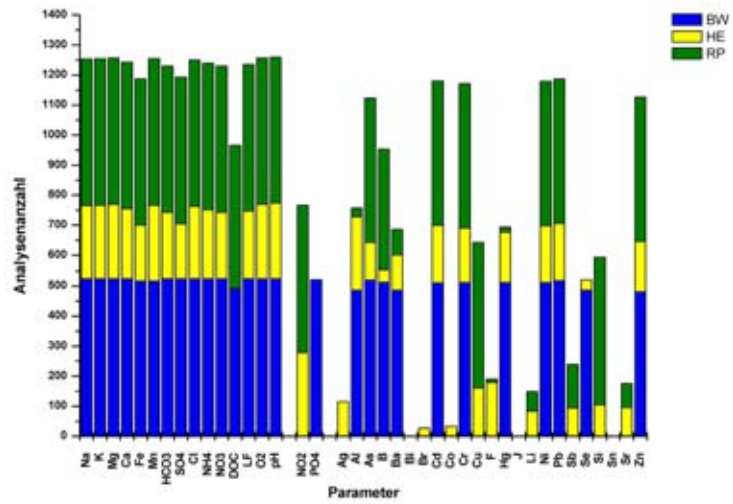


Abb. 19: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „Schotter und Kiese des Oberrheins“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 7: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „Schotter und Kiese des Oberrheins“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 7: Auswertungsergebnisse für die hydrogeologische Bezugseinheit „Schotter und Kiese des Oberrheins“.

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	1254	7,0	15,5	49,0	6,2	10,8	18,9	351	5,8	11,0	31,0
K	mg/l	1255	1,2	2,6	9,0	1,1	2,3	4,7	351	1,1	2,0	3,5
Mg	mg/l	1257	7,1	16,0	35,0	7,0	15,2	33,1	350	6,5	12,5	22,0
Ca	mg/l	1243	68	119	205	74	121	197	343	62	97	143
Fe	mg/l	1188	0,01	0,2	4,6	0,005	0,04	3,3	316	0,05	1,3	3,7
Mn	mg/l	1255	0,01	0,1	0,7	0,01	0,09	0,6	351	0,02	0,2	0,5
HCO ₃	mg/l	1230	191	326	436	277	348	438	333	184	304	390
SO ₄	mg/l	1193	14,3	66	263	16,7	65	249	315	3,3	43,7	119
Cl	mg/l	1251	9,4	36,0	105	9,8	31,2	99	344	6,0	20,3	59
NH ₄	mg/l	1240	0,01	0,04	0,6	0,002	0,01	0,04	337	0,01	0,1	0,4
NO ₂	mg/l	767	0,001	0,01	0,05							
NO ₃	mg/l	1229	0,06	7,8	75	0,05	0,3	1,2	330	0,06	0,3	3,5
PO ₄	mg/l	521	0,02	0,04	0,4	0,01	0,03	0,2	76	0,02	0,04	0,2
DOC	mg/l	966	0,6	1,6	3,6	0,7	1,6	3,7	217	0,8	1,7	3,4
LF	µS/cm	1235	420	750	1350	450	763	1296	341	366	586	840
O ₂	mg/l	1257	0,1	1,0	7,4	0,2	1,3	8,2	351	0,10	0,4	2,3
H	µg/l	1260	0,03	0,06	0,1	0,04	0,06	0,1	352	0,03	0,05	0,1
pH	-		6,9	7,2	7,5	7,0	7,2	7,4		7,0	7,3	7,5
F	mg/l	191	0,03	0,1	0,2							
Br	mg/l	27	0,01	0,01	0,01							
J	mg/l											
Ag	µg/l	115	0,06	0,06	0,07							
Al	µg/l	757	3,7	7,0	105	1,1	5,8	30,8	194	1,5	6,0	34,9
As	µg/l	1123	0,5	1,3	5,08	0,2	0,8	3,6	281	0,4	1,3	4,1
B	µg/l	953	13,3	30,0	110	0,2	2,8	35,4	204	13,3	20,0	51
Ba	µg/l	686	40,0	116	299	42,2	116	320	136	60	112	270
Bi	µg/l											
Cd	µg/l	1180	0,03	0,19	0,20	0,07	0,1	0,2	310	0,03	0,13	0,20
Co	µg/l	33	0,67	0,67	0,93							
Cr	µg/l	1172	0,001	1,3	2,4	0,3	0,8	2,4	305	0,0007	1,3	1,9
Cu	µg/l	642	0,67	1,3	3,2							
Hg	µg/l	693	0,02	0,1	0,1	0,03	0,05	0,07	155	0,02	0,02	0,1
Li	µg/l	149	1,3	6,7	25,2							
Ni	µg/l	1179	0,06	3,3	8,7	0,6	1,6	4,2	310	0,06	3,3	3,3
Pb	µg/l	1187	0,06	2,0	3,5	0,6	1,0	1,5	312	0,060	2,0	2,0
Sb	µg/l	239	0,4	1,3	1,3							
Se	µg/l	521	1,0	1,0	1,1							
Si	mg/l	593	4,4	6,7	9,7							
Sn	µg/l											
Sr	µg/l	176	200	402	950							
Zn	µg/l	1127	1,4	20,0	147	5,8	11,6	23,5	300	0,7	18,5	61

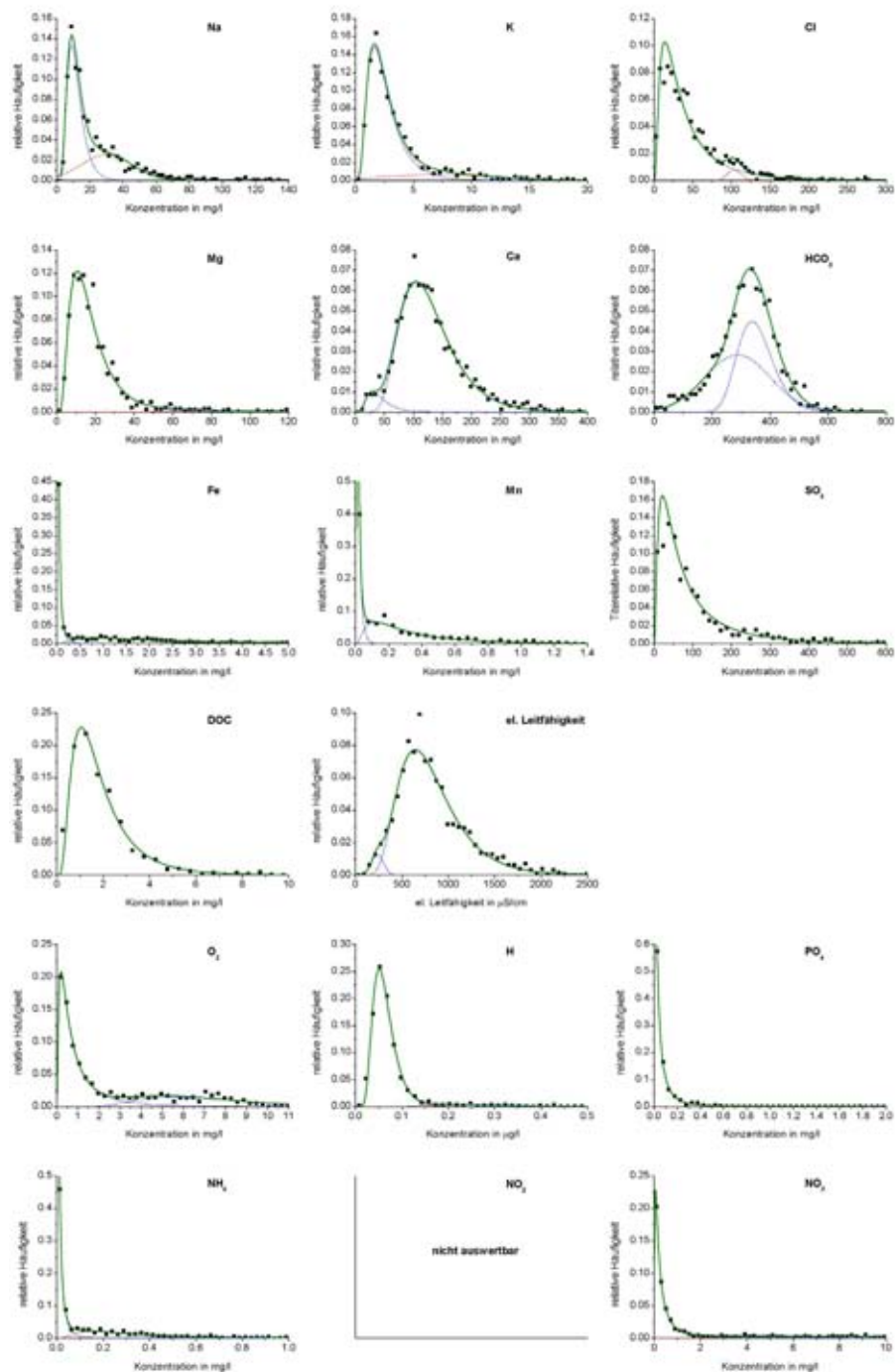


Abb. 20: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Schotter und Kiese des Oberrheins“.

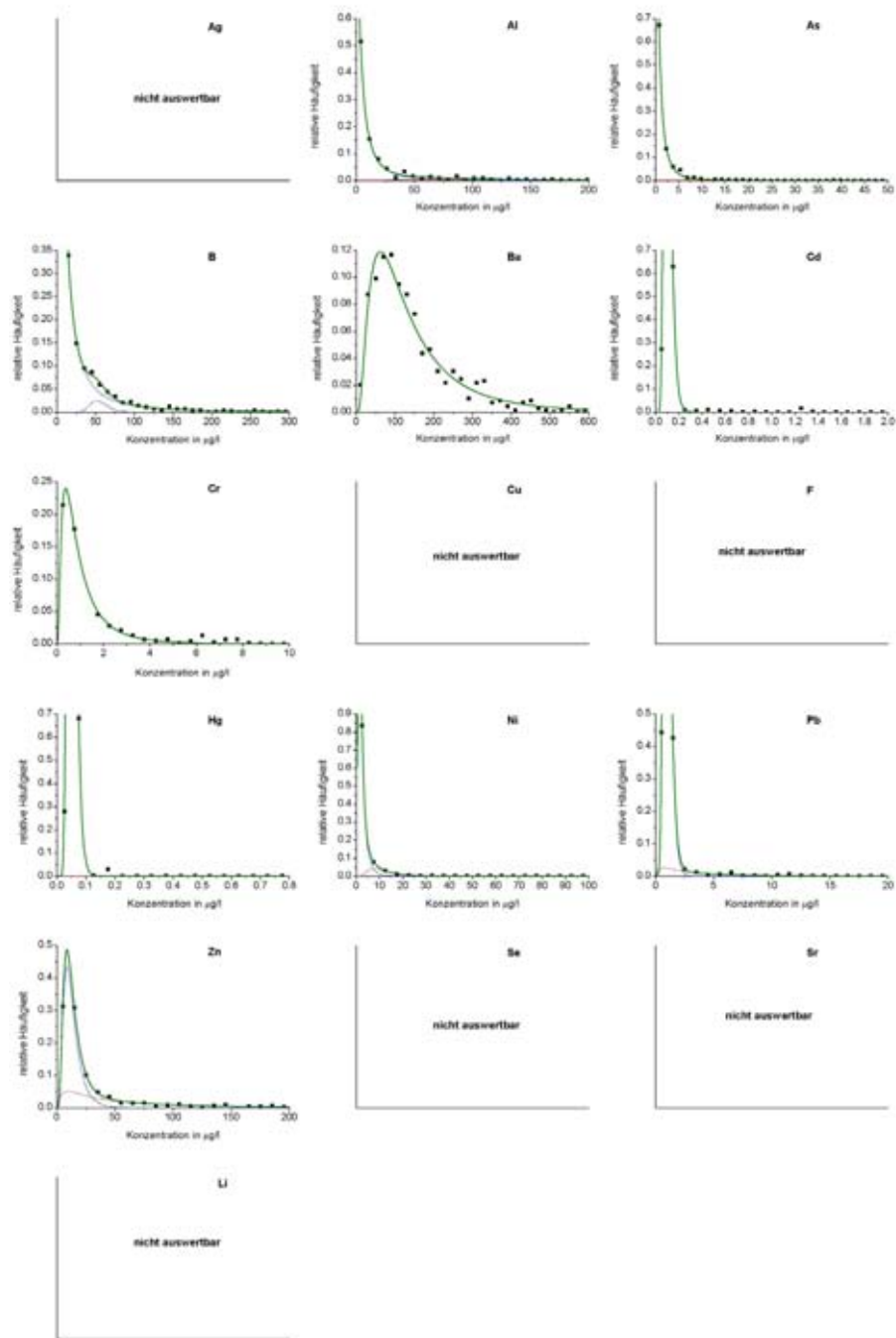


Abb. 21: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Schotter und Kiese des Oberrheins“.

6.3 Schotter- und Moränenablagerungen des Alpenvorlandes

Bei den Lockergesteinsablagerungen des Voralpenlandes handelt es sich meist um quartäre fluviatile Schotterablagerungen und glazigene Moränenablagerungen. Die getrennte primärstatistische Auswertung dieser beiden Einheiten ergab meist sehr ähnliche Lösungsinhalte, so dass die Grundwassermessstellen aus diesen Einheiten zusammengefasst wurden. Karte 8 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 1379 Grundwassermessstellen ausgewertet, die aus den Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern stammen. In Abb. 22 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn für beide beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 23 und Abb. 24 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

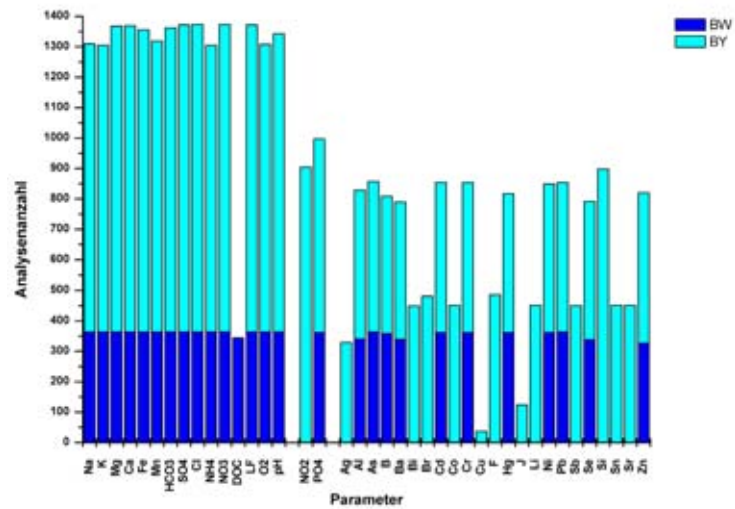


Abb. 22: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „Schotter- und Moränenablagerungen des Alpenvorlandes“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 8: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „Schotter- und Moränenablagerungen des Alpenvorlandes“ und ausgewertete Grundwassermessstellen

Tabelle 8: Ergebnisse der statistischen Auswertungen für die hydrogeologische Bezugseinheit „Schotter- und Moränenablagerungen des Alpenvorlandes“.

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	1310	1,3	5,9	16,8	2,7	6,9	17,3	255	0,7	3,0	9,2
K	mg/l	1305	0,4	1,4	4,6	0,5	1,3	3,3	255	0,2	0,8	2,2
Mg	mg/l	1368	11,4	22,2	32,1	12,0	21,1	37,4	265	9,7	18,5	26,4
Ca	mg/l	1369	66	101	136	67	101	136	265	51	84	110
Fe	mg/l	1356	0,0001	0,01	0,2	0,001	0,005	0,1	261	0,0001	0,01	0,14
Mn	mg/l	1319	0,0001	0,0005	0,2	0,003	0,006	0,02	264	0,0001	0,0001	0,005
HCO ₃	mg/l	1362	238	359	433	245	359	437	259	202	327	409
SO ₄	mg/l	1372	7,0	20,0	63	8,0	8,9	45	267	4,0	10,9	37,8
Cl	mg/l	1374	2,5	16,3	54	6,7	19,4	56	270	0,9	5,2	20,2
NH ₄	mg/l	1305	0,001	0,001	0,02	0,001	0,003	0,006	254	0,001	0,001	0,01
NO ₂	mg/l	904	0,001	0,001	0,001							
NO ₃	mg/l	1374	2,4	16,8	45,2	1,4	6,0	24,8	270	1,7	5,2	9,0
PO ₄	mg/l	997	0,001	0,02	0,6	0,001	0,006	0,1	138	0,001	0,001	0,2
DOC	mg/l	344	0,4	0,8	1,9							
LF	µS/cm	1372	337	641	927	490	666	906	267	282	477	673
O ₂	mg/l	1308	1,9	7,4	10,4	2,3	7,5	10,6	257	2,8	7,5	9,9
H	µg/l	1343	0,02	0,05	0,1	0,03	0,05	0,10	262	0,01	0,04	0,06
pH	-		7,0	7,3	7,7	7,0	7,3	7,6		7,2	7,4	7,9
F	mg/l	486	0,001	0,08	0,3							
Br	mg/l	481	0,001	0,001	0,07							
J	mg/l	124	0,001	0,001	0,005							
Ag	µg/l	329	0,002	0,002	0,02							
Al	µg/l	829	0,002	4,0	20,0	1,7	4,8	13,3	119	0,002	1,3	6,5
As	µg/l	857	0,1	0,7	2,0	0,3	0,6	1,4	123	0,03	0,5	1,6
B	µg/l	809	3,7	17,0	42,1	6,8	15,1	33,9	115	2,7	15,5	32,6
Ba	µg/l	790	10,0	46,5	115	14,7	41,0	115	113	6,6	30,0	72
Bi	µg/l	449	0,001	0,004	0,02							
Cd	µg/l	854	0,001	0,06	0,2	0,06	0,09	0,15	122	0,001	0,01	0,2
Co	µg/l	451	0,0007	0,06	0,2							
Cr	µg/l	854	0,1	1,0	3,0	0,08	0,5	3,6	122	0,03	0,7	2,5
Cu	µg/l	37	1,0	2,0	7,4							
Hg	µg/l	817	0,005	0,1	0,2	0,0001	0,0003	0,01	116	0,005	0,04	0,6
Li	µg/l	451	0,3	1,7	4,6							
Ni	µg/l	849	0,02	0,6	2,7	0,2	0,6	2,2	120	0,02	0,5	1,9
Pb	µg/l	854	0,003	0,5	2,3	0,1	0,3	0,5	122	0,003	0,2	0,7
Sb	µg/l	450	0,01	0,1	0,3							
Se	µg/l	792	0,3	0,9	3,5	0,3	0,5	1,0	113	0,3	0,5	4,2
Si	mg/l	898	0,9	2,8	4,7							
Sn	µg/l	451	0,01	0,01	0,2							
Sr	µg/l	451	47,9	201	343							
Zn	µg/l	820	2,8	7,8	44,1	2,4	8,9	32,9	121	0,8	6,6	32,9

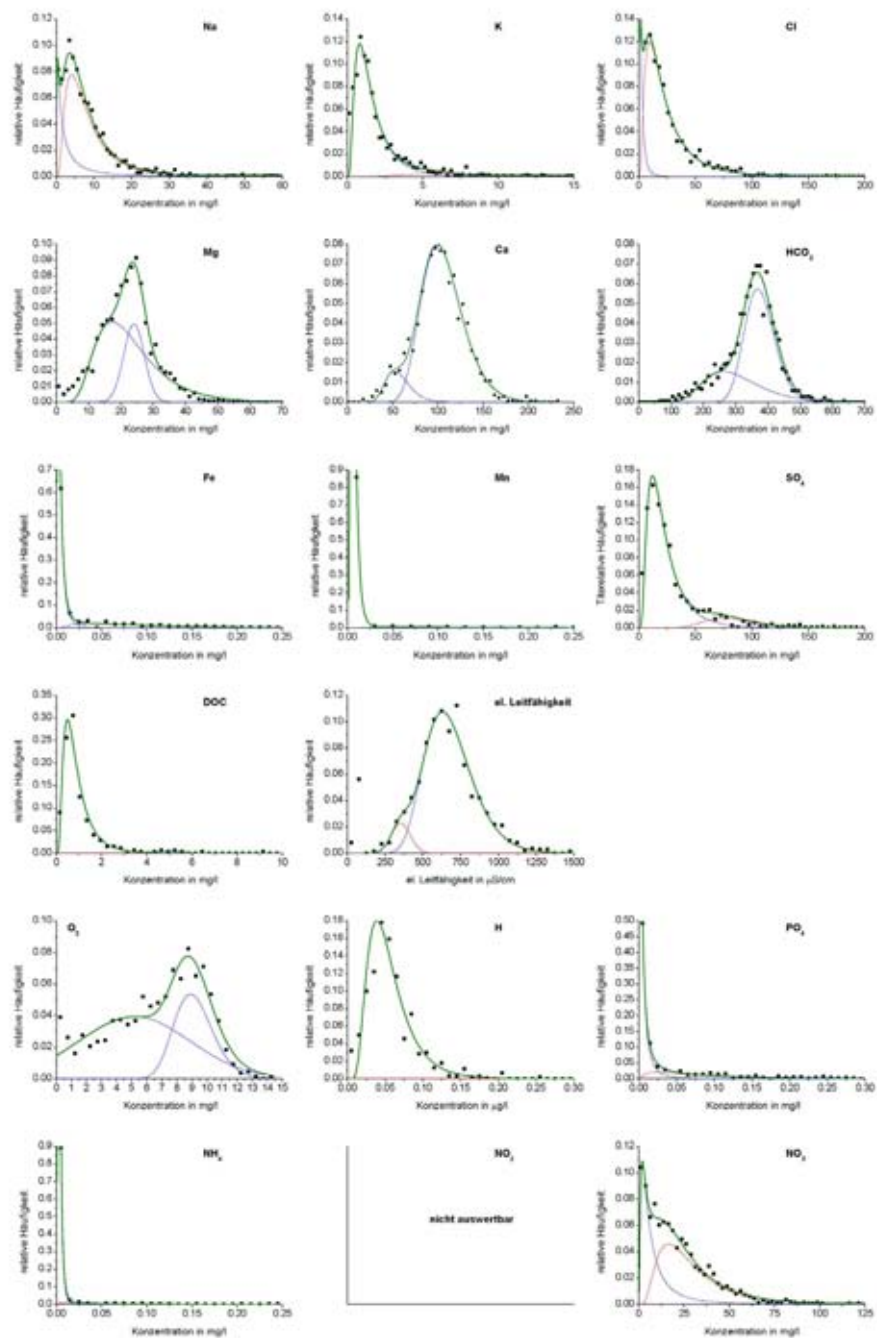


Abb. 23: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Schotter- und Moränenablagerungen des Alpenvorlandes“.

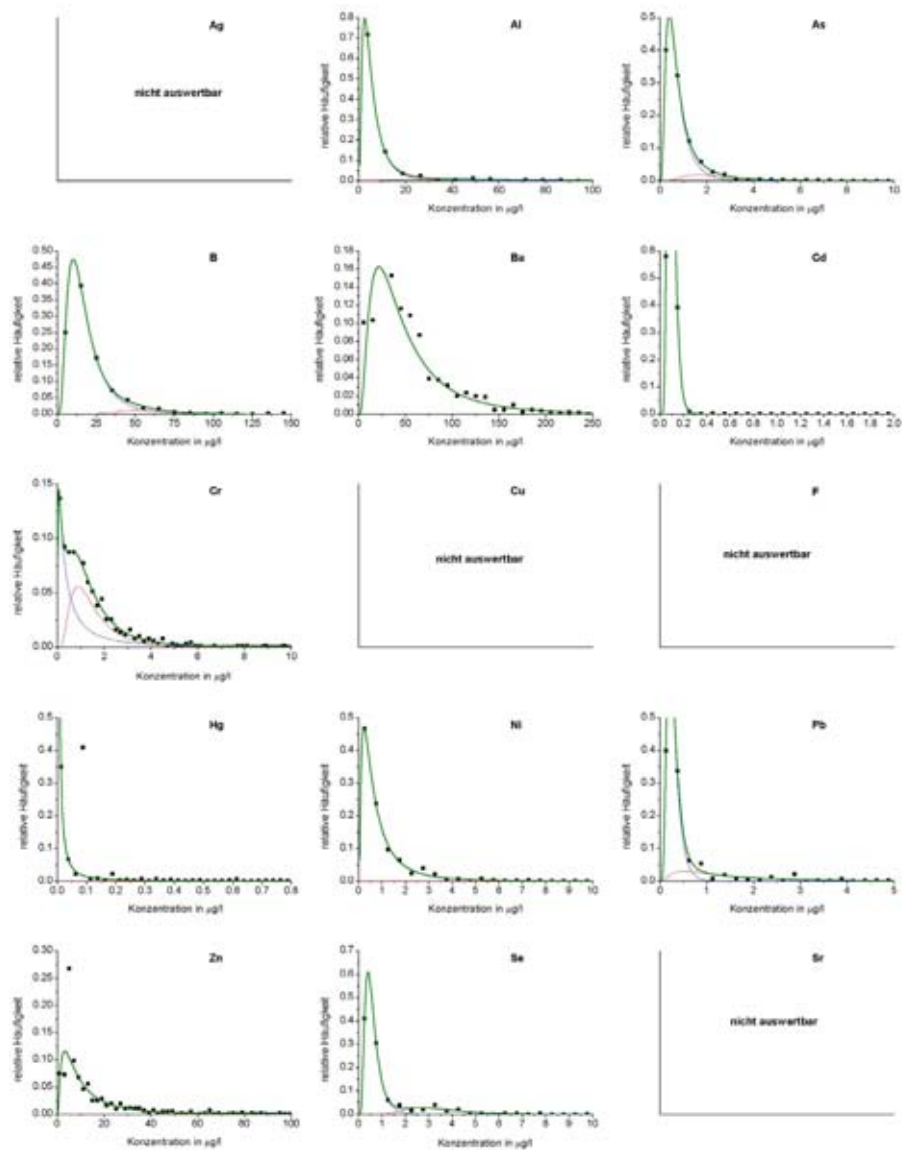


Abb. 24: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Schotter- und Moränenablagerungen des Alpenvorlandes“.

6.4 Tertiäre Sedimente

Die Grundwasserleiter der in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit zusammengefassten Grundwassermessstellen aus tertiären Beckenablagerungen liegen in der hessischen Tertiärsenke, dem Tertiär des Alpenvorlandes und untergeordnet dem Weißelsterbecken. Diese Einheiten, die zusammen mit den ausgewerteten Grundwassermessstellen in Karte 9 dargestellt sind, wurden gemeinsam ausgewertet. Insgesamt standen für diese Bezugseinheit Daten von 976 Grundwassermessstellen für die Auswertung zur Verfügung. In Abb. 25 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn für die beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 26 und Abb. 27 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

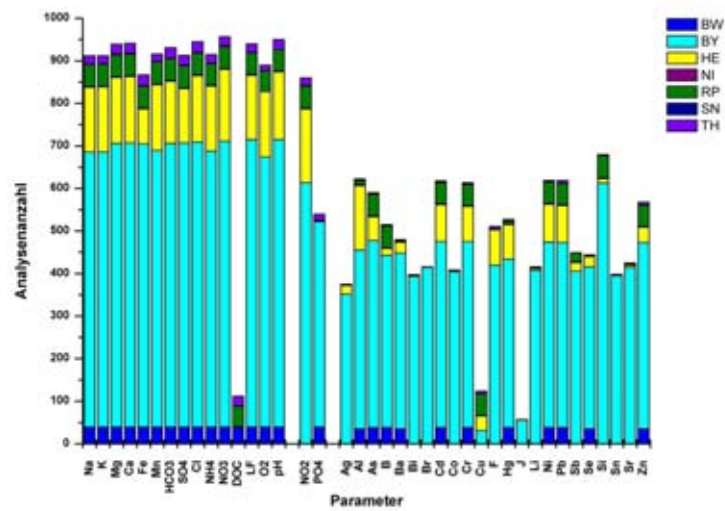


Abb. 25: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „tertiäre Sedimente“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 9: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „tertiäre Sedimente“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 9: Ergebnisse der statistischen Auswertungen für die hydrogeologische Bezugseinheit „tertiäre Sedimente“.

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	912	2,8	6,6	26,2	2,4	5,8	13,9	313	1,3	4,8	17,9
K	mg/l	912	0,4	1,1	4,1	0,4	0,9	2,4	313	0,3	1,0	2,3
Mg	mg/l	939	8,9	23,5	36,7	8,5	23,3	36,0	319	7,2	22,5	31,0
Ca	mg/l	941	39,3	77	131	38,7	76	127	321	37,0	64	94
Fe	mg/l	867	0,0001	0,04	0,7	0,002	0,01	0,3	298	0,0001	0,2	0,7
Mn	mg/l	916	0,0001	0,01	0,1	0,002	0,006	0,1	316	0,0001	0,01	0,08
HCO ₃	mg/l	931	135	310	415	113	303	424	318	151	305	397
SO ₄	mg/l	913	6,0	21,6	80	6,1	21,0	73	315	4,9	13,4	45,6
Cl	mg/l	945	1,2	14,5	57	0,8	4,5	25,8	323	0,7	3,2	21,9
NH ₄	mg/l	915	0,001	0,001	0,1	0,001	0,004	0,04	315	0,001	0,001	0,04
NO ₂	mg/l	860	0,0007	0,001	0,02	0,0003	0,001	0,01	308	0,0007	0,001	0,01
NO ₃	mg/l	957	0,03	6,9	57	0,1	0,2	0,5	331	0,001	0,5	7,6
PO ₄	mg/l	540	0,001	0,02	0,3	0,005	0,02	0,06	183	0,001	0,02	0,3
DOC	mg/l	112	0,5	1,1	2,5							
LF	µS/cm	940	350	569	906	393	582	863	330	287	492	648
O ₂	mg/l	890	0,8	6,0	9,8	0,83	6,5	10,0	312	0,728	2,9	9,1
H	µg/l	950	0,02	0,05	0,16	0,02	0,04	0,1	330	0,02	0,04	0,1
pH	-		6,8	7,3	7,7	7,0	7,4	7,7		6,9	7,4	7,7
F	mg/l	511	0,03	0,1	0,3							
Br	mg/l	416	0,001	0,001	0,1							
J	mg/l	57	0,002	0,01	0,02							
Ag	µg/l	375	0,002	0,002	0,06							
Al	µg/l	622	0,002	2,49	30,0	0,3	2,6	20,9	216	0,002	1,4	25,0
As	µg/l	590	0,1	0,94	2,8	0,2	0,7	2,9	188	0,1	0,67	2,5
B	µg/l	515	0,02	7,1	36,5	1,0	5,8	33,0	162	0,02	3,3	20
Ba	µg/l	480	10,92	36,7	148	9,3	25,8	72	164	13,9	72	162
Bi	µg/l	397	0,001	0,004	0,02							
Cd	µg/l	618	0,0013	0,01	0,15	0,001	0,01	0,1	200	0,0013	0,008	0,1
Co	µg/l	408	0,002	0,04	0,2							
Cr	µg/l	614	0,0007	0,5	2,5	0,01	0,2	3,1	199	0,0007	0,2	1,3
Cu	µg/l	124	0,7	1,3	4,1							
Hg	µg/l	527	0,005	0,02	0,1	0,006	0,02	0,1	181	0,0047	0,02	0,1
Li	µg/l	416	1,5	5,0	17,6							
Ni	µg/l	619	0,02	0,5	3,3	0,02	0,3	3,4	201	0,02	0,1	2,1
Pb	µg/l	619	0,003	0,06	2,0							
Sb	µg/l	449	0,001	0,03	0,4							
Se	µg/l	444	0,2	0,4	2,6							
Si	mg/l	680	2,6	6,2	9,7							
Sn	µg/l	398	0,01	0,02	0,1							
Sr	µg/l	425	88	160	595							
Zn	µg/l	568	2,65	10,0	156	0,8	6,7	56	182	2,0	9,7	208

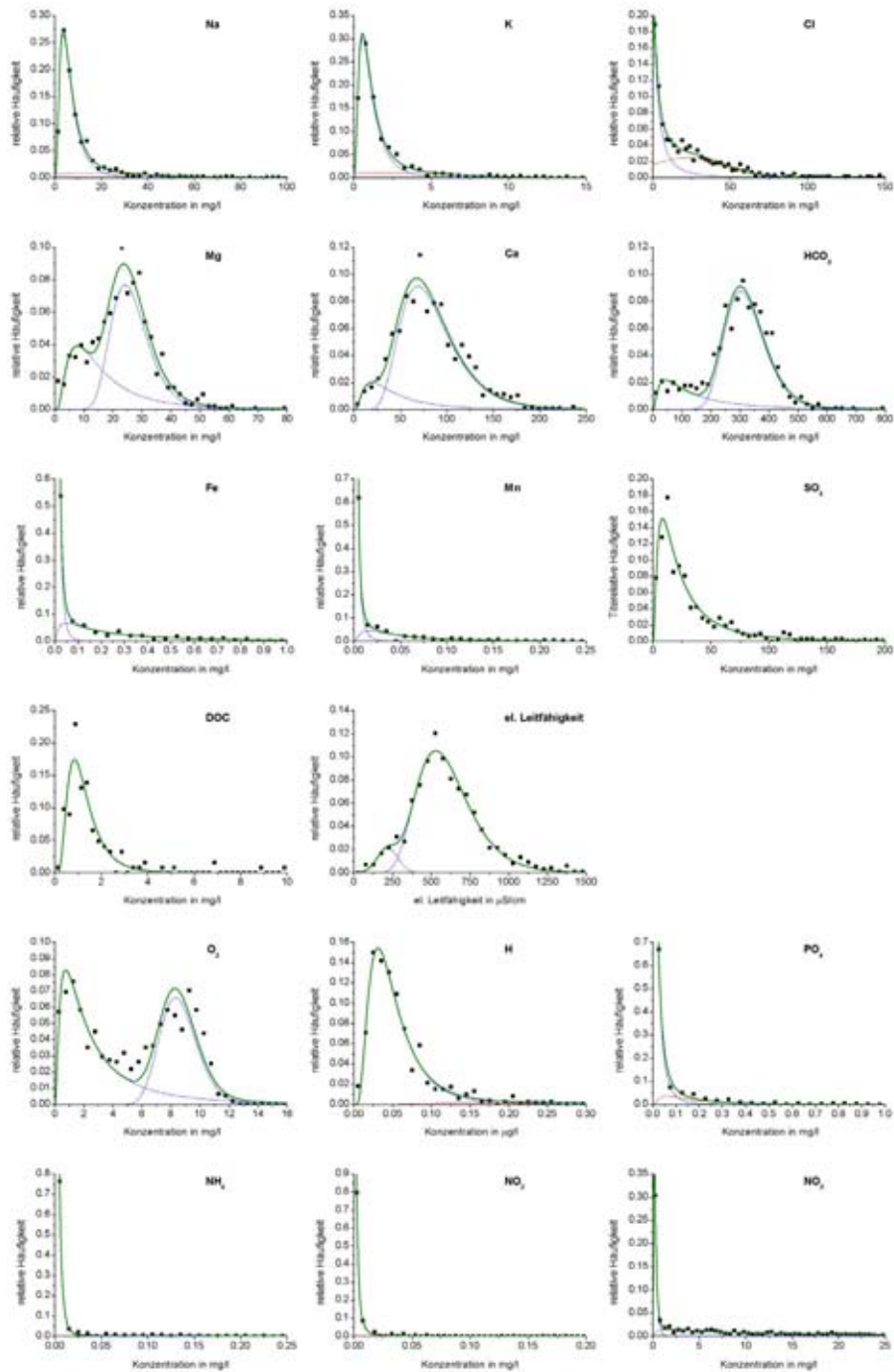


Abb. 26: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebenelemente im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „tertiäre Sedimente“.

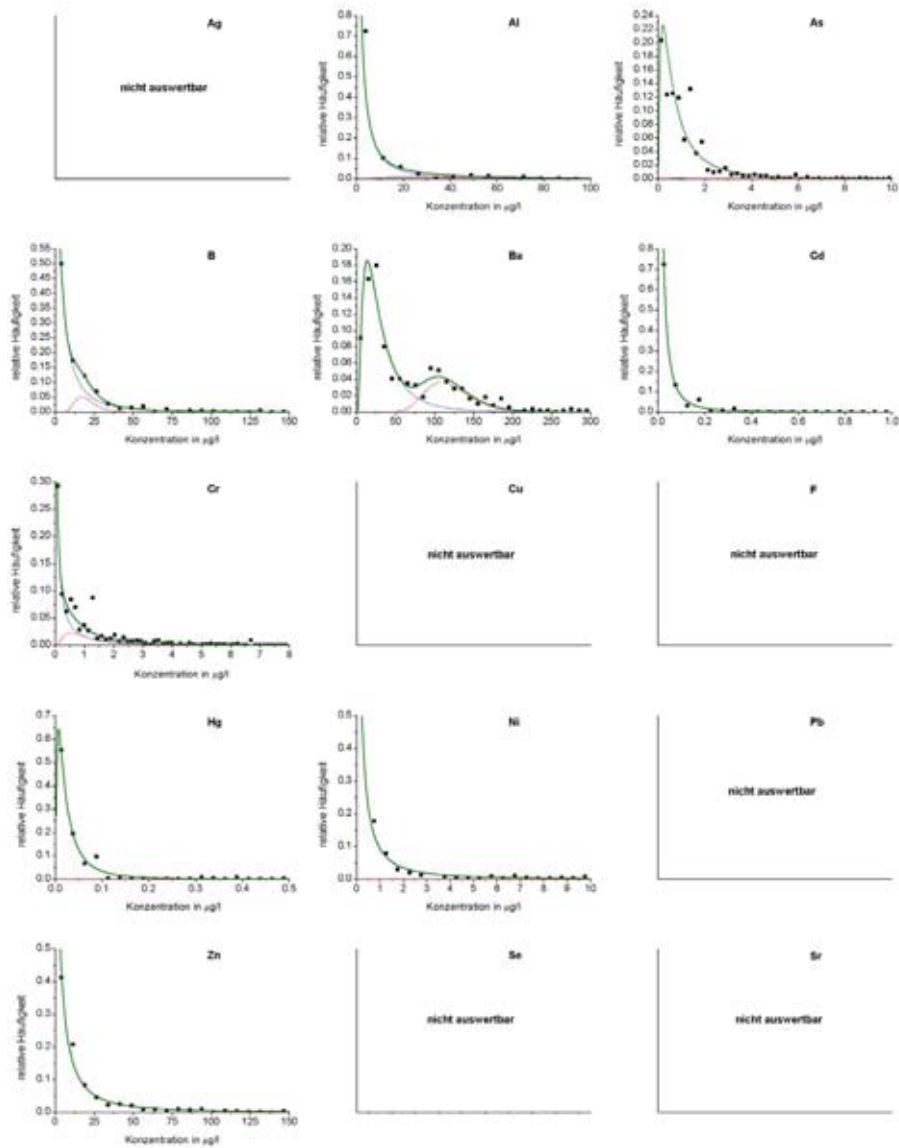


Abb. 27: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „tertiäre Sedimente“.

6.5 Karbonatische Festgesteinseinheiten

Bei den karbonatischen Festgesteinseinheiten handelt es sich um mesozoische, untergeordnet auch paläozoische Gesteinsfolgen. Es dominieren Kalksteine und Dolomite, untergeordnet treten auch mergelige sowie tonige und gipshaltige Bildungen auf. Die Kalksteine und Dolomite weisen oftmals relativ große Speichervolumina auf, dementsprechend hoch ist ihre regionale wasserwirtschaftliche Bedeutung. Die Gesteine zeigen häufig Verkarstungserscheinungen. Die hierdurch oftmals hohe Durchlässigkeit der Gesteine macht die Grundwässer empfindlich gegenüber anthropogenen Stoffeinträgen.

6.5.1 *Kalksteine des Oberen Jura*

Grundwassermessstellen, die dieser Einheit zugeordnet wurden, stammen großflächig aus der Schwäbisch-Fränkischen Alb Baden-Württembergs und Bayerns. Es handelt sich hierbei um oftmals verkarstete (Bank-, Riffkalksteine), untergeordnet mergelige Bildungen des west- und süddeutschen Schichtstufen- und Bruchschollenlandes. Karte 10 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 891 Grundwassermessstellen ausgewertet, die ausschließlich aus den Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern stammen. In Abb. 28 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die unterschiedlichen Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswertungsverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angege-

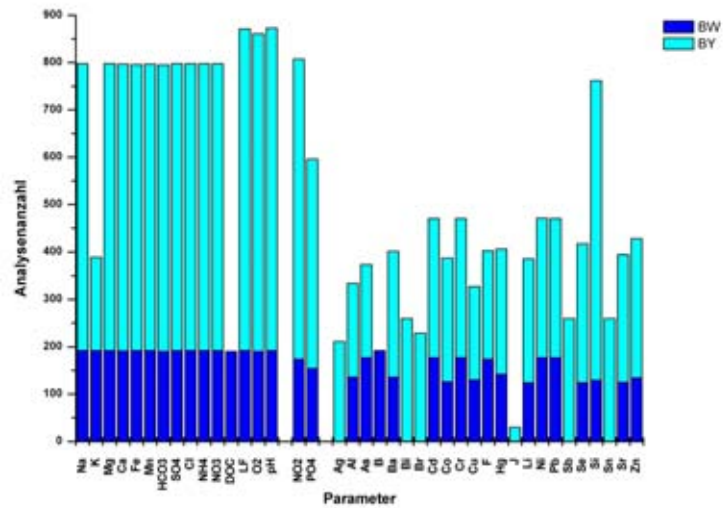


Abb. 28: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „Kalksteine des Oberen Jura“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 10: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „Kalksteine des Oberen Jura“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 10: Ergebnisse der statistischen Auswertungen für die hydrogeologische Bezugseinheit „Kalksteine des Oberen Jura“.

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	798	1,4	3,4	9,6	1,3	2,9	6,3	92	1,0	1,9	5,1
K	mg/l	388	0,38	1,0	4,7	0,33	0,80	1,9	48	0,30	0,55	2,0
Mg	mg/l	798	3,0	18,2	35	3,0	22	37	92	2,8	16	33
Ca	mg/l	797	67	97	125	67	97	125	91	60	83	110
Fe	mg/l	796	0,002	0,03	0,14	0,004	0,03	0,15	92	0,002	0,01	0,11
Mn	mg/l	797	0,0001	0,0001	0,007	0,000	0,001	0,003	92	0,0001	0,0001	0,007
HCO ₃	mg/l	795	244	323	370	296	329	366	91	220	306	359
SO ₄	mg/l	798	11,0	20,8	35,4	13,0	20	32	92	10	16	31
Cl	mg/l	798	5,0	14,2	31,0	4,6	13,1	37	92	2,6	5,8	11
NH ₄	mg/l	798	0,001	0,001	0,015	0,0001	0,0001	0,01	92	0,001	0,001	0,01
NO ₂	mg/l	807	0,001	0,001	0,02	0,002	0,004	0,009	154	0,0007	0,0007	0,007
NO ₃	mg/l	798	5,8	18,9	38,7	0,83	3,8	17,5	92	1,4	7,2	9,9
PO ₄	mg/l	596	0,002	0,04	0,22	0,01	0,04	0,14	60	0,002	0,02	0,06
DOC	mg/l	190	0,30	0,62	1,4							
LF	µS/cm	871	403	570	710	399	567	706	157	372	528	655
O ₂	mg/l	861	4,8	9,1	10,7	4,8	9,0	10,8	154	4,0	9,0	10,5
H	µg/l	873	0,02	0,05	0,08	0,02	0,05	0,08	155	0,02	0,05	0,08
pH	-		7,1	7,3	7,7	7,1	7,3	7,7		7,1	7,3	7,7
F	mg/l	402	0,04	0,08	0,13	0,04	0,07	0,14	114	0,05	0,09	0,14
Br	mg/l	229	0,001	0,006	0,05							
J	mg/l	30	0,002	0,002	0,005							
Ag	µg/l	211	0,001	0,002	0,02							
Al	µg/l	334	0,01	1,2	8,7	0,95	2,1	4,8	39	0,009	2,0	6,0
As	µg/l	374	0,2	0,59	1,7	0,19	0,49	1,3	47	0,15	0,40	1,2
B	µg/l	192	7,8	13,3	38							
Ba	µg/l	401	8,0	16	33	7,6	15,8	33	112	8,0	18	32
Bi	µg/l	260	0,001	0,002	0,02							
Cd	µg/l	470	0,004	0,03	0,17	0,007	0,04	0,23	124	0,003	0,01	0,07
Co	µg/l	387	0,02	0,07	0,5	0,10	0,18	0,32	110	0,01	0,05	0,27
Cr	µg/l	470	0,07	0,62	2,3	0,15	0,49	1,7	124	0,03	0,35	1,0
Cu	µg/l	327	0,42	0,67	3,3	0,36	0,60	0,99	38	0,47	0,66	2,7
Hg	µg/l	406	0,005	0,04	0,1	0,005	0,02	0,06	113	0,005	0,02	0,10
Li	µg/l	385	0,55	1,0	4,5	0,28	1,2	5,1	110	0,50	1,1	5,6
Ni	µg/l	471	0,15	0,59	2,0	0,24	0,48	0,95	124	0,09	0,70	2,0
Pb	µg/l	470	0,004	0,16	1,2	0,01	0,10	0,70	124	0,004	0,07	0,66
Sb	µg/l	260	0,001	0,02	0,06							
Se	µg/l	417	0,1	0,99	1,9	0,28	0,58	1,2	114	0,21	0,58	1,6
Si	mg/l	762	1,9	2,4	4,1							
Sn	µg/l	260	0,005	0,02	0,13							
Sr	µg/l	394	31,4	69	195	27,6	60	131	112	33,5	68	164
Zn	µg/l	428	0,02	3,3	20	0,70	3,1	13,8	115	0,03	4,5	13,6

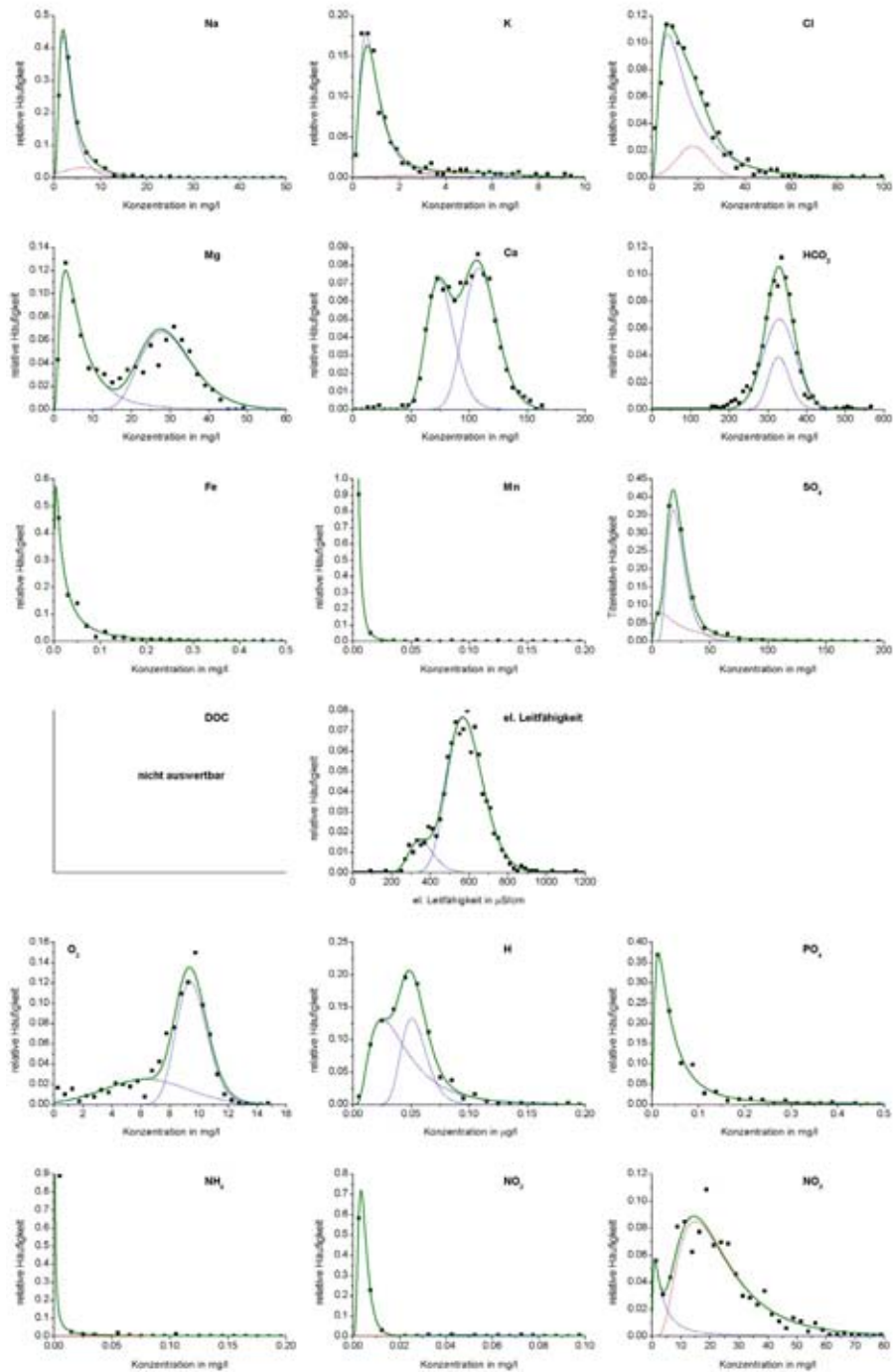


Abb. 29: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Kalksteine des Oberen Jura“.

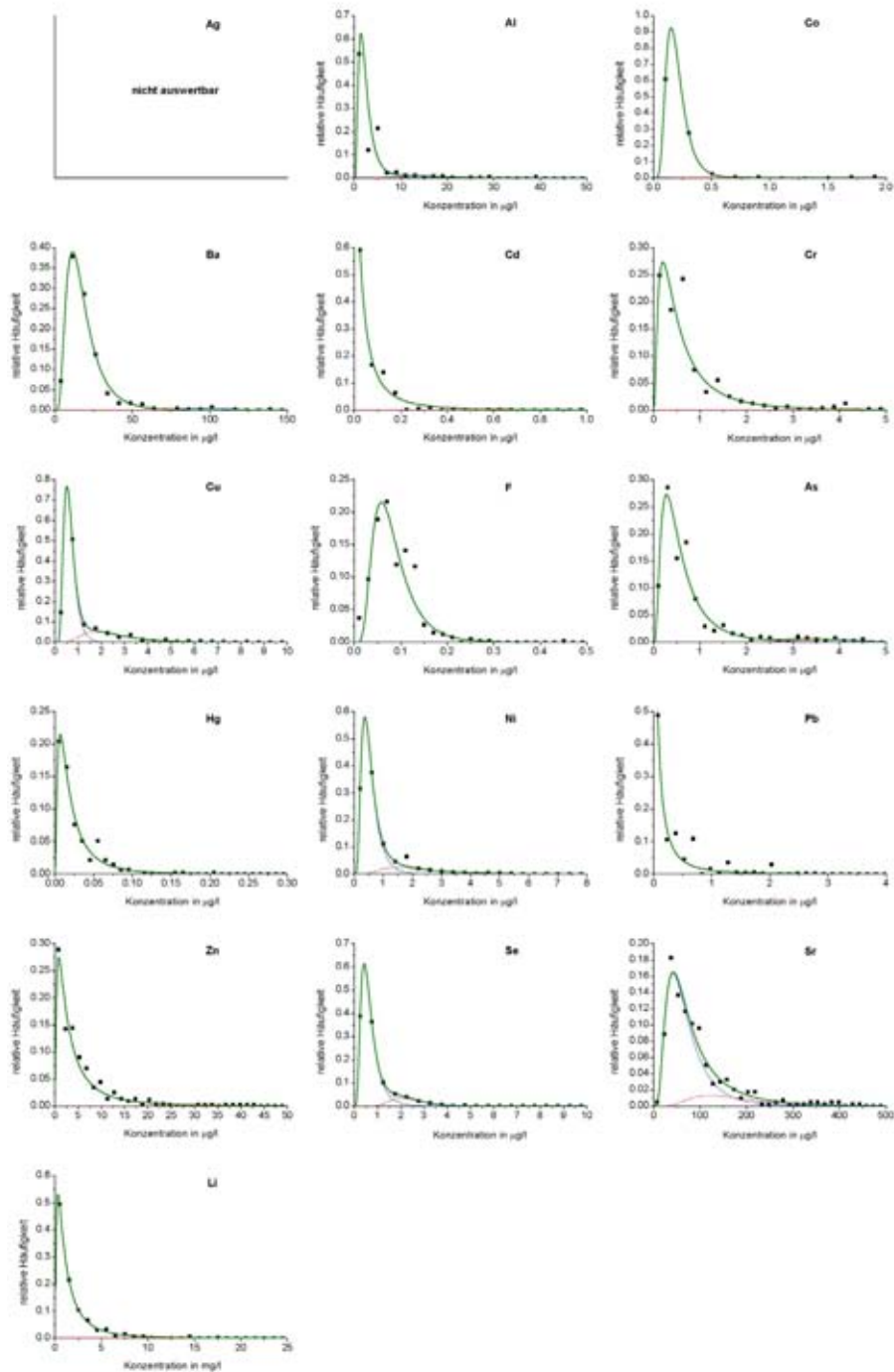


Abb. 30: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Kalksteine des Oberen Jura“.

ben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn für beide zu dieser Einheit beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 29 und Abb. 30 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

6.5.2 *Kalksteinfohlen des Muschelkalk*

Grundwassermessstellen aus dieser Einheit kommen überwiegend in Baden-Württemberg und Bayern, untergeordnet auch in Sachsen-Anhalt, Nordrhein-Westfalen, Hessen, Thüringen und Niedersachsen vor. Die Verbreitung der Grundwasserleiter der in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit zusammengefassten Grundwassermessstellen und die ausgewerteten Grundwassermessstellen ist in Karte 11 dargestellt. Die Kalksteinfohlen des Muschelkalk sind im Wesentlichen in den Oberen, Mittleren und Unteren Muschelkalk untergliedert. Petrographisch handelt es sich überwiegend um zum Teil verkarstete Karbonatgesteine. Es treten jedoch auch Gips- und Mergelgesteine sowie sandige Gesteine auf. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 885 Grundwassermessstellen ausgewertet. In Abb. 31 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn für die Mehrzahl der beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 32 und Abb. 33 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

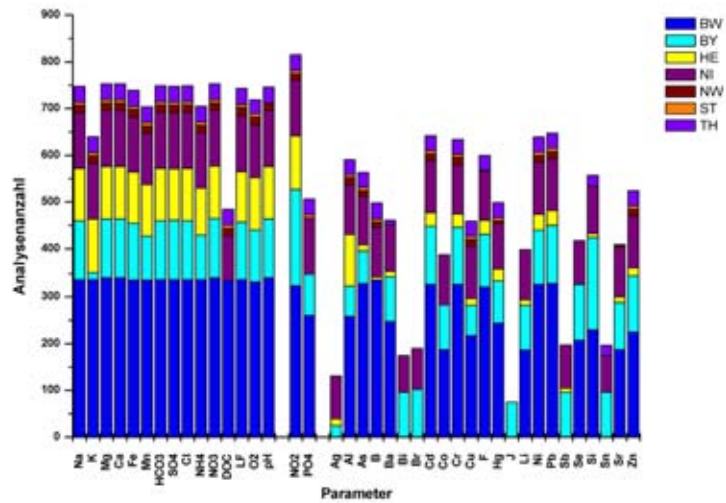
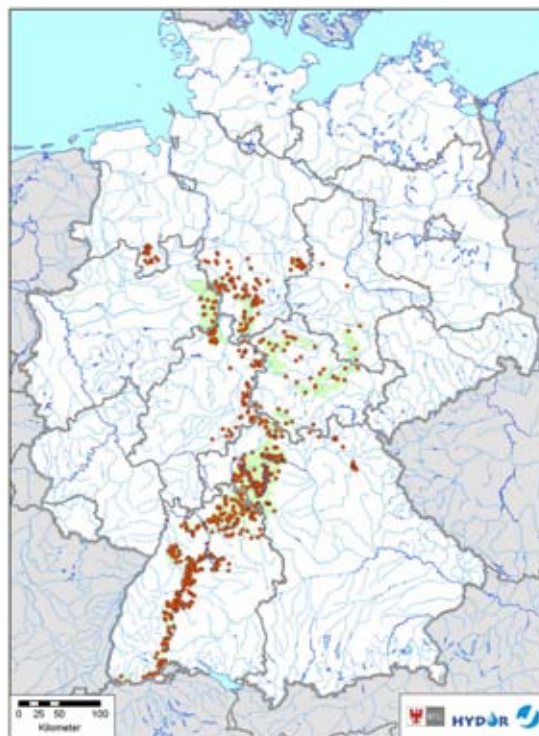


Abb. 31: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „Kalksteinfohlen des Muschelkalk“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 11: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „Kalksteinfohlen des Muschelkalk“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 11: Ergebnisse der statistischen Auswertungen für die hydrogeologische Bezugseinheit „Kalksteinfohlen des Muschelkalk“.

Parameter	Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
	N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na mg/l	748	2,9	6,6	22	3,0	5,3	9,2	80	2,1	3,6	8,1
K mg/l	640	0,66	1,3	3,8	0,6	1,2	2,1	71	0,5	0,9	1,8
Mg mg/l	753	12,8	28	51	16,8	29	50	81	4,2	14,9	46
Ca mg/l	753	83	122	170	86	122	160	81	38	93	132
Fe mg/l	739	0,003	0,01	0,1	0,000	0,003	0,05	78	0,002	0,01	0,05
Mn mg/l	704	0,0004	0,003	0,02	0,001	0,003	0,009	75	0,0002	0,001	0,008
HCO ₃ mg/l	749	265	363	433	295	367	440	80	121	308	416
SO ₄ mg/l	748	32	71	211	32	70	186	80	13,2	41	119
Cl mg/l	749	7,8	22	64	8,7	21	49	80	3,0	7,6	20
NH ₄ mg/l	705	0,0025	0,007	0,04	0,001	0,004	0,01	71	0,002	0,01	0,03
NO ₂ mg/l	815	0,0007	0,007	0,02	0,002	0,005	0,02	186	0,0007	0,0007	0,01
NO ₃ mg/l	753	4,9	24	52	2,9	10,8	40	81	3,0	6,1	9,5
PO ₄ mg/l	507	0,005	0,04	0,35	0,005	0,03	0,14	27	0,006	0,04	0,12
DOC mg/l	485	0,36	0,70	2,4	0,38	0,68	1,2	21	0,41	0,72	1,7
LF µS/cm	743	523	797	1100	546	796	1105	78	265	550	900
O ₂ mg/l	719	2,6	7,6	10,1	3,0	7,6	10,2	76	2,9	8,0	9,8
H µg/l	746	0,03	0,05	0,08	0,02	0,05	0,08	80	0,02	0,04	0,08
pH -		7,1	7,3	7,6	7,1	7,3	7,6		7,1	7,4	7,7
F mg/l	600	0,05	0,16	0,39	0,09	0,17	0,32	90	0,001	0,13	0,48
Br mg/l	190	0,001	0,02	0,07							
J mg/l	75	0,001	0,002	0,01							
Ag µg/l	131	0,0007	0,007	0,40							
Al µg/l	591	0,42	6,0	34	0,9	5,3	30	66	1,5	7,3	26
As µg/l	563	0,142	0,66	1,8	0,17	0,55	1,8	30	0,1	0,51	1,0
B µg/l	498	9,9	20	92	6,8	12,7	24	23	6,0	20	75
Ba µg/l	461	26	60	154	23	60	154	62	24	41	87
Bi µg/l	174	0,001	0,001	0,28							
Cd µg/l	642	0,007	0,09	0,33	0,03	0,07	0,18	89	0,001	0,03	0,17
Co µg/l	387	0,05	0,33	1,3	0,05	0,20	0,75	60	0,01	0,11	1,8
Cr µg/l	634	0,3	0,92	3,6	0,34	0,66	1,3	87	0,0007	0,66	5,6
Cu µg/l	459	0,66	1,33	6,7	0,22	0,44	0,89	23	0,660	1,4	4,0
Hg µg/l	499	0,005	0,1	0,1	0,03	0,05	0,08	79	0,005	0,009	0,27
Li µg/l	398	4,0	10,0	29	3,0	5,9	11,9	63	7,0	17	47
Ni µg/l	639	0,2	1,0	4,7	0,19	1,1	6,1	84	0,02	1,1	14,4
Pb µg/l	647	0,06	0,55	2,419	0,16	0,57	2,0	90	0,003	0,10	1,3
Sb µg/l	197	0,001	0,03	0,35							
Se µg/l	417	0,21	1,0	3,0	0,03	0,30	2,7	67	0,26	1,0	9,1
Si mg/l	557	2,7	4,2	6,4							
Sn µg/l	196	0,01	0,02	1,8							
Sr µg/l	409	150	590	2748	146	529	1912	63	194	1116	4494
Zn µg/l	524	0,67	10,0	67	2,9	6,3	13,9	75	4,8	22	101

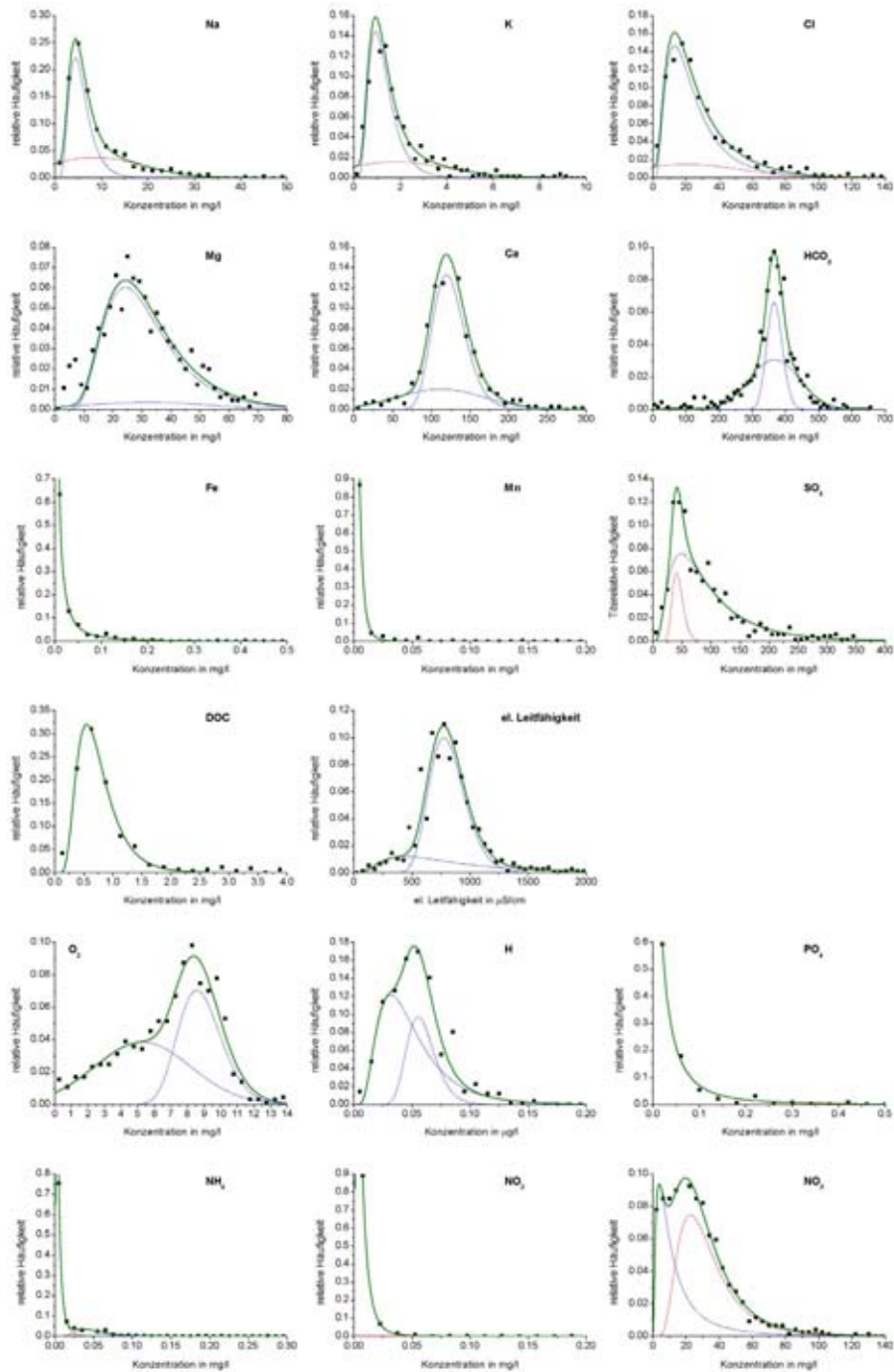


Abb. 32: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Kalksteinsolgen des Muschelkalk“.

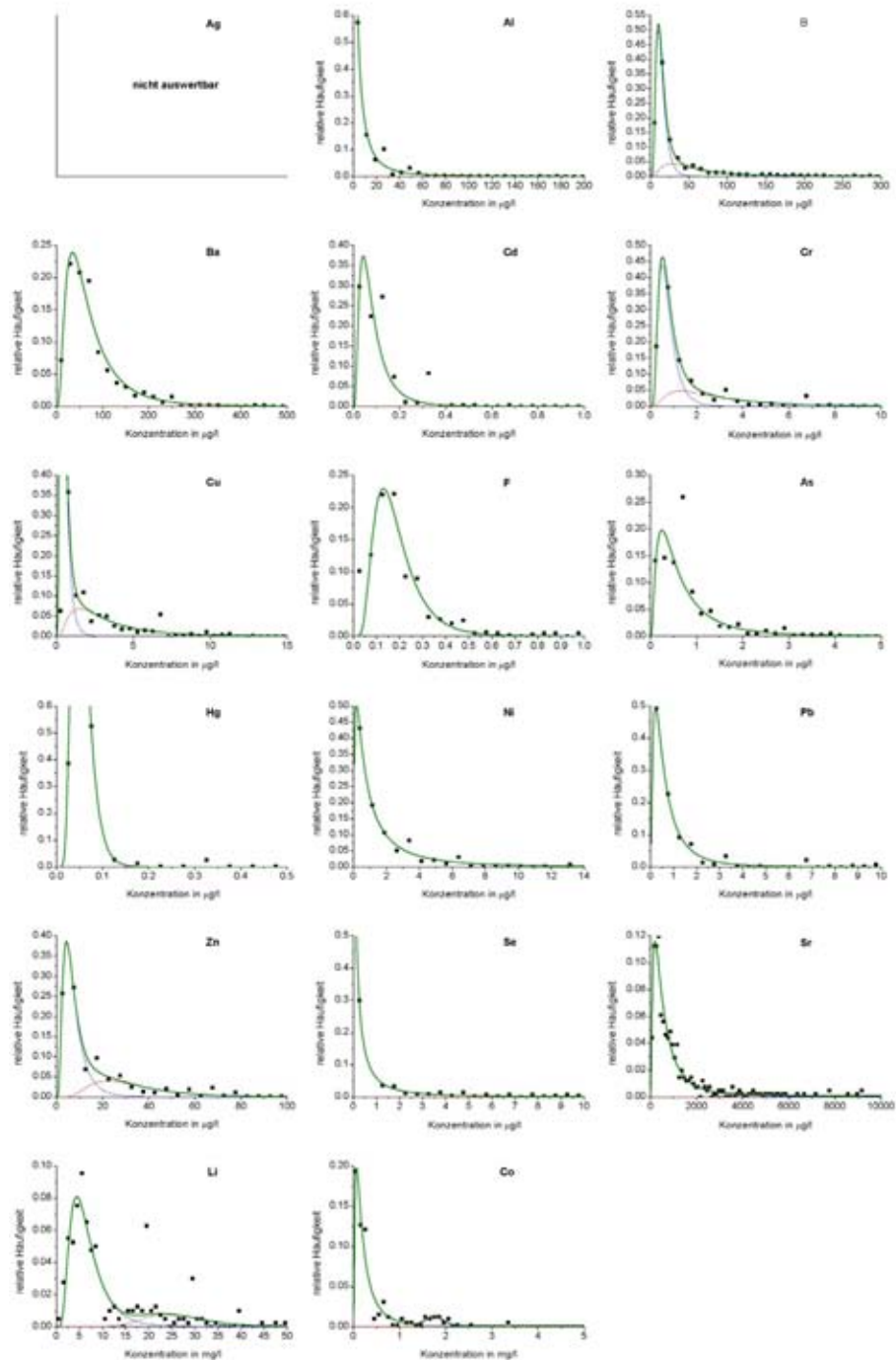


Abb. 33: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Kalksteinfolgen des Muschelkalk“.

6.5.3 *Kalksteine des alpinen Raumes*

Grundwasseranalysen aus dieser hydrogeologischen Bezugseinheit stammen aus kalkigen Sedimentgesteinen der Trias, die den nördlichen Kalkalpen zugerechnet werden. Da sie in der Regel einen geringen Lösungsinhalt aufweisen und sich dadurch von den Grundwässern aus den anderen triassischen Bezugseinheiten unterscheiden, wurden sie trotz der relativ geringen Zahl an Grundwassermessstellen als eigenständige Klasse ausgewertet. Die Verbreitung der Grundwasserleiter der in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit zusammengefassten Grundwassermessstellen und die ausgewerteten Grundwassermessstellen ist in Karte 16 dargestellt. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 206 Grundwassermessstellen ausgewertet, die sämtlich aus dem Datensatz des Bayerischen Geologischen Landesamtes stammen. In Abb. 34 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt.

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn Anzahl der zur Verfügung stehenden Analysen über 100 lag.

In Abb. 35 und Abb. 36 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

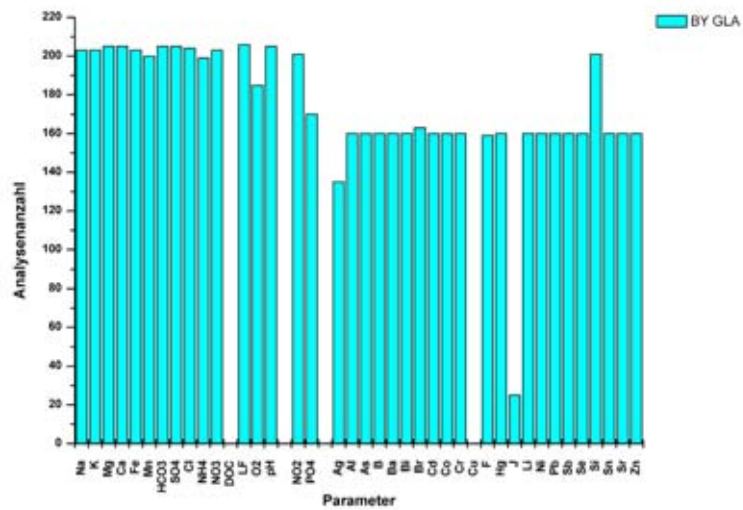


Abb. 34: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „Kalksteine des alpinen Raumes“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 12: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „Kalksteine des alpinen Raumes“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 12: Ergebnisse der statistischen Auswertungen für die hydrogeologische Bezugseinheit „Kalksteine des alpinen Raumes“.

Parameter	Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
	N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na mg/l	203	0,04	0,23	1,3	0,04	0,23	1,3	105	0,04	0,17	0,72
K mg/l	203	0,06	0,21	0,4	0,09	0,19	0,40	104	0,06	0,21	0,38
Mg mg/l	205	0,77	7,4	20	1,2	7,6	24	105	0,65	6,4	18
Ca mg/l	205	25	41	61	27	41	60	105	24	38	50
Fe mg/l	203	0,0001	0,004	0,05	0,001	0,004	0,04	104	0,0001	0,003	0,01
Mn mg/l	200	0,0001	0,0001	0,002	0,001	0,001	0,001	103	0,0001	0,0001	0,002
HCO ₃ mg/l	205	96	167	232	98	167	241	105	93	150	212
SO ₄ mg/l	205	0,68	3,7	13,8	0,42	3,6	13,3	105	0,65	2,8	8,9
Cl mg/l	204	0,15	0,43	2,0	0,17	0,42	1,0	105	0,12	0,32	1,0
NH ₄ mg/l	199	0,001	0,001	0,02	0,001	0,002	0,007	102	0,001	0,001	0,02
NO ₂ mg/l	201	0,001	0,001	0,05	0,002	0,004	0,009	103	0,001	0,001	0,04
NO ₃ mg/l	203	0,79	2,4	5,7	0,944	2,6	7,2	104	0,8	2,3	4,6
PO ₄ mg/l	170	0,001	0,04	0,27	0,002	0,007	0,02	94	0,001	0,04	0,22
DOC mg/l											
LF µS/cm	206	63	310	1962	212	304	435	106	69	285	1805
O ₂ mg/l	185	7,2	9,5	11,5	7,1	9,4	11,4	95,0	7,4	9,7	11,2
H µg/l	205	0,004	0,01	0,03	0,005	0,01	0,04	106	0,003	0,01	0,02
pH -		7,6	7,9	8,4	7,4	7,9	8,3		7,7	8,0	8,5
F mg/l	159	0,001	0,03	0,09	0,003	0,02	0,11	91	0,001	0,02	0,07
Br mg/l	163	0,001	0,001	0,1	0,0004	0,002	0,02	92	0,001	0,001	0,06
J mg/l	25	0,001	0,001	0,002							
Ag µg/l	135	0,002	0,002	0,05	0,002	0,005	0,02	82	0,002	0,003	0,06
Al µg/l	160	0,002	2,3	9,3	0,90	2,6	7,5	91	0,002	2,3	6,7
As µg/l	160	0,03	0,21	0,76	0,07	0,19	0,55	91	0,03	0,21	0,45
B µg/l	160	0,02	2,3	10,7	0,32	2,2	15	91	0,02	2,4	8,5
Ba µg/l	160	0,60	2,7	20	0,44	1,3	4,0	91	0,60	2,0	12,6
Bi µg/l	160	0,001	0,001	0,01	0,001	0,002	0,008	91	0,001	0,001	0,01
Cd µg/l	160	0,001	0,006	0,02	0,002	0,01	0,02	91	0,001	0,01	0,03
Co µg/l	160	0,001	0,01	0,06	0,002	0,01	0,03	91	0,001	0,01	0,03
Cr µg/l	160	0,09	0,36	6,8	0,09	0,30	0,99	91	0,09	0,3	2,4
Cu µg/l											
Hg µg/l	160	0,005	0,04	0,29	0,005	0,04	0,29	91	0,005	0,03	0,22
Li µg/l	160	0,009	0,14	1,2	0,013	0,10	0,85	91	0,01	0,11	0,75
Ni µg/l	160	0,02	0,37	0,85	0,12	0,28	0,65	91	0,10	0,39	0,83
Pb µg/l	160	0,003	0,009	0,47	0,00	0,005	0,31	91	0,003	0,01	0,53
Sb µg/l	160	0,05	0,14	0,28	0,06	0,15	0,33	91	0,05	0,13	0,26
Se µg/l	160	0,26	0,53	3,5	0,12	0,26	0,54	91	0,26	0,59	3,4
Si mg/l	201	0,14	0,66	5,6	0,11	0,44	1,8	103	0,14	0,51	5,3
Sn µg/l	160	0,01	0,01	0,07	0,00	0,01	0,10	91	0,01	0,01	0,06
Sr µg/l	160	10,7	28	315	8,4	23	64	91	10,7	22	231
Zn µg/l	160	0,18	1,9	16	0,11	1,1	9,9	91	0,12	1,6	16

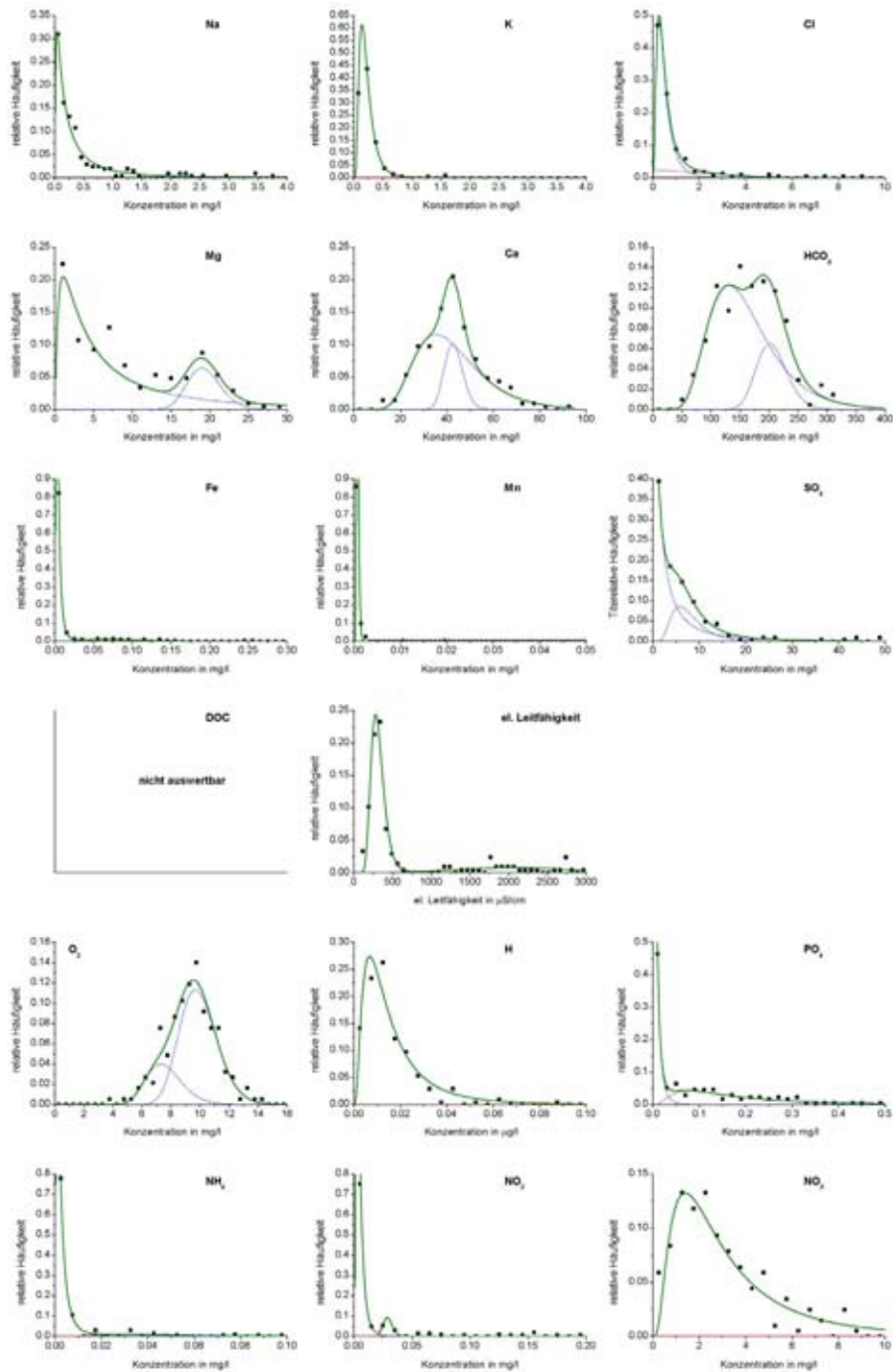


Abb. 35: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Kalksteine des alpinen Raumes“.

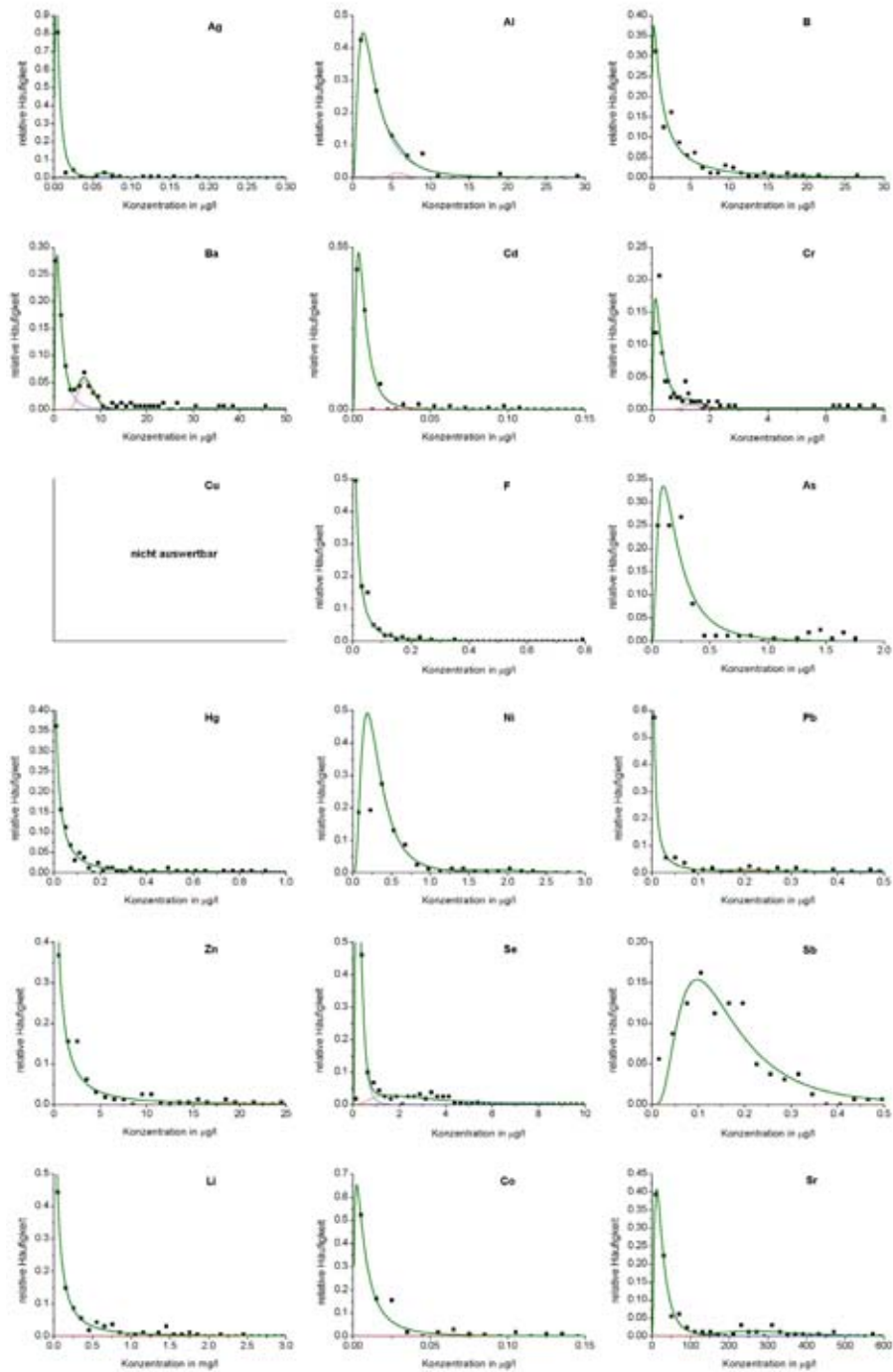


Abb. 36: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Kalksteine des alpinen Raumes“.

6.5.4 Paläozoische Kalksteine

Die in dieser Gruppe zusammengefassten Grundwassermessstellen entstammen vorwiegend verkarsteten Gesteinen aus dem Mittel- und Oberdevon des Rheinischen Schiefergebirges (Massenkalk) und dem Zechstein. Karte 13 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 192 Grundwassermessstellen ausgewertet. In Abb. 37 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die unterschiedlichen Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 13 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn aus der Mehrzahl der zu dieser Einheit beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 38 und Abb. 39 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

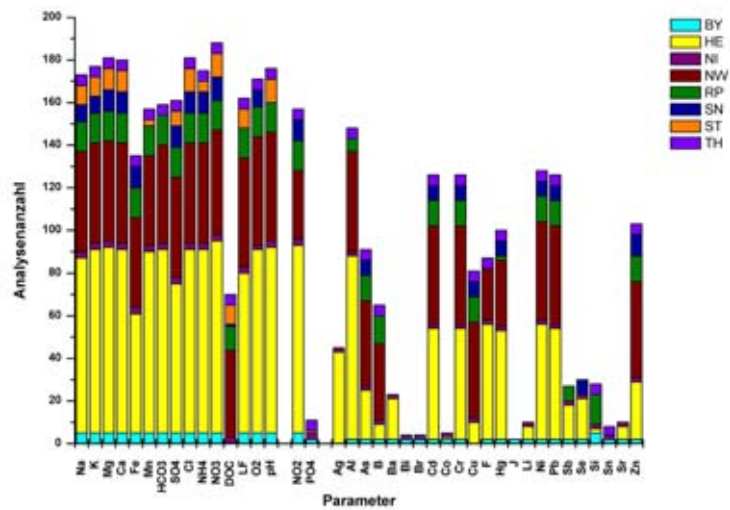


Abb. 37: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „paläozoische Kalksteine“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 13: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „paläozoische Kalksteine“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 13: Ergebnisse der statistischen Auswertungen für die hydrogeologische Bezugseinheit „paläozoische Kalksteine“.

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	173	4,4	9,6	42	4,0	8,5	18	27	4,2	7,8	19
K	mg/l	177	0,70	1,9	5,8	0,70	1,8	4,4	27	0,65	1,8	3,5
Mg	mg/l	181	6,9	23	46	6,9	24	45	27	5,8	17	46
Ca	mg/l	180	54	96	199	60	93	146	27	57	83	119
Fe	mg/l	135	0,01	0,03	0,6							
Mn	mg/l	157	0,001	0,006	0,11	0,002	0,006	0,02	25	0,001	0,01	0,12
HCO ₃	mg/l	159	183	281	421	193	293	444	25	161	293	398
SO ₄	mg/l	161	19	37	168	16	42	108	24	24	32	92
Cl	mg/l	181	8,0	20	70	7,7	17	39	27	6,0	10	29
NH ₄	mg/l	175	0,003	0,015	0,1	0,0001	0,0003	0,02	27	0,001	0,01	0,06
NO ₂	mg/l	157	0,001	0,001	0,02	0,0005	0,003	0,02	26	0,001	0,001	0,02
NO ₃	mg/l	188	1,8	20	41	0,90	4,1	19	26	0,31	3,2	9,4
PO ₄	mg/l	11	0,001	0,04	0,32							
DOC	mg/l	70	0,6	1,0	2,3							
LF	µS/cm	162	396	615	1195	432	600	833	25	318	530	671
O ₂	mg/l	171	2,4	7,0	9,6	2,3	7,0	9,6	27	1,9	3,5	8,9
H	µg/l	176	0,03	0,05	0,14	0,02	0,05	0,11	27	0,03	0,05	0,09
pH	-		6,9	7,3	7,6	7,0	7,3	7,6		7,1	7,3	7,6
F	mg/l	87	0,06	0,13	0,38	0,04	0,12	0,37	15	0,03	0,15	0,47
Br	mg/l	4	0,004	0,02	0,05							
J	mg/l	2	0,001	0,001	0,001							
Ag	µg/l	45	0,06	0,06	0,07							
Al	µg/l	148	2,5	10,5	60	3,6	7,6	16	22	1,1	13,4	50
As	µg/l	91	0,66	1,0	8,0	0,25	1,0	4,5	14	0,48	1,3	7,3
B	µg/l	65	10,0	13,3	82,7	1,8	8,5	40	6	5,7	16,7	47
Ba	µg/l	23	0,01	28,1	95,6							
Bi	µg/l	4	0,001	0,001	0,01							
Cd	µg/l	126	0,03	0,14	0,47	0,001	0,02	0,23	21	0,03	0,03	0,33
Co	µg/l	5	0,04	0,31	2,8							
Cr	µg/l	126	0,001	1,3	6,7	0,91	2,4	6,6	21	0,001	0,001	3,3
Cu	µg/l	81	0,67	3,3	11,0	1,6	3,4	7,3	9	0,67	1,3	6,7
Hg	µg/l	100	0,02	0,03	0,33				17	0,01	0,02	0,03
Li	µg/l	10	2,0	10,1	43							
Ni	µg/l	128	0,1	3,3	13,3	1,8	4,7	12,7	21	0,1	0,07	13,3
Pb	µg/l	126	0,06	1,99	6,8				21	0,06	0,06	3,3
Sb	µg/l	27	0,39	0,4	1,3							
Se	µg/l	30	0,01	0,01	0,4							
Si	mg/l	28	2,2	4,5	7,4							
Sn	µg/l	8	0,01	1,7	3,3							
Sr	µg/l	10	101	515	2565							
Zn	µg/l	103	0,67	33	126	7,43	22	65	14	0,7	20	419

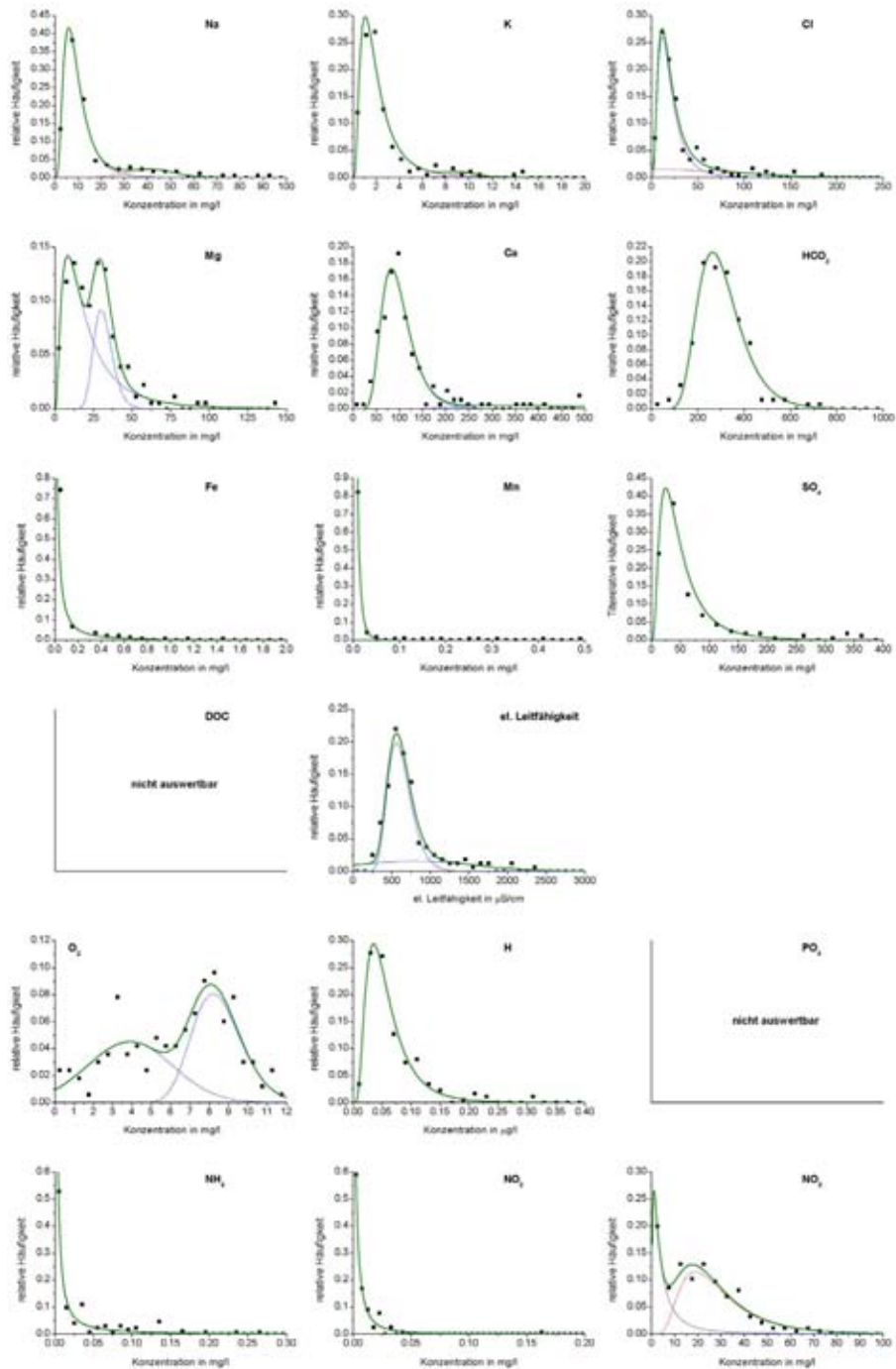


Abb. 38: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „paläozoische Kalksteine“.

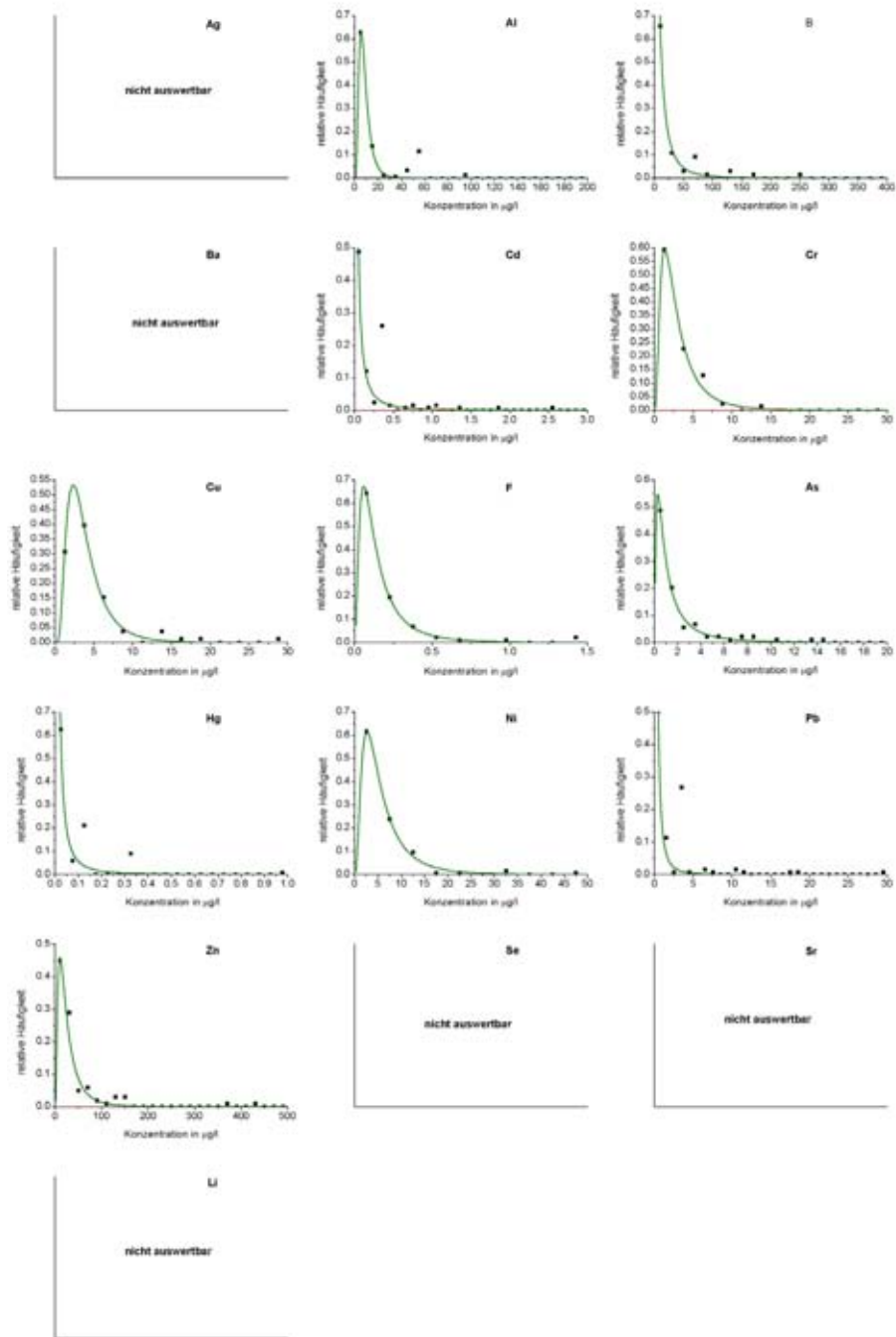


Abb. 39: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „paläozoische Kalksteine“.

6.5.5 *Karbonatische Wechselfolgen*

Grundwasseranalysen dieser Einheit stammen überwiegend aus Gesteinen des Keupers, untergeordnet der Kreide. Es handelt sich hierbei zumeist um kalkhaltige Mergelgesteine mit silikatischen (tonigen oder sandigen) Zwischenlagen. Der Kalkgehalt ist deutlich geringer als bei den Kalksteinen; hydrochemisch sind sie jedoch von den silikatischen Wechselfolgen zu unterscheiden. Im Gegensatz zu diesen enthalten die karbonatischen Wechselfolgen nur untergeordnet silikatische Fazies. Karte 14 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 1259 Grundwassermessstellen ausgewertet. In Abb. 40 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die unterschiedlichen Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn aus der Mehrzahl der zu dieser Einheit beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 41 und Abb. 42 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

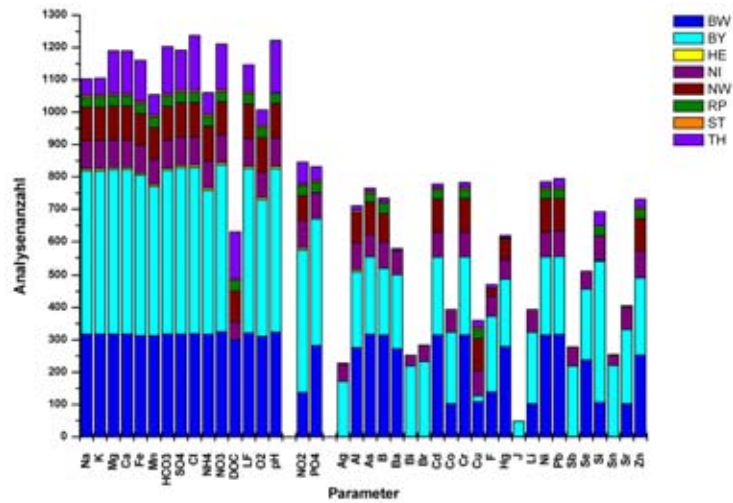
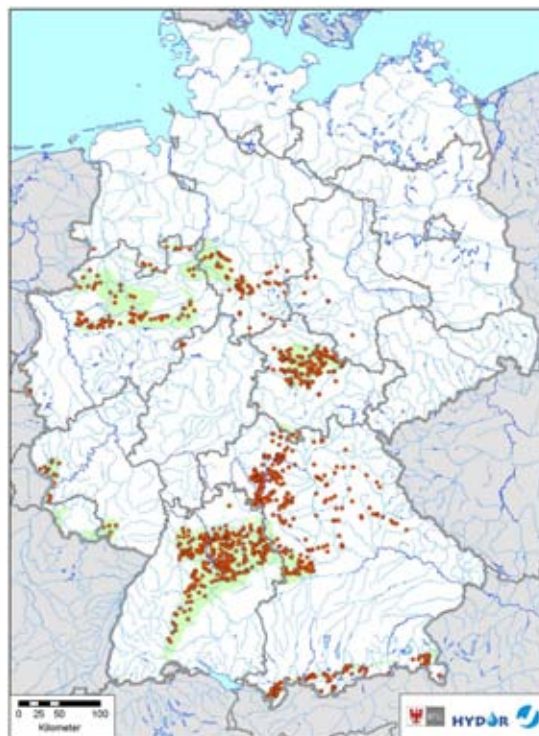


Abb. 40: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „karbonatische Wechselfolgen“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 14: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „karbonatische Wechselfolgen“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 14: Ergebnisse der statistischen Auswertungen für die hydrogeologische Bezugseinheit „karbonatische Wechselfolgen“.

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	1103	1,7	7,8	29	3,8	7,5	15	209	0,33	3,2	11
K	mg/l	1105	0,55	1,9	8,4	0,53	1,8	6,1	209	0,22	0,8	3,2
Mg	mg/l	1190	4,3	33	71	4,1	26,3	65	214	2,3	10,5	39
Ca	mg/l	1189	50	113	239	52	112	167	214	34	67	120
Fe	mg/l	1160	0,0001	0,02	0,57	0,0001	0,001	0,02	221	0,0001	0,01	0,20
Mn	mg/l	1054	0,0001	0,005	0,1	0,000	0,003	0,05	211	0,0001	0,0001	0,03
HCO ₃	mg/l	1203	168	354	481	187	355	481	218	118	227	383
SO ₄	mg/l	1191	12,5	50	513	13,2	47	169	218	4,7	20	142
Cl	mg/l	1237	1,5	28	96	1,3	8,4	52	229	0,3	3,3	31
NH ₄	mg/l	1060	0,001	0,01	0,2	0,002	0,004	0,007	199	0,001	0,001	0,05
NO ₂	mg/l	845	0,001	0,01	0,04	0,0003	0,0016	0,009	176	0,001	0,001	0,02
NO ₃	mg/l	1211	0,96	16,9	64	1,1	3,9	14,0	212	0,79	3,2	8,0
PO ₄	mg/l	831	0,001	0,04	0,3	0,001	0,02	0,21	159	0,001	0,02	0,17
DOC	mg/l	630	0,40	0,90	3,4	0,40	0,76	1,5	58	0,37	1,1	3,2
LF	µS/cm	1146	330	771	1440	333	768	1307	218	204	409	723
O ₂	mg/l	1007	1,7	7,1	10,2				199	2,2	8,7	10,3
H	µg/l	1222	0,02	0,05	0,13	0,02	0,05	0,12	226	0,01	0,03	0,11
pH	-		6,9	7,3	7,7	6,9	7,3	7,7		6,9	7,5	7,9
F	mg/l	471	0,03	0,2	0,395	0,03	0,12	0,43	118	0,03	0,08	0,28
Br	mg/l	284	0,001	0,001	0,08							
J	mg/l	49	0,001	0,003	0,01							
Ag	µg/l	228	0,002	0,002	0,20							
Al	µg/l	711	0,002	5,0	60	0,47	3,6	27	143	0,002	2,0	30
As	µg/l	765	0,07	0,8	2,7	0,31	0,75	1,8	148	0,02	0,15	1,4
B	µg/l	735	5,44	30	200	6,1	19,7	63,5	151	0,02	15	90
Ba	µg/l	579	10,0	70	580	7,8	29,8	113,4	135	4,6	25	240
Bi	µg/l	252	0,001	0,003	0,02							
Cd	µg/l	778	0,001	0,1	0,33	0,058	0,11	0,20	150	0,001	0,01	0,20
Co	µg/l	394	0,02	0,13	1,6							
Cr	µg/l	782	0,19	1,275	6,7	0,29	0,97	3,2	150	0,07	0,35	2,0
Cu	µg/l	360	0,66	2,7	13,3	0,32	2,5	19	29	0,66	2,2	12,9
Hg	µg/l	619	0,005	0,1	0,16	0,03	0,06	0,11	137	0,005	0,01	0,12
Li	µg/l	394	1,6	8,0	38							
Ni	µg/l	785	0,054	1,0	7,0	0,04	0,47	5,7	150	0,02	0,32	3,3
Pb	µg/l	794	0,003	0,5	6,8	0,07	0,37	1,9	150	0,003	0,01	3,2
Sb	µg/l	278	0,001	0,02	0,12							
Se	µg/l	512	0,26	1,0	1,3							
Si	mg/l	693	1,3	4,1	7,3							
Sn	µg/l	255	0,005	0,005	0,22							
Sr	µg/l	405	93	317	3266							
Zn	µg/l	731	2,2	10,0	80,0	2,6	5,4	10,9	142	0,82	5,0	19,9

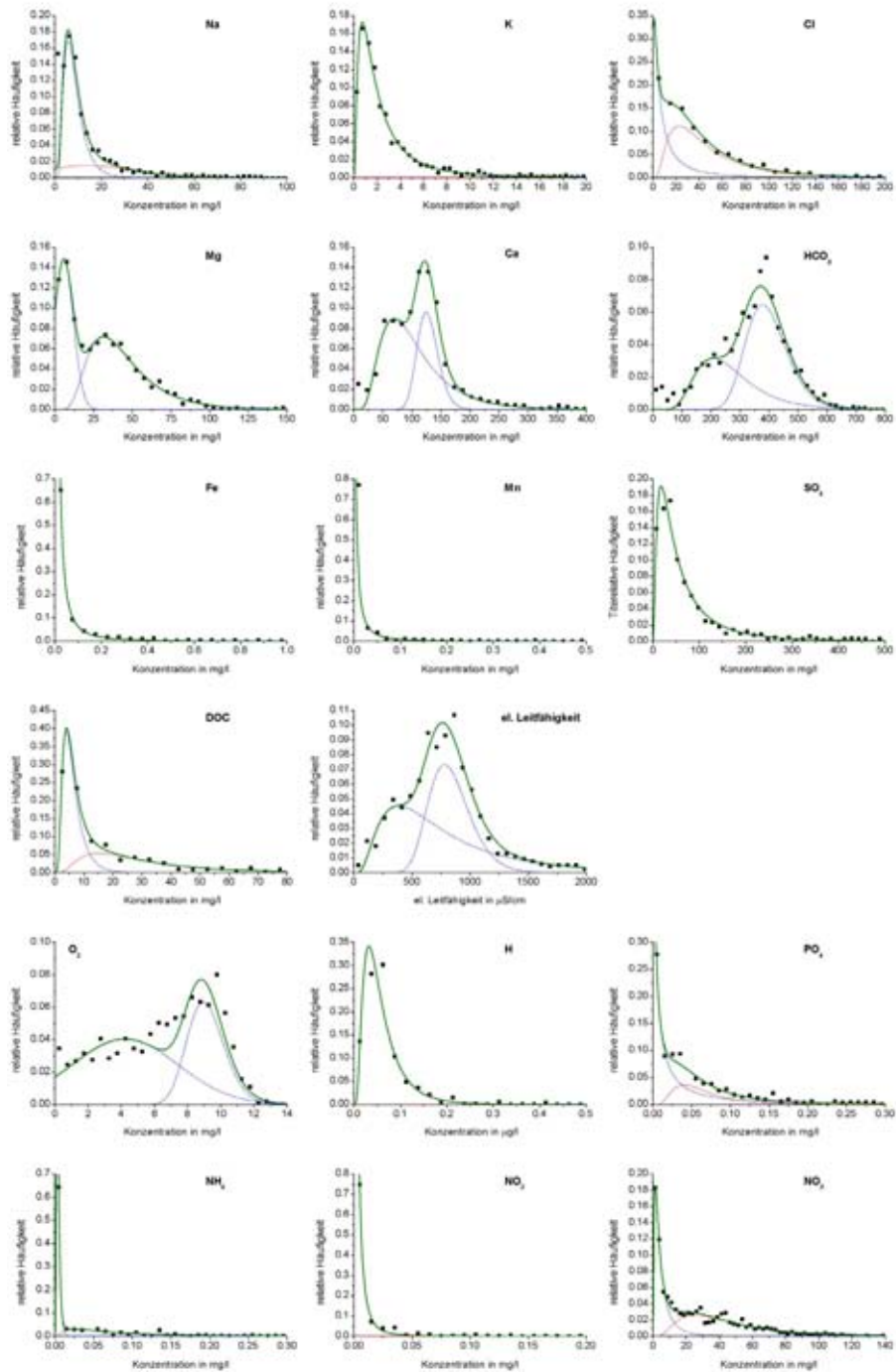


Abb. 41: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „karbonatische Wechselfolgen“.

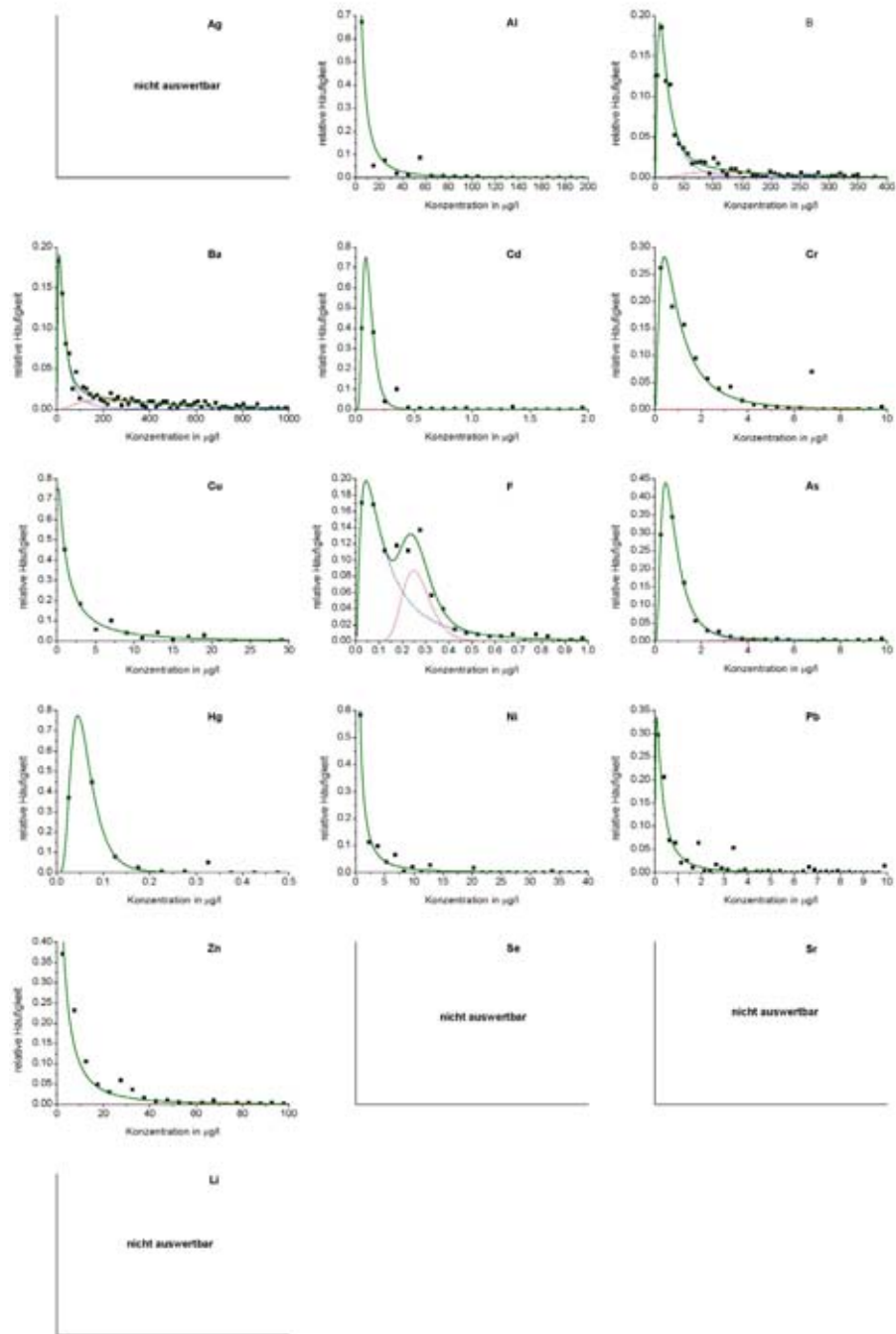


Abb. 42: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „karbonatische Wechselfolgen“.

6.6 Silikatische Festgesteinseinheiten

In dieser Gruppe sind die Festgesteinseinheiten mit silikatischer Bindung zusammengefasst. Hierzu gehören die mesozoischen Sedimentgesteine (z.B. Buntsandstein) ebenso wie die paläozoischen Sediment- und Kristallingesteine sowie die känozoischen Vulkanite.

6.6.1 Sandsteine und silikatische Wechselfolgen

Dieser hydrogeologischen Bezugseinheit wurden zusammengefasst Grundwassermessstellen zugeordnet, die aus Wechselfolgen von Sandsteinen und Tonsteinen mehrerer Zeitalter stammen. Hierzu zählen insbesondere Proben aus dem Rotliegenden sowie die nicht zum Buntsandstein gehörenden Sandstein- und Tonsteinwechselfolgen aus dem Mesozoikum, die untergeordnet auch karbonatische Fazies enthalten können. Karte 15 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 1202 Grundwassermessstellen ausgewertet. In Abb. 43 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die unterschiedlichen Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn aus der Mehrzahl der zu dieser Einheit beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

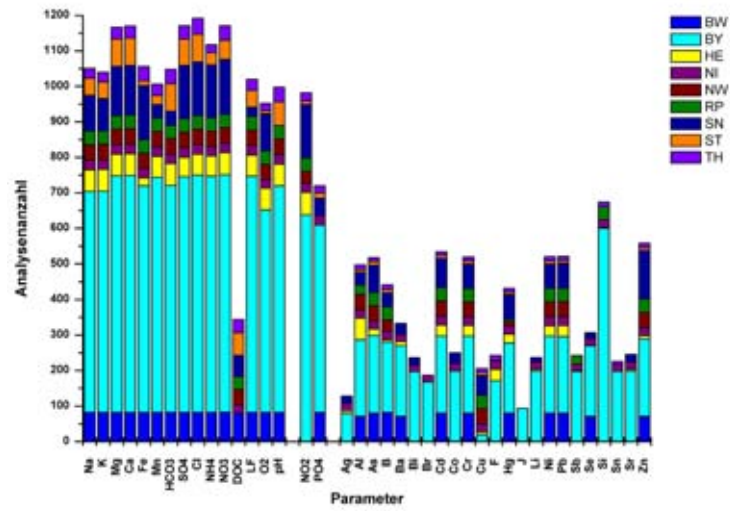
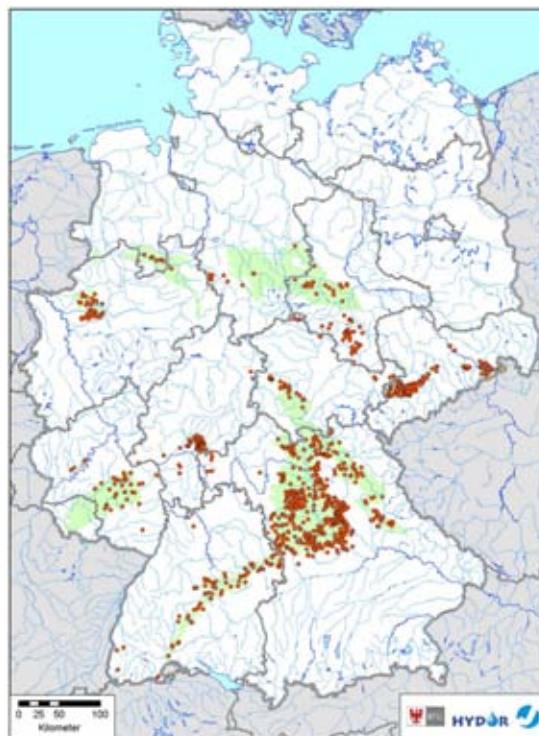


Abb. 43: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „Sandsteine und silikatische Wechselfolgen“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 15: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „Sandsteine und silikatische Wechselfolgen“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 15: Ergebnisse der statistischen Auswertungen für die hydrogeologische Bezugseinheit „Sandsteine und silikatische Wechselfolgen“.

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	1051	1,3	6,2	30	1,2	5,3	24	166	1,2	3,1	14,0
K	mg/l	1040	0,83	2,7	8,0	0,76	2,4	7,4	165	0,60	1,7	3,7
Mg	mg/l	1167	3,9	17,4	46	4,0	19,5	51	195	2,7	10,6	39
Ca	mg/l	1170	27	79	135	25	76	134	195	16	70	112
Fe	mg/l	1056	0,0008	0,04	0,5	0,01	0,03	0,10	180	0,0001	0,04	0,34
Mn	mg/l	1006	0,0001	0,0024	0,1	0,0001	0,004	0,07	181	0,0001	0,0001	0,10
HCO ₃	mg/l	1048	79	289	406	60	280	403	177	50	274	389
SO ₄	mg/l	1171	14,0	38	155	14,2	37	95	197	7,1	28	71
Cl	mg/l	1192	5,0	20,4	55	5,2	16,8	55	200	2,6	6,9	27
NH ₄	mg/l	1117	0,001	0,001	0,12	0,0003	0,001	0,004	188	0,001	0,001	0,06
NO ₂	mg/l	982	0,001	0,001	0,02	0,001	0,003	0,01	166	0,001	0,001	0,01
NO ₃	mg/l	1171	1,0	16,5	50	2,1	4,2	8,5	195	0,10	3,9	8,9
PO ₄	mg/l	720	0,001	0,001	0,2	0,001	0,002	0,005	134	0,001	0,001	0,09
DOC	mg/l	344	0,47	1,1	3,7							
LF	µS/cm	1020	264	560	891	241	539	875	183	144	410	651
O ₂	mg/l	952	1,8	7,1	10,2	7,2	8,6	10,4	170	1,5	7,1	10,1
H	µg/l	998	0,02	0,05	0,25	0,02	0,05	0,12	176	0,02	0,05	0,40
pH	-		6,6	7,3	7,7	6,9	7,3	7,7		6,4	7,3	7,7
F	mg/l	243	0,007	0,12	0,36							
Br	mg/l	187	0,001	0,02	0,06							
J	mg/l	94	0,001	0,005	0,01							
Ag	µg/l	128	0,001	0,002	0,07							
Al	µg/l	498	0,002	6,0	115	0,66	4,8	34	77	0,002	5,0	50
As	µg/l	517	0,033	1,0	8,0	0,25	1,1	4,9	81	0,001	0,7	4,7
B	µg/l	442	4,4	30	192	4,6	19,5	83	72	0,18	20	119
Ba	µg/l	333	6,3	88	458							
Bi	µg/l	236	0,001	0,002	0,08							
Cd	µg/l	534	0,001	0,071	0,33	0,01	0,05	0,22	81	0,0013	0,010	0,30
Co	µg/l	250	0,001	0,12	2,0							
Cr	µg/l	519	0,11	1,1	4,0	0,05	0,41	3,5	81	0,030	0,60	3,3
Cu	µg/l	206	0,67	2,7	20							
Hg	µg/l	432	0,005	0,027	0,27	0,0001	0,002	0,03	75	0,005	0,005	0,10
Li	µg/l	237	2,6	12,2	65							
Ni	µg/l	520	0,02	1,3	7,3	0,17	1,1	7,6	81	0,02	1,0	5,0
Pb	µg/l	521	0,003	0,46	3,12	0,00	0,05	1,5	81	0,003	0,22	3,3
Sb	µg/l	243	0,001	0,01	1,3							
Se	µg/l	307	0,26	0,45	1,3							
Si	mg/l	674	2,02	3,8	6,7							
Sn	µg/l	226	0,01	0,01	0,16							
Sr	µg/l	246	45	133	896							
Zn	µg/l	558	0,001	7,87	43	0,59	4,2	30	82	1,03	7,1	22

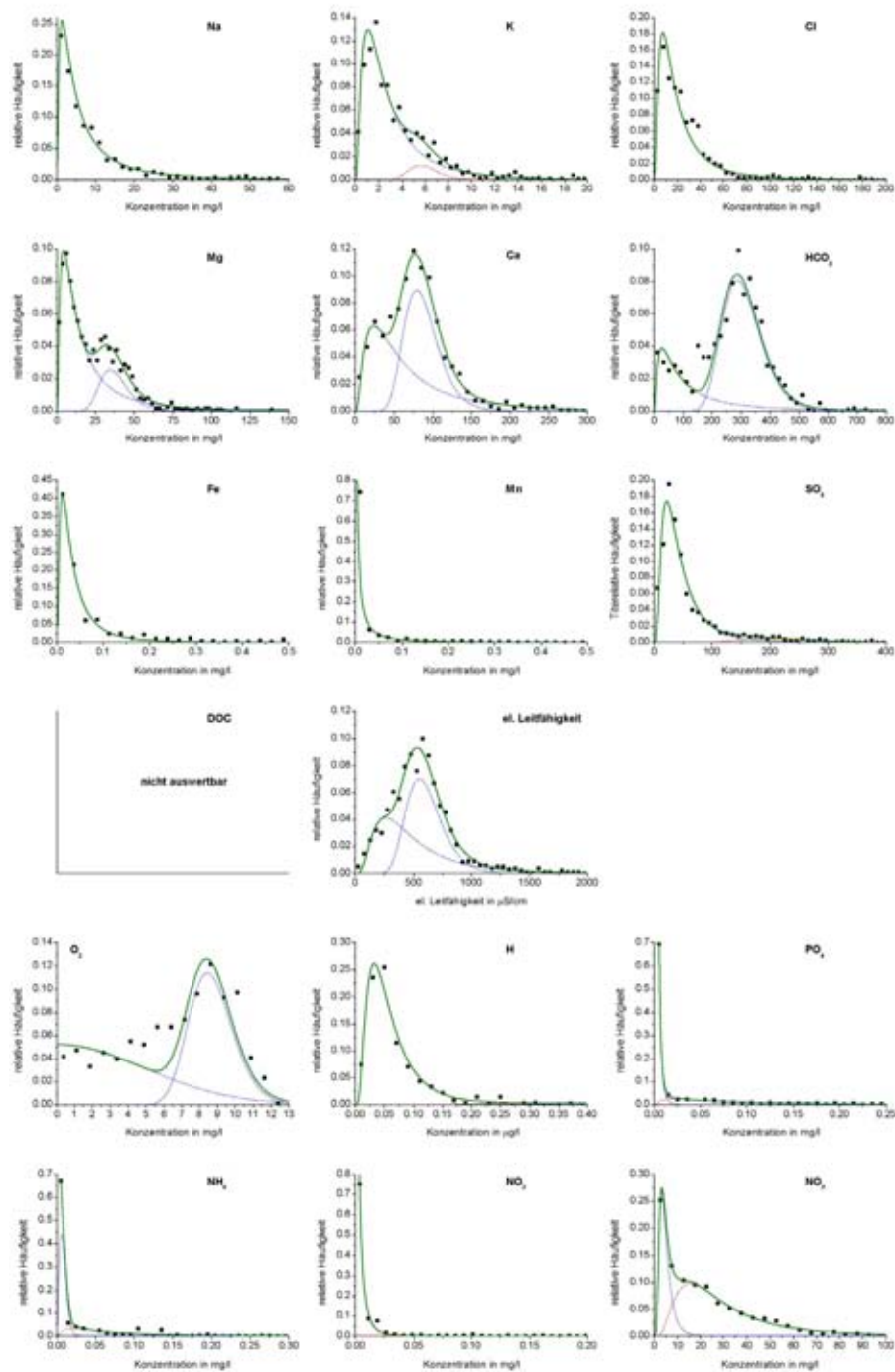


Abb. 44: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Sandsteine und silikatische Wechselfolgen“.

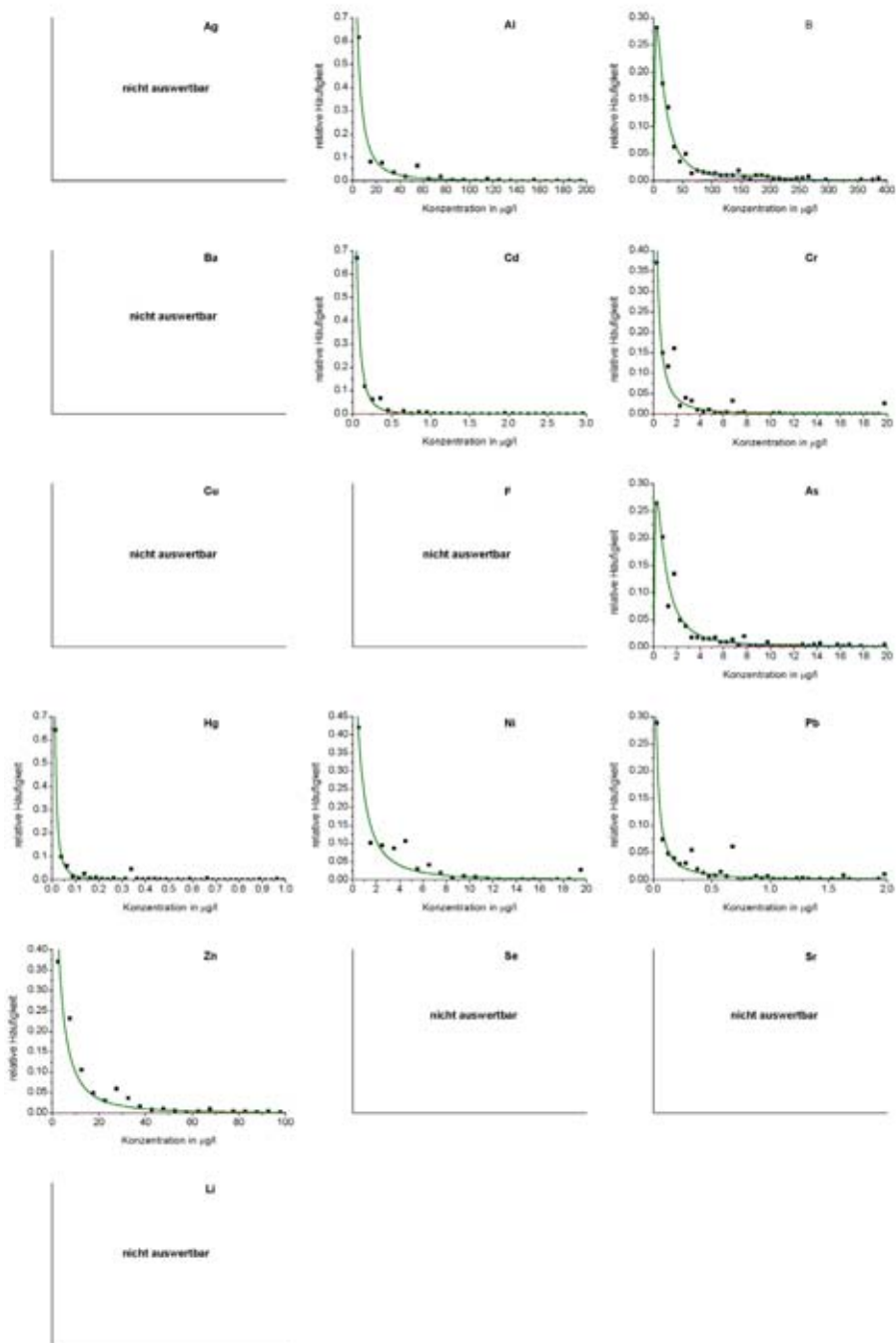


Abb. 45: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Sandsteine und silikatische Wechselfolgen“.

In Abb. 44 und Abb. 45 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

6.6.2 Sandsteinfohlen des Buntsandstein

Grundwassermessstellen dieser Einheit stammen vorwiegend aus Süd- und Mitteldeutschland, vor allem aus Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg, Hessen, Südniedersachsen und Thüringen. Durch die silikatische Gesteinsausprägung sind die Wässer zumeist sehr ionenarm und versauerungsgefährdet. Karte 16 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 1982 Grundwassermessstellen ausgewertet. In Abb. 46 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die unterschiedlichen Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 16 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswertungsverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn aus der Mehrzahl der zu dieser Einheit beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 47 und Abb. 48 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

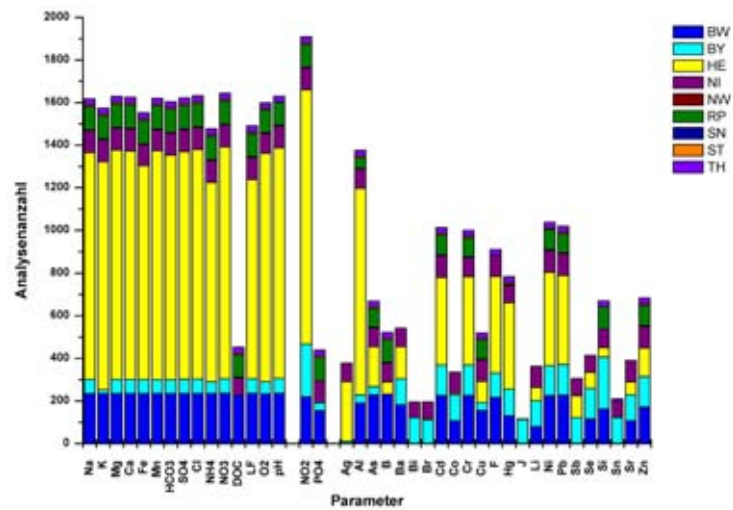
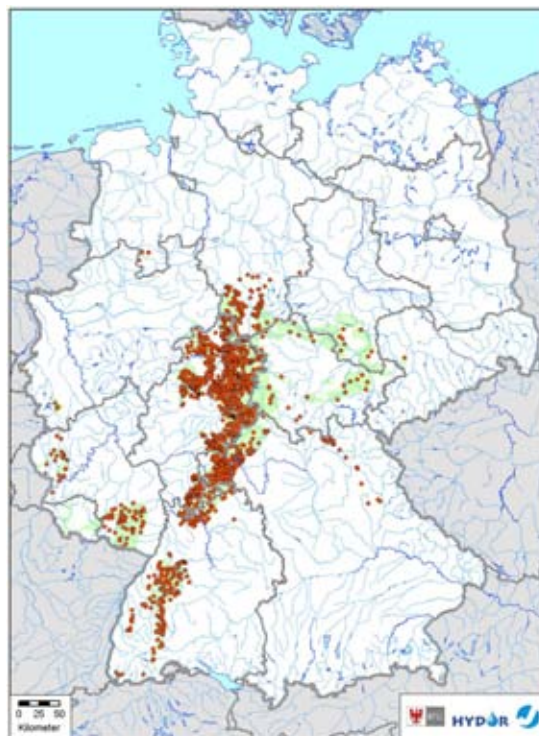


Abb. 46: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „Sandsteinfohlen des Buntsandstein“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 16: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „Sandsteinfohlen des Buntsandstein“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 16: Ergebnisse der statistischen Auswertungen für die hydrogeologische Bezugseinheit „Sandsteinfohlen des Buntsandstein“.

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	1617	2,3	5,8	16	1,9	5,5	16	633	1,8	4,5	9,3
K	mg/l	1574	1,2	2,2	4,0	1,3	2,1	3,6	623	1,2	1,9	3,0
Mg	mg/l	1629	2,0	8,4	27	1,9	6,5	22	637	1,7	5,4	18
Ca	mg/l	1625	7,5	27	93	5,0	11,3	26	637	6,3	17	49
Fe	mg/l	1552	0,003	0,01	0,09	0,002	0,02	0,09	617	0,002	0,01	0,05
Mn	mg/l	1620	0,001	0,004	0,05	0,001	0,004	0,07	634	0,000	0,003	0,02
HCO ₃	mg/l	1604	9,4	91	287	6,4	25	95	631	10,1	62	211
SO ₄	mg/l	1622	4,9	19	65	5,3	18	58	636	3,4	12,4	40
Cl	mg/l	1632	4,0	9,9	32	4,0	8,3	17,4	634	3,1	6,9	13,0
NH ₄	mg/l	1477	0,002	0,007	0,03	0,001	0,004	0,01	566	0,002	0,007	0,02
NO ₂	mg/l	1909	0,001	0,001	0,01	0,002	0,004	0,009	914	0,001	0,001	0,01
NO ₃	mg/l	1644	1,9	8,43	31	2,2	7,5	26	639	1,6	5,1	8,9
PO ₄	mg/l	439	0,03	0,09	0,33							
DOC	mg/l	453	0,28	0,69	3,2							
LF	µS/cm	1491	83	233	670	78	237	692	595	71	166	405
O ₂	mg/l	1599	4,2	8,0	10,5	4,9	8,1	10,8	629	5,2	8,2	10,4
H	µg/l	1630	0,03	0,18	2,1	0,03	0,07	0,19	641	0,03	0,27	2,1
pH	-		5,7	6,7	7,5	6,7	7,1	7,6		5,7	6,6	7,5
F	mg/l	910	0,007	0,08	0,20	0,03	0,07	0,2	431	0,001	0,06	0,16
Br	mg/l	196	0,001	0,01	0,08							
J	mg/l	116	0,001	0,002	0,01							
Ag	µg/l	378	0,001	0,06	0,067							
Al	µg/l	1376	1,5	10,0	60	2,2	9,3	39,0	560	1,5	9,0	40
As	µg/l	669	0,31	1,3	5,1	0,3	1,0	3,1	222	0,25	0,78	3,0
B	µg/l	522	5,0	13,3	50	6,2	11,8	22	168	4,0	11	20
Ba	µg/l	542	29	100	380	26	95	350	276	31	100	428
Bi	µg/l	195	0,001	0,001	0,07							
Cd	µg/l	1013	0,024	0,03	0,25	0,007	0,05	0,41	436	0,0013	0,030	0,20
Co	µg/l	335	0,001	0,15	0,67							
Cr	µg/l	1000	0,001	0,33	1,51	0,14	0,53	2,0	435	0,0007	0,30	1,0
Cu	µg/l	520	0,66	1,3	6,13	0,32	0,91	2,6	160	0,66	0,67	4,2
Hg	µg/l	784	0,005	0,02	0,1	0,03	0,05	0,08	358	0,0047	0,020	0,16
Li	µg/l	363	0,67	6,0	21,6							
Ni	µg/l	1038	0,06	0,66	5,087	0,05	0,48	4,4	447	0,06	0,66	4,4
Pb	µg/l	1019	0,06	0,09	1,99	0,002	0,04	0,75	440	0,003	0,067	1,9
Sb	µg/l	305	0,001	0,05	0,4							
Se	µg/l	414	0,013	0,38	3,38	0,29	0,50	0,87	208	0,0133	0,29	5,2
Si	mg/l	670	2,5	4,23	7,42							
Sn	µg/l	210	0,01	0,03	1,06							
Sr	µg/l	390	20,0	63	544							
Zn	µg/l	684	0,67	9,99	50	3,9	8,1	17	284	0,67	6,8	37

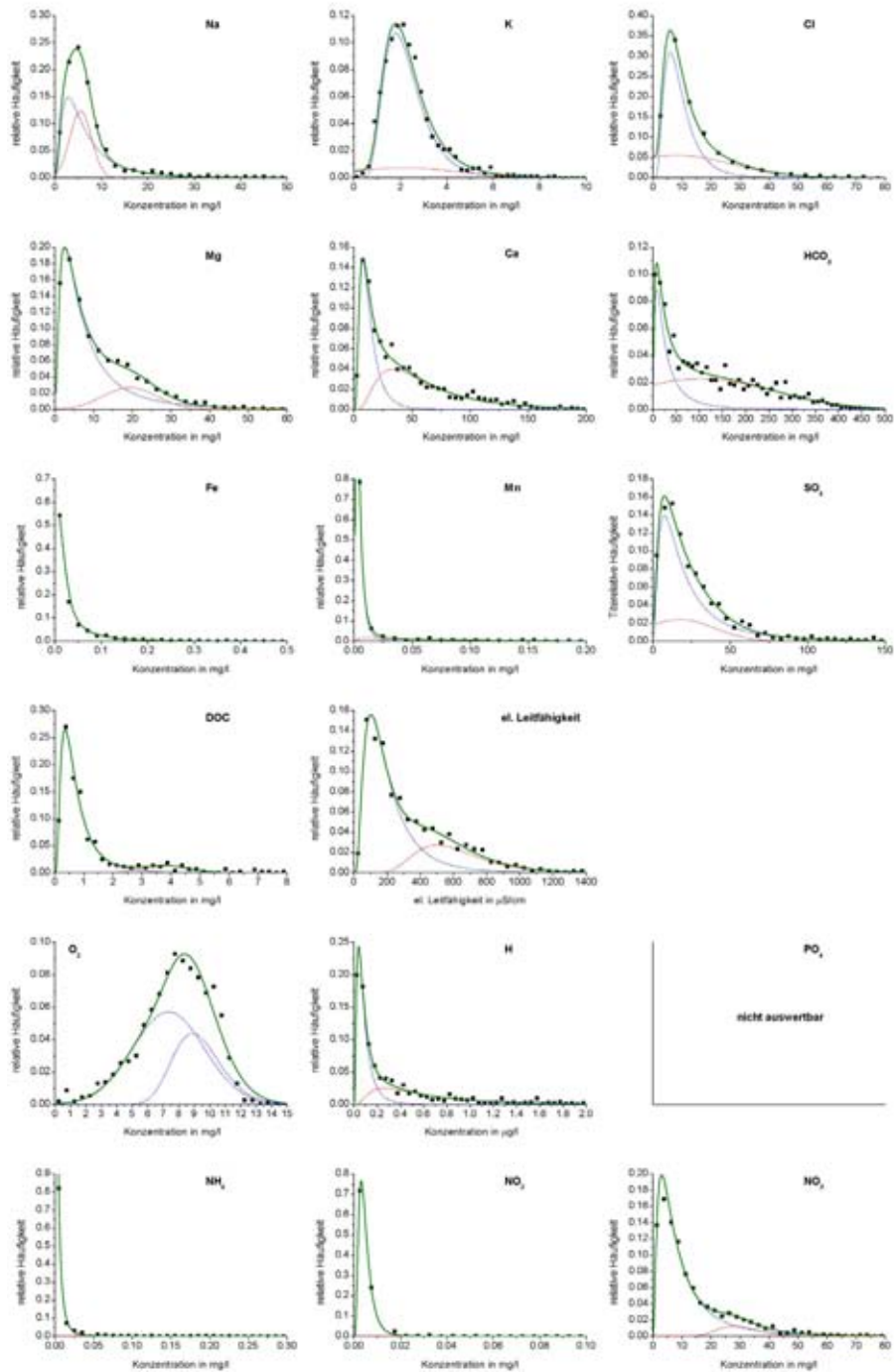


Abb. 47: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Sandsteinfohlen des Buntsandstein“.

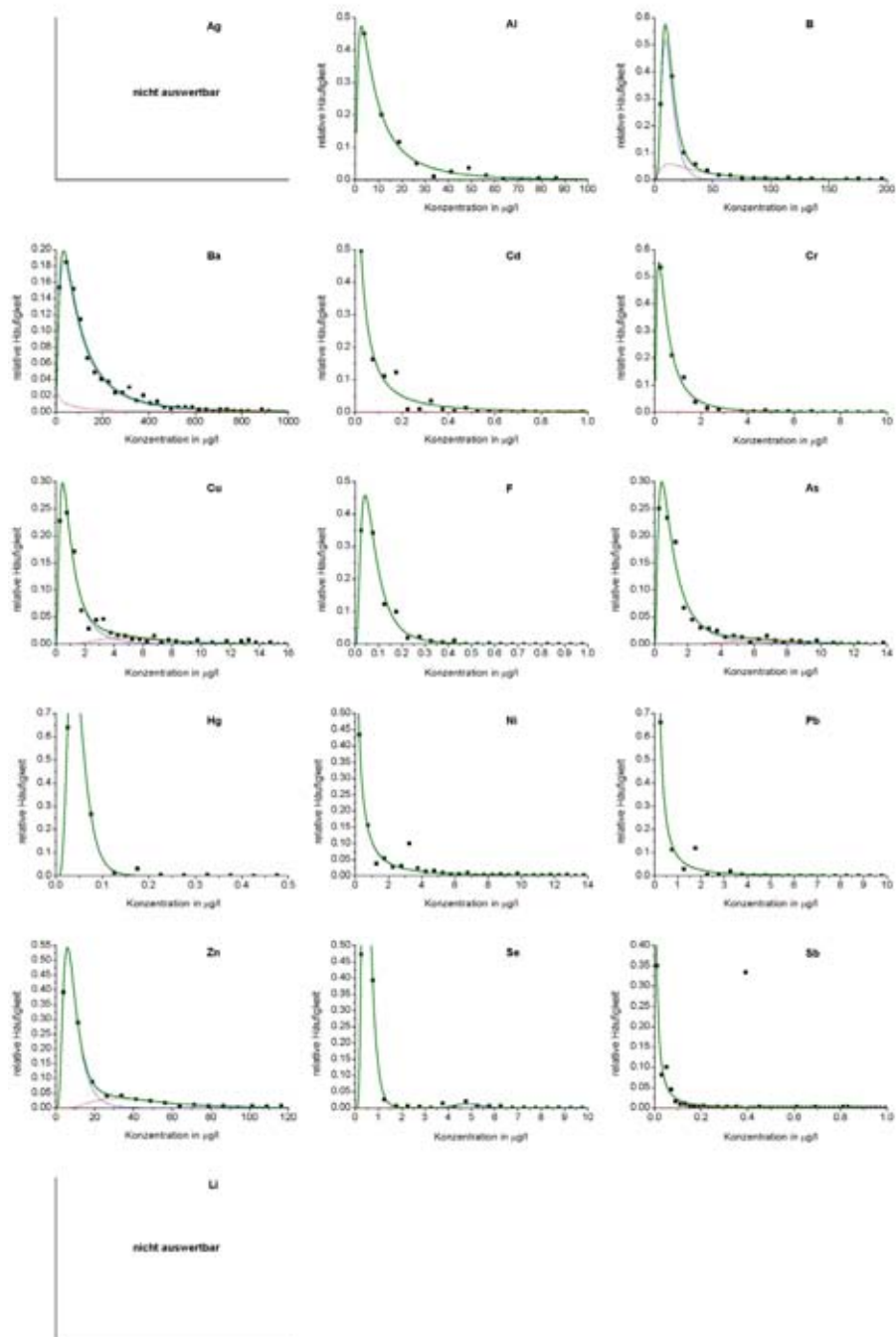


Abb. 48: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Sandsteinsolgen des Buntsandstein“.

6.6.3 *Paläozoische Sedimentgesteine*

Die hier ausgewerteten Grundwassermessstellen stammen vorwiegend aus Gesteins-einheiten des Devons und Unterkarbons, bei denen es sich überwiegend um stark verfaltete und teilweise auch verschieferte Sedimentgesteine handelt. Karte 17 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 1251 Grundwassermessstellen ausgewertet. In Abb. 49 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die unterschiedlichen Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 17 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn aus der Mehrzahl der zu dieser Einheit beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 50 und Abb. 51 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

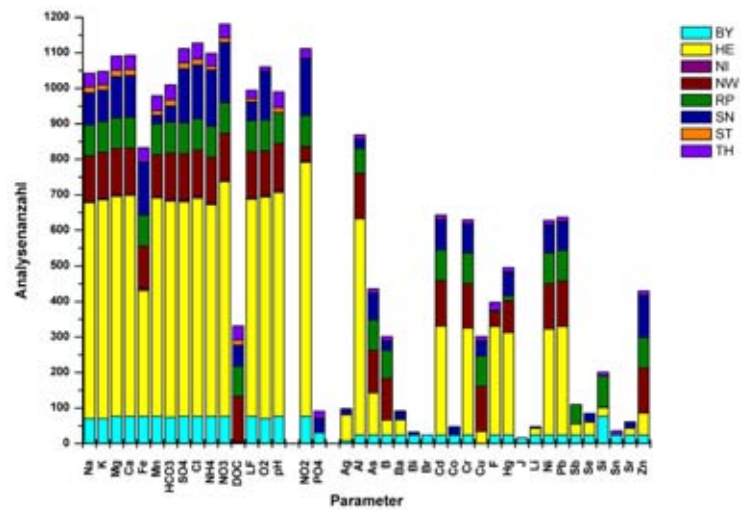
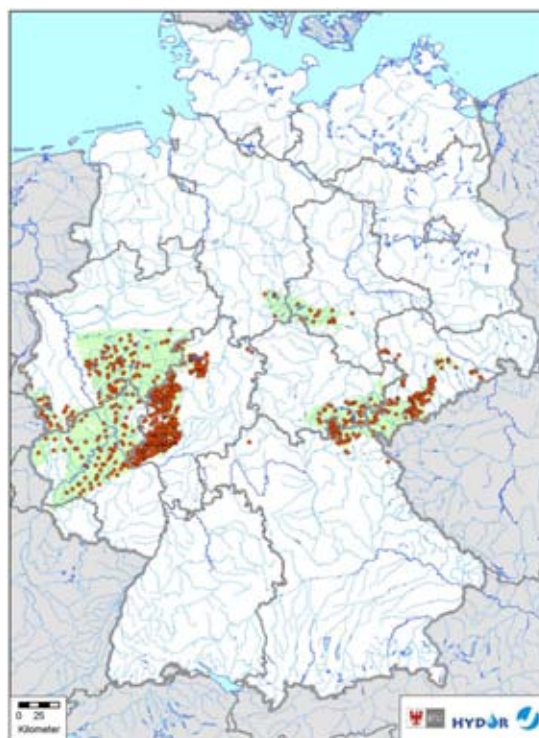


Abb. 49: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „paläozoische Sedimentgesteine“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 17: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „paläozoische Sedimentgesteine“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 17: Ergebnisse der statistischen Auswertungen für die hydrogeologische Bezugseinheit „paläozoische Sedimentgesteine“.

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	1043	3,2	8,1	20	2,9	6,9	17	507	2,8	6,8	14
K	mg/l	1048	0,57	1,1	3,1	0,49	0,95	1,8	505	0,50	0,90	1,6
Mg	mg/l	1091	3,1	9,7	26	2,5	7,0	20	519	2,6	9,0	21
Ca	mg/l	1093	7,9	33	83	5,4	18	59	520	6,1	29	61
Fe	mg/l	833	0,007	0,04	0,79	0,005	0,03	0,82	357	0,01	0,04	0,50
Mn	mg/l	979	0,001	0,012	0,58	0,002	0,01	0,68	497	0,001	0,01	0,43
HCO ₃	mg/l	1010	15	119	287	9,2	45	224	505	14	112	248
SO ₄	mg/l	1112	6,8	25	66	4,4	18	75	530	4,8	21	43
Cl	mg/l	1128	4,2	11,0	35	3,8	9,5	24	531	3,7	7,7	20
NH ₄	mg/l	1099	0,002	0,01	0,09	0,001	0,005	0,03	512	0,001	0,01	0,04
NO ₂	mg/l	1112	0,001	0,001	0,02	0,001	0,003	0,009	570	0,001	0,001	0,01
NO ₃	mg/l	1181	0,48	6,0	30,8	0,42	2,2	11,3	558	0,4	3,4	8,0
PO ₄	mg/l	91	0,001	0,01	0,13	0,004	0,02	0,07	29	0,0005	0,01	0,1
DOC	mg/l	331	0,50	0,80	2,8	0,39	0,64	1,1	94	0,415	0,66	1,5
LF	µS/cm	995	99	300	594	72	169	395	493	80	257	473
O ₂	mg/l	1060	1,3	7,4	11,0				498	1,3	6,5	10,7
H	µg/l	990	0,03	0,11	1,1	0,02	0,07	0,21	516	0,03	0,11	1,16
pH	-		5,9	7,0	7,5	6,7	7,2	7,6		5,9	7,0	7,5
F	mg/l	398	0,01	0,10	0,23							
Br	mg/l	24	0,001	0,01	0,03							
J	mg/l	16	0,001	0,001	0,002							
Ag	µg/l	98	0,03	0,06	0,33							
Al	µg/l	869	1,8	12,5	236	1,6	8,2	42	440	1,4	10,0	51
As	µg/l	436	0,25	0,66	2,0	0,5	0,9	1,6	154	0,18	0,66	1,3
B	µg/l	302	4,6	13,3	60	5,6	9,5	16	92	4,6	10,0	20,0
Ba	µg/l	92	0,01	24	96							
Bi	µg/l	32	0,002	0,02	0,07							
Cd	µg/l	643	0,03	0,03	0,33	0,01	0,04	0,14	280	0,03	0,03	0,33
Co	µg/l	48	0,001	0,62	16							
Cr	µg/l	630	0,001	0,21	3,3	0,002	0,01	0,03	279	0,0007	0,0007	3,3
Cu	µg/l	302	1,3	3,3	14,3	1,17	3,6	11,1	75	0,67	3,3	13,3
Hg	µg/l	496	0,02	0,027	0,13	0,01	0,04	0,09	245	0,02	0,02	0,06
Li	µg/l	48	0,89	5,4	54							
Ni	µg/l	628	0,06	3,0	18	0,77	1,9	5,0	274	0,06	0,07	6,8
Pb	µg/l	637	0,06	0,167	3,3	0,07	0,33	1,5	279	0,06	0,067	3,3
Sb	µg/l	110	0,06	1,3	1,3							
Se	µg/l	85	0,01	0,26	0,33							
Si	mg/l	201	2,7	4,7	8,7							
Sn	µg/l	36	0,01	0,01	3,3							
Sr	µg/l	61	38	113	900							
Zn	µg/l	430	0,0001	13	70	0,97	6,7	47	117	0,0001	13	105

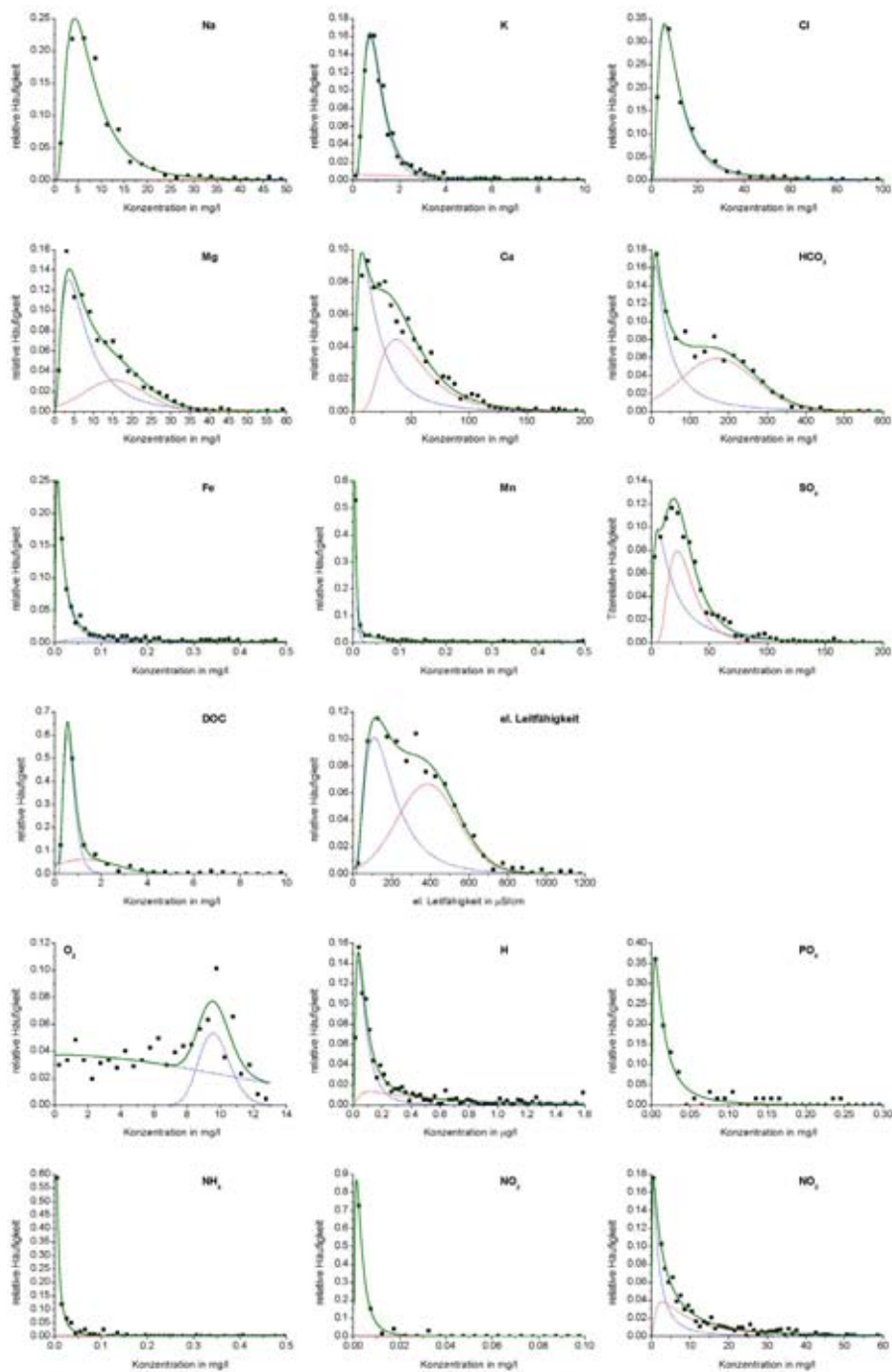


Abb. 50: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „paläozoische Sedimentgesteine“.

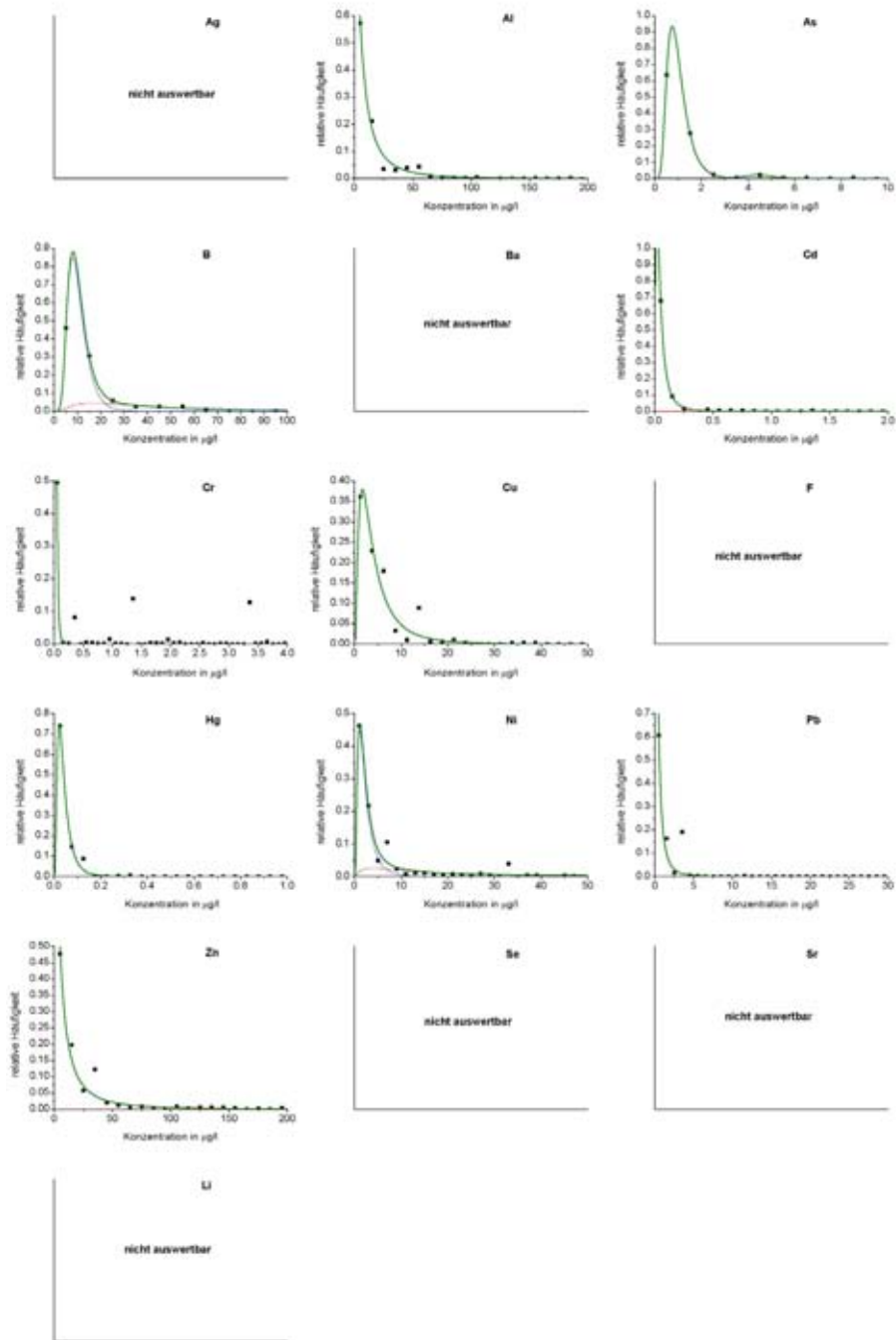


Abb. 51: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „paläozoische Sedimentgesteine“.

6.6.4 Vulkanite

Die in dieser Einheit zusammengefassten Grundwassermessstellen entstammen überwiegend tertiären Basaltoiden, hauptsächlich aus der Region des wasserwirtschaftlichen bedeutsamen Vogelsberges sowie des Westerwaldes in Hessen und Rheinland-Pfalz. Karte 18 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 660 Grundwassermessstellen ausgewertet. In Abb. 52 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die unterschiedlichen Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 18 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn aus der Mehrzahl der zu dieser Einheit beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 53 und Abb. 54 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

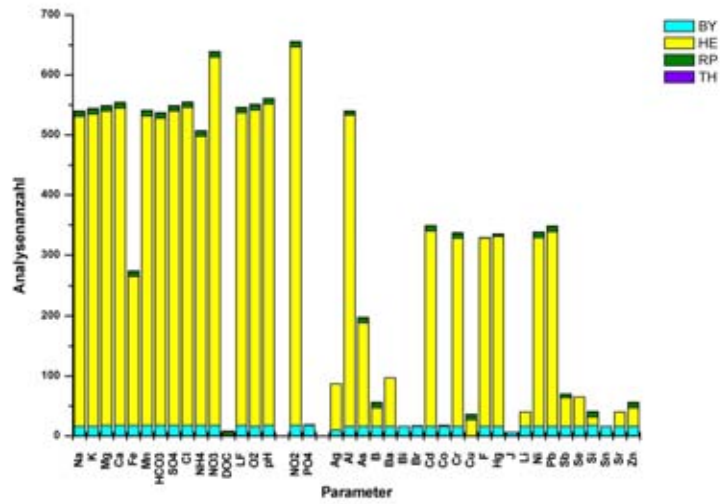


Abb. 52: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „Vulkanite“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 18: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „Vulkanite“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 18: Ergebnisse der statistischen Auswertungen für die hydrogeologische Bezugseinheit „Vulkanite“.

Parameter	Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
	N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na mg/l	540	4,0	6,4	11,3	4,2	6,3	9,3	220	3,6	5,9	8,6
K mg/l	544	0,60	1,1	2,4	0,57	0,91	1,4	221	0,60	0,91	1,7
Mg mg/l	549	6,8	14	27	6,9	12	22	223	6,6	11	19
Ca mg/l	554	14	30	78	13	27	54	226	11	22	61
Fe mg/l	275	0,003	0,011	0,05	0,01	0,01	0,03	106	0,003	0,01	0,02
Mn mg/l	541	0,0003	0,005	0,025	0,004	0,009	0,02	220	0,0005	0,004	0,03
HCO ₃ mg/l	537	55	132	289	63	138	303	218	45	116	227
SO ₄ mg/l	549	3,9	20	49	2,5	8,0	26	226	2,8	13,1	37
Cl mg/l	555	4,0	9,0	24	3,5	8,7	22	226	3,0	6,0	13
NH ₄ mg/l	507	0,002	0,01	0,02	0,002	0,006	0,02	206	0,001	0,008	0,02
NO ₂ mg/l	656	0,001	0,001	0,001	0,0001	0,0002	0,0004	287	0,001	0,001	0,001
NO ₃ mg/l	639	3,2	8,9	23	4,7	7,8	13	272	2,7	6,4	9,1
PO ₄ mg/l	19	0,001	0,03	0,25							
DOC mg/l	8	0,47	0,65	0,83							
LF µS/cm	546	159	290	576	155	273	482	222	137	229	441
O ₂ mg/l	551	4,8	8,3	10,5	4,8	8,3	10,4	224	5,7	8,5	10,2
H µg/l	561	0,02	0,06	0,19	0,02	0,06	0,14	228	0,01	0,05	0,20
pH -		6,7	7,2	7,7	6,8	7,3	7,7		6,7	7,3	7,9
F mg/l	329	0,007	0,05	0,20							
Br mg/l	17	0,001	0,01	0,06							
J mg/l	6	0,001	0,001	0,003							
Ag µg/l	87	0,003	0,07	0,07							
Al µg/l	540	2,5	20	26	6,1	8,7	12	221	2,5	20	25
As µg/l	198	0,25	1,0	1,0							
B µg/l	56	0,02	5,0	20	1,2	6,6	36,1	16	2,9	5	22
Ba µg/l	97	0,01	3,0	49							
Bi µg/l	16	0,001	0,004	0,04							
Cd µg/l	349	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	138	0,03	0,03	0,03
Co µg/l	18	0,001	0,02	0,43							
Cr µg/l	337	0,001	0,001	2,0	0,01	0,01	0,02	129	0,001	0,001	3,0
Cu µg/l	36	0,67	0,67	1,3							
Hg µg/l	335	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	133	0,02	0,02	0,03
Li µg/l	40	0,66	0,66	6,13							
Ni µg/l	338	0,06	0,06	0,07	0,05	0,08	0,13	129	0,06	0,06	0,07
Pb µg/l	348	0,06	0,06	0,07	0,04	0,05	0,07	138	0,06	0,06	0,07
Sb µg/l	70	0,05	0,4	0,76							
Se µg/l	65	0,011	0,013	0,28							
Si mg/l	41	4,66	13,2	18,5							
Sn µg/l	16	0,01	0,01	0,05							
Sr µg/l	40	78	154	261							
Zn µg/l	56	0,67	1,5	20							

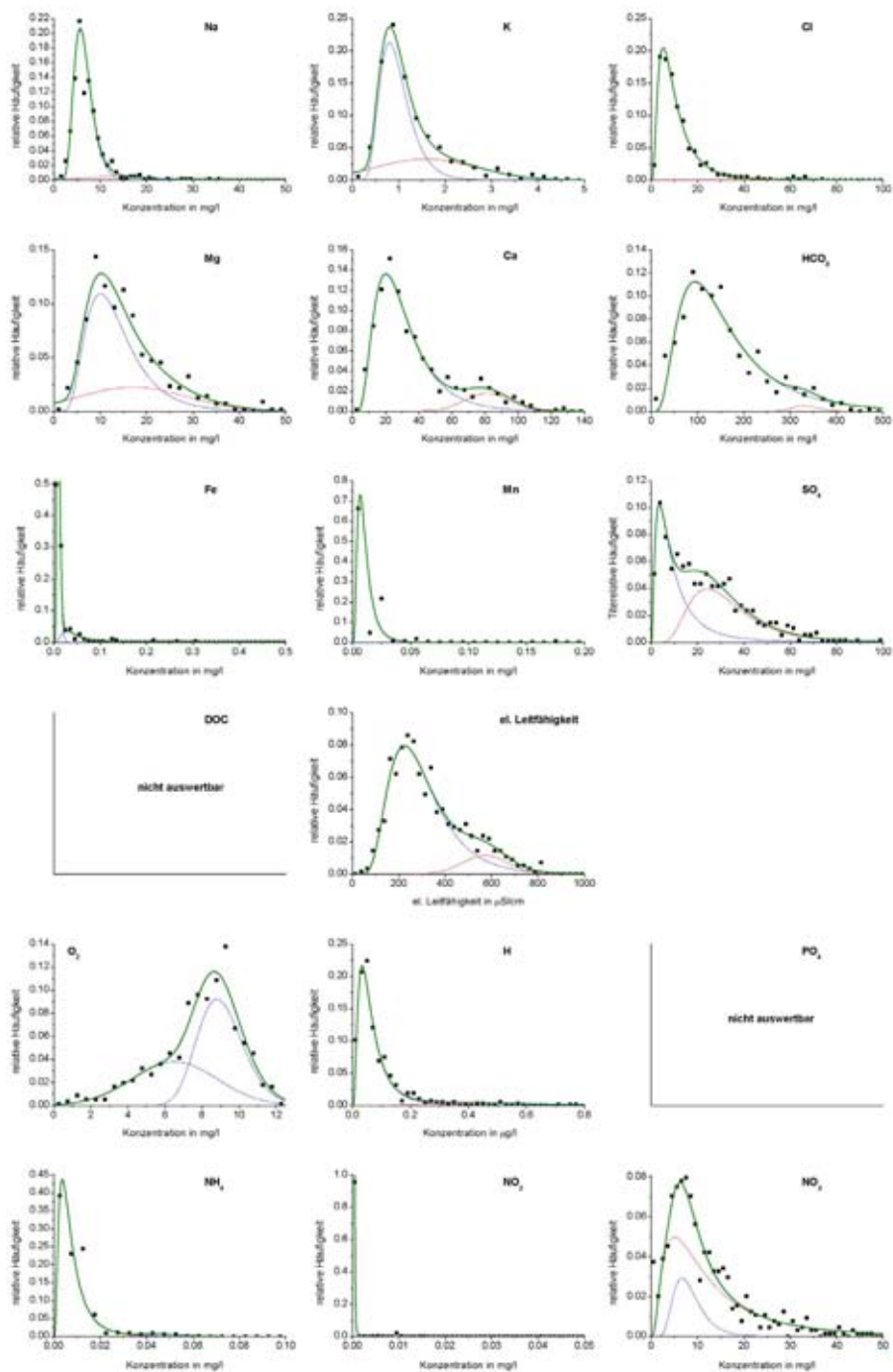


Abb. 53: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Vulkanite“.

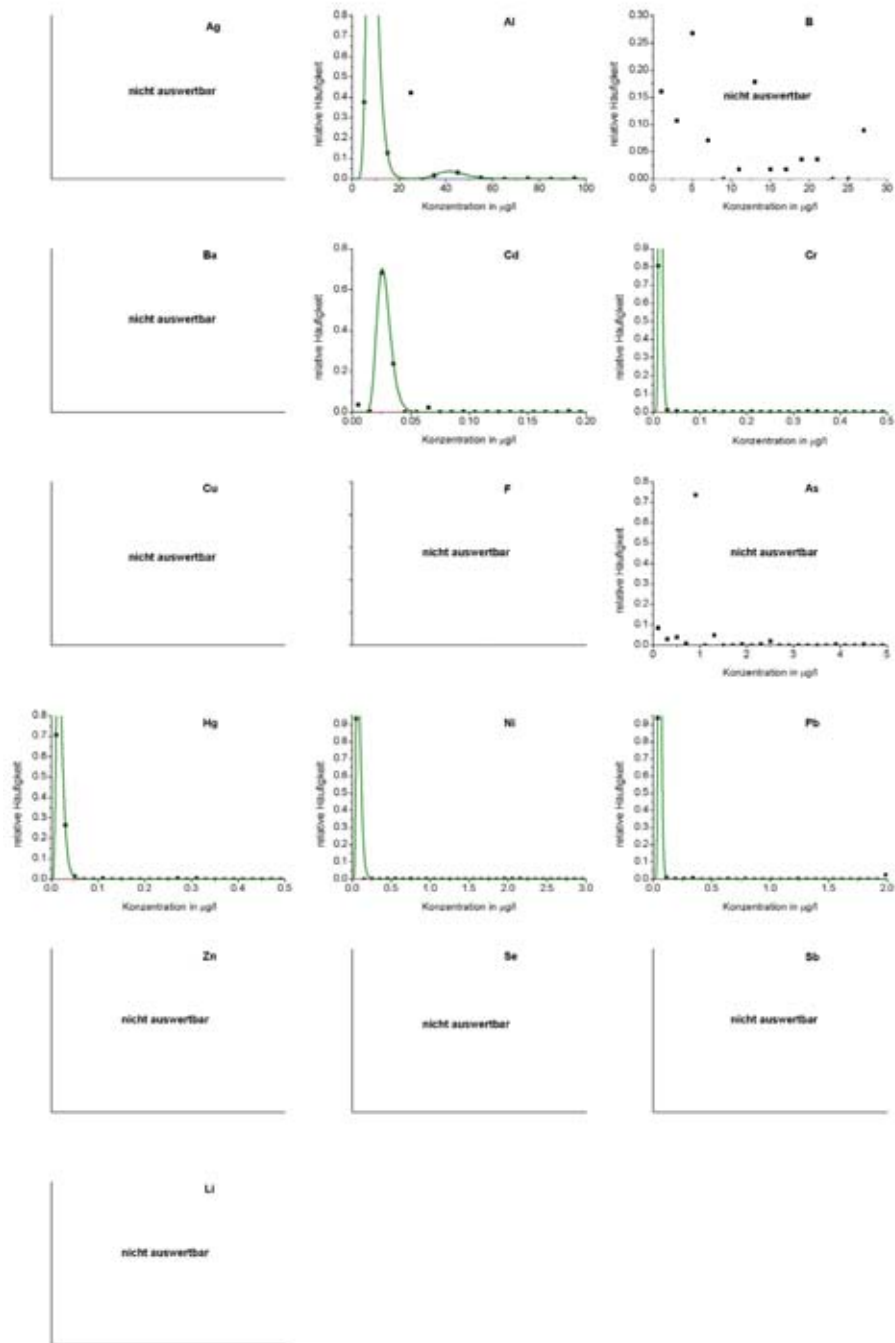


Abb. 54: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „Vulkanite“.

6.6.5 Saure Magmatite und Metamorphite

In dieser hydrogeologischen Bezugseinheit wurden alle Grundwasseranalysen zusammengefasst, die aus Plutoniten (z.B. Granite) und Metamorphiten (z.B. Gneise) stammen. Es handelt sich überwiegend um paläozoische Gesteine aus Bayern (Bayerischer Wald), Sachsen (Erzgebirge und Lausitzer Granodioritkomplex) und Baden-Württemberg (Schwarzwald). Karte 19 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Grundwasserleiter in dieser hydrogeologischen Bezugseinheit und über die ausgewerteten Grundwassermessstellen. Insgesamt wurden für diese Bezugseinheit Daten von 1083 Grundwassermessstellen ausgewertet. In Abb. 55 ist dies differenziert nach den einzelnen Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt. Die unterschiedlichen Balkenfarben beziehen sich auf die Anzahl der aus den einzelnen Bundesländern für den jeweiligen Grundwasserinhaltsstoff zur Verfügung stehenden Analysewerte.

In Tabelle 19 sind die Ergebnisse der primärstatistischen Auswertung sowie die für die Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit relevanten Ergebnisse der Komponentenseparation und der rangstatistischen Auswertung aufgeführt. Für jeden Grundwasserparameter ist die Gesamtzahl der Analysen (N) und mit dem 10., 50. (Median) und 90. Perzentil die wesentlichen Verteilungskenngrößen zur primärstatistischen Charakterisierung des Datenkollektivs angegeben. Zur Dokumentation der Ergebnisse, die der Ausweisung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit zugrunde liegen (siehe Kap. 7.3), sind weiterhin die 10., 50. und 90. Perzentile der sich aus dem rangstatistischen Auswerteverfahren ergebenden Verteilungen sowie der mit der Komponentenseparation identifizierten natürlichen Komponente angegeben. Eine über die primärstatistische Beschreibung hinausgehende Analyse eines Grundwasserinhaltsstoffes erfolgte nur dann, wenn aus der Mehrzahl der zu dieser Einheit beitragenden Bundesländer Daten vorlagen.

In Abb. 56 und Abb. 57 sind schließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation für alle betrachteten Grundwasserparameter dieser hydrogeologischen Bezugseinheit dargestellt. Als blaue Linie ist jeweils die natürliche, als rote Linie die beeinflusste Komponente dargestellt. Die in grün gezeichnete Linie ergibt sich als Summe der beiden Einzelkomponenten und entspricht den beobachteten Klassenhäufigkeiten (schwarze Punkte).

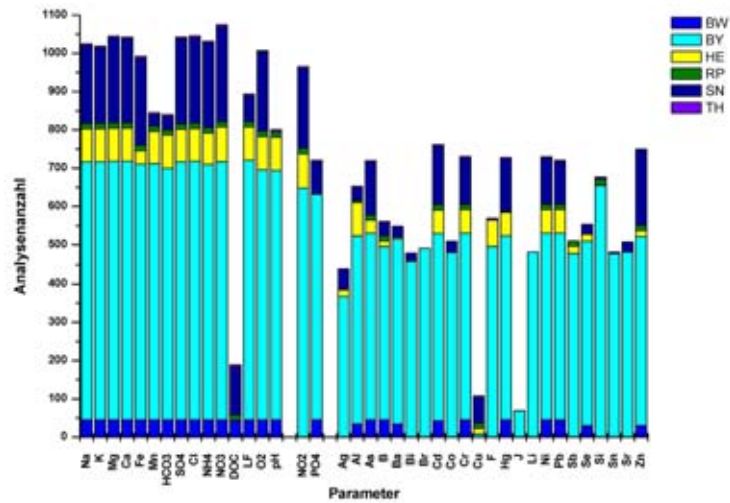


Abb. 55: Anzahl der Grundwassermessstellen in der Einheit „saure Magmatite und Metamorphite“ aufgeschlüsselt nach Grundwasserinhaltsstoffen und Datenherkunft.



Karte 19: Verbreitung der hydrogeologischen Einheit „saure Magmatite und Metamorphite“ und ausgewertete Grundwassermessstellen.

Tabelle 19: Ergebnisse der statistischen Auswertungen für die hydrogeologische Bezugseinheit „saure Magmatite und Metamorphite“.

Parameter		Primärstatistik				Komponentensep.			Rangstatistik			
		N	10. P	50. P	90. P	10. P	50. P	90. P	N	10. P	50. P	90. P
Na	mg/l	1025	1,3	5,8	16,0	1,3	5,2	20,5	367	0,70	3,0	7,3
K	mg/l	1019	0,55	1,4	4,0	0,46	0,8	1,4	367	0,48	0,90	1,8
Mg	mg/l	1045	0,80	3,8	14,9	0,66	2,5	9,2	368	0,6	1,4	4,3
Ca	mg/l	1042	2,0	11,5	60	1,6	9,9	62	367	1,4	3,8	15
Fe	mg/l	992	0,0001	0,01	0,21	0,0004	0,007	0,11	353	0,0001	0,01	0,08
Mn	mg/l	845	0,0001	0,002	0,066	0,002	0,004	0,07	356	0,0001	0,001	0,01
HCO ₃	mg/l	840	5,4	18	141	4,9	16	55	359	4,4	11,6	47
SO ₄	mg/l	1043	1,5	12,3	79	1,7	12,0	83	368	0,01	4,5	22
Cl	mg/l	1046	1,1	6,8	36	0,03	0,60	14,2	368	0,80	2,0	8,7
NH ₄	mg/l	1032	0,001	0,001	0,03	0,001	0,003	0,01	360	0,001	0,001	0,01
NO ₂	mg/l	966	0,001	0,001	0,02	0,001	0,003	0,01	344	0,001	0,001	0,02
NO ₃	mg/l	1075	1,5	9,7	43	1,5	5,1	16,9	369	1,0	4,3	8,2
PO ₄	mg/l	721	0,001	0,02	0,27	0,003	0,012	0,05	307	0,001	0,02	0,19
DOC	mg/l	189	0,31	0,88	2,3	0,32	0,88	2,4	26	0,30	0,40	1,4
LF	µS/cm	894	30	105	497	27	74	206	365	22	58	155
O ₂	mg/l	1007	4,9	8,7	10,8	6,4	9,0	11,0	362	6,8	9,2	10,8
H	µg/l	801	0,11	1,0	4,0	0,03	0,29	3,0	353	0,20	1,13	4,0
pH	-		5,4	6,0	7,0	5,5	6,5	7,6		5,4	5,9	6,7
F	mg/l	569	0,002	0,04	0,20							
Br	mg/l	491	0,001	0,001	0,07							
J	mg/l	69	0,001	0,002	0,01							
Ag	µg/l	439	0,002	0,003	0,06							
Al	µg/l	653	0,002	3,27	53	0,74	3,6	18	255	0,002	2,9	30
As	µg/l	720	0,001	0,39	2,4	0,0	0,3	2,5	247	0,0015	0,13	1,4
B	µg/l	561	0,02	2,6	20	1,1	2,4	5,0	230	0,02	1,4	7,2
Ba	µg/l	548	1,7	11,0	71							
Bi	µg/l	478	0,001	0,002	0,02							
Cd	µg/l	762	0,001	0,03	0,33	0,0002	0,01	0,36	250	0,001	0,02	0,20
Co	µg/l	509	0,001	0,02	0,65							
Cr	µg/l	731	0,01	0,25	1,3	0,03	0,21	1,3	247	0,03	0,15	0,71
Cu	µg/l	108	0,33	1,8	28							
Hg	µg/l	728	0,005	0,02	0,17	0,02	0,04	0,08	251	0,005	0,01	0,10
Li	µg/l	481	0,19	1,8	6,8							
Ni	µg/l	730	0,02	0,64	6,6	0,01	0,21	8,5	248	0,02	0,28	2,3
Pb	µg/l	721	0,003	0,06	1,7	0,01	0,04	0,33	247	0,003	0,02	0,47
Sb	µg/l	510	0,001	0,01	0,22							
Se	µg/l	553	0,14	0,26	1,0							
Si	mg/l	677	2,9	6,5	12,1							
Sn	µg/l	481	0,01	0,01	0,07							
Sr	µg/l	507	15	41	168							
Zn	µg/l	750	0,0001	3,2	24	0,002	0,15	12,4	240	0,56	2,8	11,0

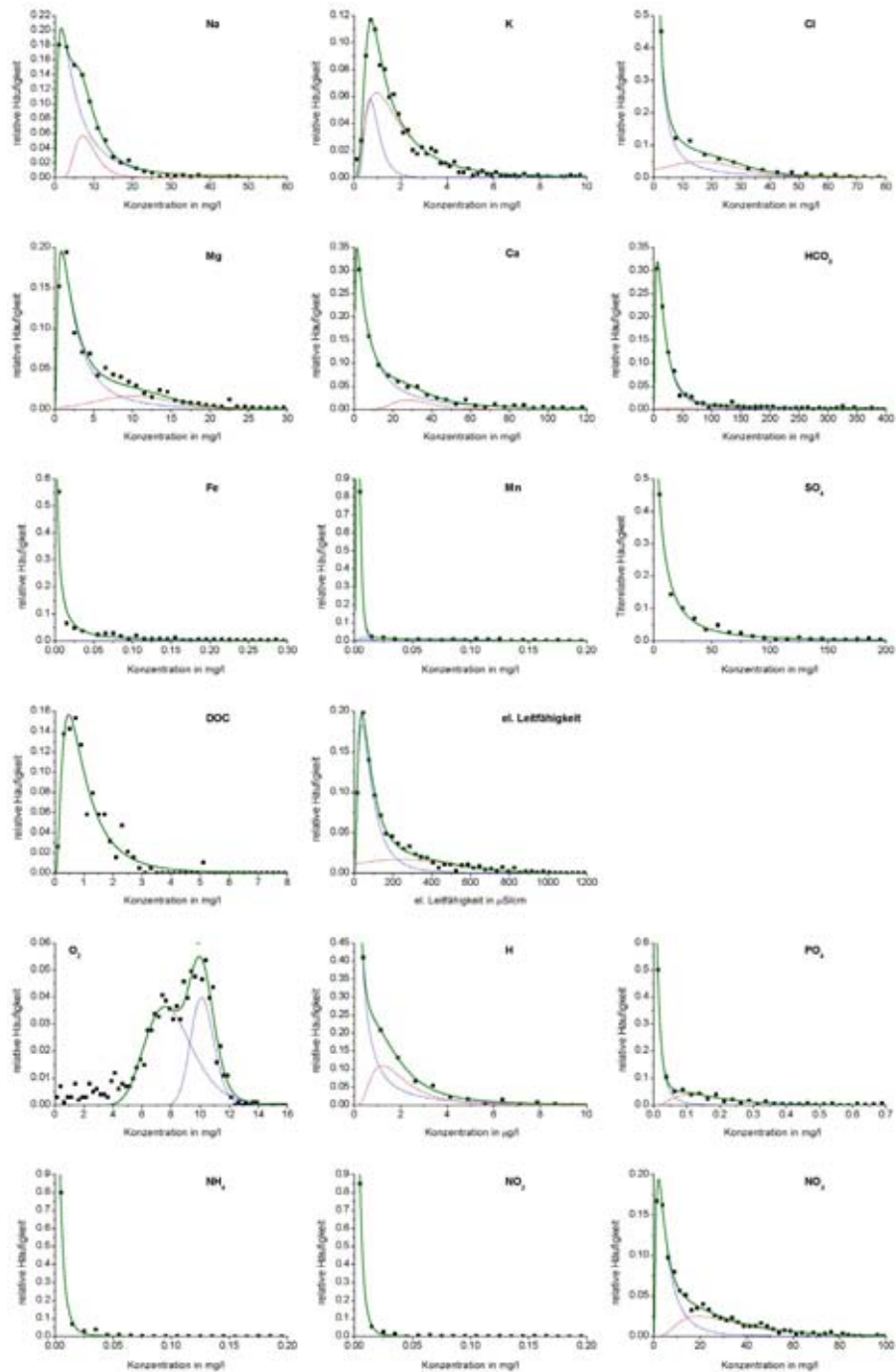


Abb. 56: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „saure Magmatite und Metamorphite“.

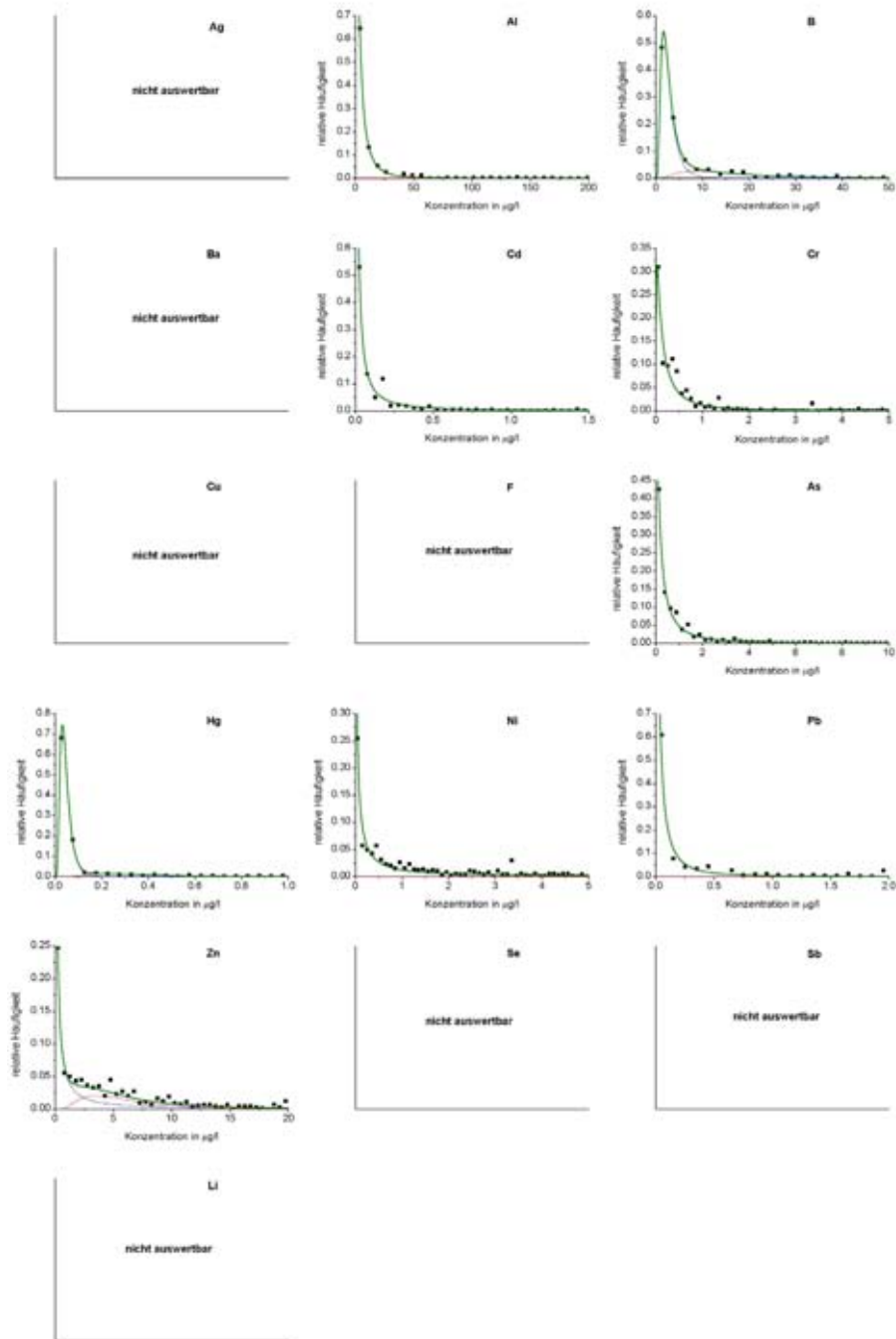


Abb. 57: Häufigkeitsverteilungen und Komponenten der Spurenstoffe und Schwermetalle im Grundwasser der hydrogeologischen Bezugseinheit „saure Magmatite und Metamorphite“.



**Die natürliche,
ubiquitär überprägte
Grundwasser-
beschaffenheit**

7.1 Methodische Vorgehensweise

Die primärstatistische Beschreibung von Grundwasserbeschaffenheitsdaten ist ein unerlässlicher Arbeitsschritt zur Charakterisierung und Gruppierung großer Datenmengen. So ergaben sich beispielsweise aus der primärstatistischen Analyse der Proben aus den Sanden und Kiesen Norddeutschlands Hinweise auf die Notwendigkeit einer Differenzierung nach der Entnahmetiefe. In den Fällen, in denen keine Bandbreiten der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit abgeleitet werden konnten, lieferte die primärstatistische Analyse zumindest einen Überblick über typische Wertebereiche der Grundwasserparameter.

Sowohl mit dem rangstatistischen Auswerteverfahren als auch mit der Komponentenseparation wurden Spannbreiten der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit abgeleitet. Beide Verfahren liefern meist ähnliche, jedoch nicht identische Ergebnisse, da sie auf unterschiedlichen methodischen Ansätzen beruhen. In der Regel lagen die Konzentrationsobergrenzen aus dem rangstatistischen Verfahren unter denen, die sich aus der Komponentenseparation ergaben. Somit bestand die Notwendigkeit zu entscheiden, welches Ergebnis zur Ableitung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit verwendet werden soll. Hierzu sind im Folgenden die wesentlichen Eigenschaften der beiden Verfahren gegenübergestellt und bewertet.

Ausgewerteter Datenbestand

Das rangstatistische Auswerteverfahren basiert auf mehreren hydrochemischen Präselektionsschritten. Hierbei wird jeweils eine komplette Probe verworfen, wenn ein Präselektionskriterium erfüllt ist. Das kann dazu führen, dass der Datensatz sehr stark reduziert wird (bis zu 90%). Die Spannbreiten der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit werden auf Basis dieses reduzierten Datenkollektivs abgeleitet, was sich auf die räumliche und statistische Relevanz der Ergebnisse auswirken kann.

Bei der Komponentenseparation wird der gesamte zur Verfügung stehende Datenbestand ohne weitere hydrochemische Präselektion in die Ermittlung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit einbezogen. Hierbei werden auch beeinflusste Grundwassermessstellen berücksichtigt und deren Einfluss auf die beobachteten Konzentrationsverteilungen quantifiziert. Die Ableitung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit erfolgt isoliert für jeden einzelnen Grundwasserparameter.

Validität der Methode

Bei der rangstatistischen Auswertung werden im ersten Präselektionsschritt alle Proben von der weiteren Auswertung ausgeschlossen, bei denen der Analysewert eines einzelnen Grundwasserparameters oberhalb des 95. Perzentils aller Analysewerte dieses Parameters in der jeweiligen Einheit liegt. Die damit verbundene Annahme, dass 5% aller Analysewerte per se als beeinflusst eingestuft werden können, ist fraglich. Im zweiten Präselektionsschritt erfolgte eine Selektion nach Leitinhaltstoffen (K , NH_4 , NO_3), wobei auf Erfahrungswerten beruhende Konzentrationsobergrenzen als Kriterien für die Beeinflussung der gesamten Probe herangezogen werden. Damit wird unterstellt, dass auch alle anderen Grundwasserparameter einer Beeinflussung unterliegen. Um zu untersuchen, ob dies auch tatsächlich der Fall ist, wurde das 90. Perzentil der Verteilungen der einzelnen Grundwasserparameter nach der Präselektion hinsichtlich des Leitinhaltstoffes Nitrat näher betrachtet. Variiert wurde jeweils die maximale Nitratkonzentration $NO_{3,max}$, die noch als unbeeinflusst angesehen wird. In Abb. 58 ist als Ergebnis die Abhängigkeit des 90. Perzentils als Funktion der maximalen Nitratkonzentration exemplarisch für 15 Grundwasserparameter dargestellt. Das 90. Perzentil wurde zur besseren Vergleichbarkeit auf den Wert ohne Präselektion normiert.

In der oberen Figur ist dies für die hydrogeologische Bezugseinheit „*Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes mit Entnahmetiefen unter 10 m*“ dargestellt. Betrachtet man den Verlauf des normierten 90. Perzentils für NO_3 , so stellt man das erwartete Verhalten fest: mit fallender Präselektionsgrenze $NO_{3,max}$ reduziert sich auch das 90. Perzentil der NO_3 -Konzentrationsverteilung. Ein ähnliches Verhalten zeigen auch die 90. Perzentile für K , el. Leitfähigkeit (LF), H (pH), und O_2 . Während man bei K , LF und H durchaus postulieren könnte, dass mit fallender Präselektionsgrenze auch die Beeinflussung abnimmt, so ist dies bei O_2 nicht ohne weiteres nachzuvollziehen. Hier ist vielmehr anzunehmen, dass die Einschränkung auf geringere Nitratkonzentrationen reduzierte Aquifere mit geringen Sauerstoffgehalten bevorzugt. Damit wäre auch der Anstieg der Fe-Gehalte mit abnehmender NO_3 -Präselektionsgrenze konsistent erklärbar. Dieser, auch bei PO_4 und andeutungsweise bei NH_4 auftretende Anstieg der 90. Perzentile zeigt aber andererseits, dass die Präselektion bei diesen Grundwasserparametern nicht den Grad der Beeinflussung, sondern in erster Linie den Reduktionsgrad des Grundwassers widerspiegelt.

Für die „*Kalksteinfolgen des Muschelkalk*“ als ein Beispiel überwiegend oxidierter Aquifere (untere Figur von Abb. 58) liegt ein anderes Verhalten vor. Hier ist nur für

NO_3 und, anders als bei den Sanden und Kiesen Norddeutschlands, PO_4 eine Abnahme des 90. Perzentils mit fallender NO_3 -Präselektionsgrenze festzustellen. Alle anderen Grundwasserparameter zeigen hingegen einen deutlichen Anstieg der Werte, so dass sich bei sehr kleinen NO_3 -Präselektionsgrenzen 90. Perzentile ergeben können, die bis zu 15 mal höher als der Wert ohne Präselektion sind. Der bei der hydrochemischen Präselektion unterstellte Zusammenhang zwischen Beeinflussung und Nitratgehalt als Leitparameter ist bei dieser Einheit offensichtlich nicht vorhanden. Ob und in welchem Maße die Nitrat-, Kalium- und Ammoniumgehalte im Grundwasser geeignete Leitparameter zur Präselektion der Datensätze darstellen, bleibt damit offen. Die auf Basis dieser Abhängigkeit abgeleiteten Spannbreiten der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit müssten in Frage gestellt werden.

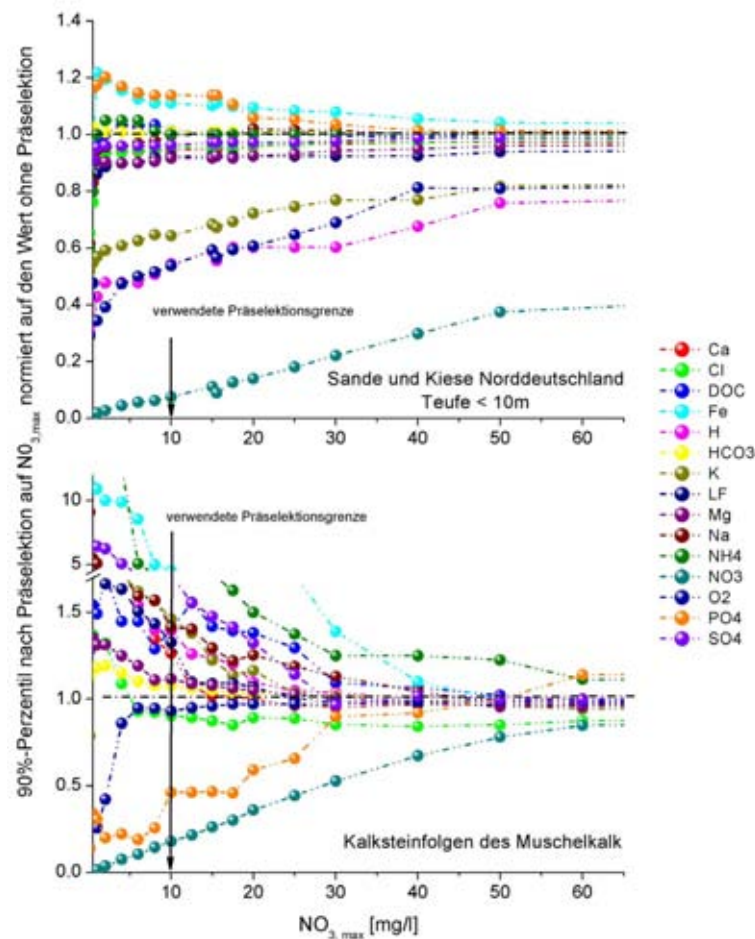


Abb. 58: Einfluss der Präselektionsgrenze nach dem Leitinhaltssstoff Nitrat auf das 90. Perzentil verschiedener Grundwasserinhaltsstoffe für zwei hydrogeologische Bezugseinheiten.

Bei der Komponentenseparation werden keine derartigen Abhängigkeiten vorausgesetzt. Die Konzentrationsverteilung eines Grundwasserparameters wird vielmehr durch statistische Verteilungsfunktionen beschrieben, in denen auch die beeinflussten Grundwassermessstellen berücksichtigt sind. Die Beschreibung stützt sich vornehmlich auf Messwerte, die mit hoher Häufigkeit auftreten, so dass der Einfluss von Ausreißern im Allgemeinen vernachlässigbar ist. Die natürlichen und beeinflussten Komponenten wurden durch Lognormalverteilungen beschrieben. Diese spezielle Wahl der Verteilungsfunktionen wurde auf Basis einer Analyse der auftretenden Konzentrationsverteilungen getroffen, hat aber nur einen untergeordneten Einfluss auf die ausgewiesenen Spannbreiten. Mit Hilfe dieses Ansatzes konnten die Verteilungsmuster der betrachteten Grundwasserparameter in allen hydrogeologischen Bezugseinheiten konsistent abgebildet und die natürlichen Komponenten identifiziert werden. Ein besonderer Vorteil dieser Methode ist insbesondere auch die Möglichkeit die auftretenden Konzentrationsverteilungen im Hinblick auf die Homogenität und den Einfluss von Bestimmungsgrenzen in einem Datensatzes zu analysieren.

Konsistenzüberprüfungen der hydrogeologischen Klassifizierungen

Die Konsistenzüberprüfung der hydrogeologischen Klassifizierung der Grundwassermessstellen hinsichtlich der Homogenität ist mit dem rangstatistischen Auswerteverfahren nicht möglich, so dass faziell bedingte Inhomogenitäten nicht identifiziert werden können. Eine vorgeschaltete primärstatistische Auswertung kann hierzu lediglich erste Anhaltswerte liefern. Es kann weithin nicht ausgeschlossen werden, dass sich die hydrochemische Präselektion nur auf eine bestimmte Region auswirkt.

Die Komponentenseparation bietet durch die einbezogene Analyse der Häufigkeitsverteilungen die Möglichkeit, Inhomogenitäten in den Datensätzen direkt zu identifizieren. Als Beispiel seien die Ca- und Mg-Konzentrationen in den Kalksteinen des Oberen Jura genannt. Diese weisen bimodale Konzentrationsverteilungen auf (siehe Abb. 29), die im unterschiedlichen Dolomitierungsgrad der Gesteine dieser ansonsten als homogen zu betrachtenden Einheit begründet sind. Es können sich andererseits aber auch Hinweise auf die Notwendigkeit der weiteren Untergliederung einer hydrogeologischen Bezugseinheit ergeben, wie das Beispiel der Schotter- und Kiesablagerungen des Rheins zeigt. Aufgrund der Mehrgipfeligkeit bei einer Reihe von Parametern wurde bei der Ableitung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit in den „Niederrhein“ und den „Oberrhein“ differenziert.

7.2 Ubiquitäre Überprägung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit

Mit der Komponentenseparation konnten in den auftretenden Konzentrationsverteilungen in den meisten Fällen zwei klar unterscheidbare Komponenten identifiziert werden. Die den unteren Konzentrationsbereich dominierende Komponente überdeckt meist eine Konzentrationsspanne, die allgemein als „natürlich“ angesehen wird. In einer Reihe von Fällen ergeben sich hingegen deutliche Abweichungen: obwohl eine zweite beeinflusste Komponente bei hohen Konzentrationen identifiziert werden kann, ist die untere Komponente gegenüber dem als „natürlicher Hintergrund“ anzusehenden Konzentrationsbereich deutlich erhöht. Darin zeigt sich deutlich der Einfluss einer ubiquitären Überprägung des Grundwassers, die zu einer nicht weiter aufschlüsselbaren Verschiebung zu höheren Konzentrationen und einer generellen Verbreiterung der auftretenden Konzentrationsprofile führt (vgl. Kap. 4.2).

Die detaillierte Auswertung der Daten ergibt in einigen wenigen Fällen unerwartete Ergebnisse für die „natürliche Grundwasserbeschaffenheit“, auf die im Folgenden nochmals etwas näher einzugehen ist. Für die *„Kalksteinfohlen des Muschelkalk“*, die *„Sandsteinfohlen des Buntsandstein“* und für die *„Schotter- und Moränenablagerungen des Alpenvorlandes“* liegen beispielsweise die mit der Komponentenseparation ermittelten Obergrenzen der „natürlichen“ Nitratkonzentrationen zwischen 40 und 25 mg NO₃/l und damit deutlich über den Werten vieler anderer Einheiten. Allgemein geht man davon aus, dass Nitratgehalte oberhalb von 10 mg/l fast immer ein Anzeichen für anthropogene Stickstoffeinträge sind. Dieser (scheinbare) Widerspruch führt zu der Frage, ob ein Nitratgehalt von 40 bzw. 25 mg NO₃/l noch als „natürlich“ einzustufen ist oder nicht.

Bei der Ableitung der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit hat man sich darauf verständigt, die Begriffsdefinition des ATV-DVWK/DVGW Projektkreis *„Natürliche Grundwasserbeschaffenheit“* zu verwenden (siehe Kapitel 2.1). Hiernach weist ein Grundwasser eine natürliche Beschaffenheit auf, wenn sein Stoffgehalt *„... aus anthropogen nicht wesentlich veränderten Böden und Gesteinen aufgenommen wurde“*. Als solche gelten Böden und Gesteine, *„...welche der normalen, für eine Jahrhunderte alte Kulturlandschaft typischen Überprägung unterliegen“* (SCHENK 2003). Diese Definition unterscheidet sich von dem bisher allgemein gebräuchlichen Verständnis durch die Einbeziehung einer anthropogenen Überprägungskomponente. Diese Definition besagt allerdings auch, dass der betreffende Stoffgehalt aus den nicht „wesentlich veränderten Böden und Gesteinen“ stammen muss.

Die Frage ist also, ob die hohen Nitratgehalte im wesentlichen aus dem natürlichen Stoffinhalt der Böden und Gesteine stammen oder von außen zugeführt wurden. Für Nitrat ist davon auszugehen, dass der Stickstoff eben nicht aus den Böden und Gesteinen selbst stammt, sondern aus anthropogen zugeführten Komponenten. Deswegen sind insbesondere die oben genannten hohen Nitratgehalte in den „*Kalksteinfolgen des Muschelkalk*“, den „*Sandsteinfolgen des Buntsandstein*“ und in der Einheit „*Schotter- und Moränenablagerungen des Alpenvorlandes*“ eindeutig als anthropogene Belastungen zu interpretieren. Als „natürlich“ wären diese Werte nur dann zu interpretieren, wenn sie aus den Böden und Gesteinen selbst stammen und durch Aktivitäten des Menschen lediglich verstärkt mobilisiert worden sind.

Diese Überlegungen gelten natürlich nicht nur für Nitrat, sondern grundsätzlich für alle Stoffe, die natürlicher Bestandteil der Böden und Gesteine sind. So führt beispielsweise die Denitrifikation im Grundwasser zu einer Erhöhung der Konzentration anderer Stoffe im Grundwasser (z.B. Fe (II) und SO_4). In Abhängigkeit vom Ausmaß dieser Erhöhung lässt sich ihr Einfluss allerdings nicht weiter auflösen und äußert sich lediglich in einer Verbreiterung und Verschiebung der „natürlichen“ Konzentrationsverteilung des betreffenden Inhaltsstoffs.

Anthropogene Stoffeinträge sind eng mit der Landnutzung verknüpft. Da neben Nitrat im allgemeinen auch andere Stoffe in das Grundwasser eingetragen werden, ist davon auszugehen, dass auch andere Stoffe (z.B. Cl, K) eine häufig nicht weiter quantifizierbare Beeinflussung zeigen können. Vor diesem Hintergrund wird verständlich, warum sich bei den hier durchgeführten Bewertungen in einigen Fällen (insbesondere bei Hauptkomponenten des Grundwassers) „natürliche“ Spannweiten ergeben, die oberhalb der Konzentrationen liegen, die in der Vergangenheit im Ergebnis zahlreicher Untersuchungen in Deutschland (z.B. anhand der Basismessstellen der Grundmessnetze der Länder) als „natürliche Grundwasserbeschaffenheit“ identifiziert und publiziert worden sind (z.B. LfU 1994, LUA 1996, HLFU 1998, BAYGLA 2003).

Um die hier ausgewiesenen Spannweiten in diese Zusammenhänge einordnen zu können, sei an dieser Stelle ausdrücklich erwähnt, dass die abgeleiteten Konzentrationsspannen unter Umständen nicht dem bisherigen Verständnis der „*natürlichen Grundwasserbeschaffenheit*“ als Basis eines vorsorgenden Grundwasserschutzes in Deutschland entsprechen. Da in die Auswertungen überwiegend aktuelle Messwerte aus den letzten beiden Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts eingeflossen sind, erscheint es sinnvoll, die erarbeiteten Spannweiten als „*natürlich, ubiquitär überprägt*“

zu bezeichnen, um den bei vielen Parametern erkennbaren Unterschied zu den als „natürlicher Hintergrund“ bezeichneten Konzentrationen in den Veröffentlichungen der jüngeren Vergangenheit zu verdeutlichen.

7.3 Bandbreiten der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit

Der Vergleich der beiden Verfahren zur Ableitung von Hintergrundwerten zeigt, dass das Verfahren der Komponentenseparation das sensitivere, auf objektiven wissenschaftlichen Kriterien basierende Verfahren zur Analyse von Grundwasserbeschaffenhkeitsdaten darstellt. Zudem konnten hiermit faziell bedingte Unterschiede innerhalb einer hydrogeologischen Bezugseinheit identifiziert werden. Da bei der Komponentenseparation der gesamte Datenbestand in die Auswertung eingeht, wird in der Regel eine größere Spannbreiten der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit ausgewiesen als durch die Rangstatistik. Es ist davon auszugehen, dass hierdurch die in Deutschland auftretende Gesamtsituation gut repräsentiert wird. Zur abschließenden Ableitung natürlicher Grundwasserkonzentrationen wurden daher ausschließlich die Ergebnisse der Komponentenseparation verwendet. An dieser Stelle sei aber betont, dass auch die Ergebnisse der Rangstatistik in vielen Fällen Werte liefern, die als repräsentativ für die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit angesehen werden können. In den folgenden Tabellen (Tabelle 20 bis Tabelle 22) sind in blau die nach den genannten Kriterien ausgewiesenen Obergrenzen (90. Perzentile der natürlichen Komponenten) der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit zusammengefasst. Für die Parameter Sauerstoff und pH-Wert sind auch die Untergrenzen (10. Perzentile) angegeben, da bei diesen Parametern eine anthropogene Beeinflussung zu einer Erniedrigung der Werte führen kann. In den Fällen, in denen keine Hintergrundwerte ausgewiesen wurden, sind in grün die sich aus der Primärstatistik ergebenden Werte aufgeführt.

Bei der Interpretation der Tabellen ist unbedingt zu beachten, dass die in grün dargestellten Bandbreiten im Allgemeinen nicht mit der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit gleichzusetzen sind, da sie entweder auf der Grundlage statistisch unzureichender Daten, fehlenden Angaben aus einigen Regionen (Ländern) oder der Dominanz von Werten unter der Bestimmungsgrenze beruhen. Außerdem sei ausdrücklich auf Kap. 7.2 verwiesen.

Tabelle 20: Obergrenzen bzw. Unter- und Obergrenzen der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit für die Lockergesteinseinheiten. Bei der Interpretation der Ergebnisse sind die Erläuterungen in Kap. 7.2 zu beachten. Die in grün dargestellten Werte entstammen der primärstatistischen Auswertung und sind im Allgemeinen nicht mit der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit gleichzusetzen.

Parameter		Sande und Kiese Norddeutschland			Schotter und Kiese Rhein		Schotter, Moränen Alpenvorl.	tertiäre Sedimente
		Entnahmetiefe			Niederrhein	Oberrhein		
		0 – 10 m	10 - 25 m	25 - 50 m				
Na	mg/l	38	32	17	35	19	17	14
K	mg/l	4,0	5,1	4,2	7,9	4,7	3,3	2,4
Mg	mg/l	22	27	24	18	33	37	36
Ca	mg/l	153	149	157	169	197	136	127
Fe	mg/l	8,0	4,8	9,3	0,24	3,3	0,12	0,32
Mn	mg/l	1,4	0,73	0,52	0,07	0,65	0,02	0,11
HCO ₃	mg/l	351	332	340	377	438	437	424
SO ₄	mg/l	189	197	73	172	249	45	73
Cl	mg/l	87	76	46	106	99	56	26
NH ₄	mg/l	0,10	0,35	0,44	0,23	0,04	0,01	0,04
NO ₃	mg/l	0,90	0,50	0,62	13	1,2	25	0,54
NO ₂	mg/l	0,06	0,04	0,04	0,07	0,05	0,001	0,01
PO ₄	mg/l	0,10	0,08	0,05		0,18	0,12	0,06
DOC	mg/l	8,8	6,2	4,8	2,5	3,7	1,9	2,5
LF	µS/cm	993	1013	922	1161	1296	906	863
O ₂	mg/l	0,2 - 6,0	0,1 – 7,3	0,1 - 3,3	0,1 - 9,1	0,2 - 8,2	2,3 - 10,6	0,8 - 10,0
H	µg/l	0,20	0,23	0,14	0,44	0,10	0,10	0,10
pH	-	6,8 - 8,2	7,2 – 7,9	6,8 – 7,7	6,4 – 7,2	7,0 – 7,4	7,0 – 7,6	7,0 - 7,7
F	mg/l	0,30	0,24	0,27	0,25	0,18	0,25	0,25
Br	mg/l	0,40	0,37	0,41	0,30	0,01	0,07	0,10
J	mg/l	0,01	0,06	0,06			0,01	0,02
Ag	µg/l	7,0		6,7	3,3	0,07	0,02	0,06
Al	µg/l	283	162	80	73	31	13	21
As	µg/l	4,4	2,7	2,2	1,2	3,6	1,4	2,9
B	µg/l	233	169	163	212	35	34	33
Ba	µg/l	180	180	138		320	115	72
Bi	µg/l	0,10	0,07	0,07			0,02	0,02
Cd	µg/l	0,30	0,54	0,38	0,33	0,15	0,15	0,09
Co	µg/l	10,0	10,0	4,0		0,9	0,23	0,18
Cr	µg/l	2,3	4,2	1,9	6,7	2,4	3,6	3,1
Cu	µg/l	10,0	8,0	9,9	8,4	3,2	7,4	4,1
Hg	µg/l	0,30	0,29	0,56	0,13	0,07	0,01	0,10
Li	µg/l	10,0	10,0	10,0		25	4,5	18
Ni	µg/l	13	16	4,3	8,0	4,2	2,2	3,4
Pb	µg/l	4,3	8,5	5,9	3,3	1,5	0,47	2,0
Sb	µg/l	0,10	0,04	0,03		1,3	0,27	0,39
Se	µg/l	3,0	3,33	3,3	2,7	1,1	1,05	2,6
Si	mg/l	1,0	12	12	7,0	9,7	4,7	9,7
Sn	µg/l			0,003			0,20	0,09
Sr	µg/l	681	805	516	755	950	343	595
Zn	µg/l	196	91	49	32	24	33	56

Tabelle 21: Obergrenzen bzw. Unter- und Obergrenzen der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit für die karbonatischen Festgesteinseinheiten. Bei der Interpretation der Ergebnisse sind die Erläuterungen in Kap. 7.2 zu beachten. Die in grün dargestellten Werte entstammen der primärstatistischen Auswertung und sind im Allgemeinen nicht mit der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit gleichzusetzen.

Parameter	Kalksteine des oberen Jura	Kalksteinfolgen des Muschelkalk	Kalksteine des alpinen Raumes	paläozoische Kalksteine	karbonatische Wechselfolgen
Na mg/l	6,3	9,2	1,3	18	15
K mg/l	1,9	2,1	0,40	4,4	6,1
Mg mg/l	37	50	24	45	65
Ca mg/l	125	160	60	146	167
Fe mg/l	0,15	0,05	0,04	0,60	0,02
Mn mg/l	0,003	0,01	0,001	0,02	0,05
HCO ₃ mg/l	366	440	241	444	481
SO ₄ mg/l	32	186	13	108	169
Cl mg/l	37	49	1,0	39	52
NH ₄ mg/l	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
NO ₃ mg/l	18	40	7,2	19	14
NO ₂ mg/l	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
PO ₄ mg/l	0,14	0,14	0,02	0,32	0,21
DOC mg/l	1,4	1,2		2,3	1,5
LF µS/cm	706	1105	435	833	1307
O ₂ mg/l	4,8 - 10,8	3,0 - 10,2	7,1 - 11,4	2,3 - 9,6	1,7 - 10,2
H µg/l	0,08	0,08	0,04	0,11	0,12
pH	7,7 – 7,7	7,1 – 7,6	7,4 – 8,3	7,0 – 7,6	6,9 - 7,7
F mg/l	0,14	0,32	0,11	0,37	0,43
Br mg/l	0,05	0,07	0,02	0,05	0,08
J mg/l	0,005	0,01	0,002	0,001	0,01
Ag µg/l	0,02	0,40	0,02	0,07	0,20
Al µg/l	5,0	30	7,5	16	27
As µg/l	1,3	1,8	0,55	4,5	1,8
B µg/l	38	24	15	40	64
Ba µg/l	33	154	4,0	96	113
Bi µg/l	0,02	0,28	0,01	0,01	0,02
Cd µg/l	0,23	0,18	0,02	0,23	0,20
Co µg/l	0,32	0,75	0,03	2,8	1,6
Cr µg/l	1,7	1,3	1,0	6,6	3,2
Cu µg/l	1,0	0,89		7,3	19
Hg µg/l	0,06	0,08	0,29	0,33	0,11
Li µg/l	5,1	12	0,85	43	38
Ni µg/l	0,95	6,1	0,65	13	5,7
Pb µg/l	0,70	2,0	0,31	6,8	1,9
Sb µg/l	0,06	0,35	0,33	1,3	0,12
Se µg/l	1,2	2,7	0,54	0,40	1,3
Si mg/l	4,1	6,4	1,8	7,4	7,3
Sn µg/l	0,13	1,8	0,10	3,3	0,22
Sr µg/l	131	1912	64	2565	3266
Zn µg/l	14	14	9,9	65	11

Tabelle 22: Obergrenzen bzw. Unter- und Obergrenzen der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit für die silikatischen Festgesteinseinheiten. Bei der Interpretation der Ergebnisse sind die Erläuterungen in Kap. 7.2 zu beachten. Die in grün dargestellten Werte entstammen der primärstatistischen Auswertung und sind im Allgemeinen nicht mit der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit gleichzusetzen.

Parameter		Sandsteine und silikatische Wechselfolgen	Sandsteinflagen des Buntsandstein	paläozoische Sedimentgesteine	Vulkanite	Magmatite und Metamorphite
Na	mg/l	24	16	17	9,3	21
K	mg/l	7,4	3,6	1,8	1,4	1,4
Mg	mg/l	51	23	20	22	9,2
Ca	mg/l	134	26	59	54	62
Fe	mg/l	0,10	0,09	0,82	0,03	0,11
Mn	mg/l	0,07	0,07	0,68	0,02	0,07
HCO ₃	mg/l	403	95	224	303	55
SO ₄	mg/l	95	58	75	26	83
Cl	mg/l	55	17	24	22	14
NH ₄	mg/l	0,004	0,01	0,03	0,02	0,01
NO ₃	mg/l	8,5	26	12	13	17
NO ₂	mg/l	0,01	0,01	0,01	0,001	0,01
PO ₄	mg/l	0,01	0,33	0,07	0,25	0,05
DOC	mg/l	3,7	3,2	1,1	0,83	2,4
LF	µS/cm	875	692	395	482	206
O ₂	mg/l	7,2 - 10,4	4,9 - 10,8	1,3 - 11,0	4,8 - 10,4	6,4 - 11,0
H	µg/l	0,12	0,19	0,21	0,14	3,0
pH	-	6,9 - 7,7	6,7 - 7,6	6,7 - 7,6	6,8 - 7,7	5,5 - 7,6
F	mg/l	0,36	0,18	0,23	0,20	0,20
Br	mg/l	0,06	0,08	0,03	0,06	0,07
J	mg/l	0,01	0,01	0,002	0,003	0,01
Ag	µg/l	0,07	0,07	0,33	0,07	0,06
Al	µg/l	34	39	43	12	18
As	µg/l	4,9	3,1	1,6	1,0	2,5
B	µg/l	83	22	16	36	5,0
Ba	µg/l	458	350	96	49	71
Bi	µg/l	0,08	0,07	0,07	0,04	0,02
Cd	µg/l	0,22	0,41	0,14	0,04	0,36
Co	µg/l	2,0	0,67	16	0,43	0,65
Cr	µg/l	3,5	2,0	0,03	0,02	1,3
Cu	µg/l	20	2,6	11,1	1,3	28
Hg	µg/l	0,03	0,08	0,09	0,03	0,08
Li	µg/l	65	22	54	6,1	6,8
Ni	µg/l	7,6	4,4	5,0	0,13	8,5
Pb	µg/l	1,5	0,75	1,5	0,07	0,33
Sb	µg/l	1,3	0,40	1,3	0,76	0,22
Se	µg/l	1,3	0,87	0,33	0,28	1,0
Si	mg/l	6,7	7,4	8,7	19	12
Sn	µg/l	0,16	1,1	3,3	0,05	0,07
Sr	µg/l	896	544	900	261	168
Zn	µg/l	30	17	47	20	12

7.4 Diskussion der Ergebnisse

Entsprechend der Zielstellung des Projektes wurden für alle 17 untersuchten hydrogeologischen Bezugseinheiten für die wesentlichen Haupt- und Nebeninhaltsstoffe sowie die Spurenelemente Spannweiten der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserkonzentration abgeleitet. Vergleicht man die in Kap. 7.3 zusammenfassend aufgeführten Werte in den verschiedenen hydrogeologischen Bezugseinheiten miteinander, so stellt man zum Teil beträchtliche Unterschiede fest. Diese belegen die enge Wechselbeziehung zwischen den jeweiligen hydrologischen, petrografischen und pedologischen Verhältnissen und der (natürlichen) Grundwasserbeschaffenheit und zeigen, dass die Festlegung von Hintergrundwerten getrennt nach hydrogeologischen Bezugseinheiten sachlich sinnvoll und notwendig ist.

Die „*Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes*“ wurden in die Tiefenstufen 0-10 m, 10-25 m und 25-50 m differenziert. Vergleicht man die Ergebnisse für die drei Tiefenstufen miteinander, so stellt man zunächst ein sehr ähnliches Muster der Grundwasserkonzentrationen fest. In Anbetracht der Tatsache, dass es sich hierbei um lithologisch identische Einheiten handelt, entspricht dies auch durchaus den Erwartungen. Bei den meisten Grundwasserparametern (Na, K, SO_4 , Fe sowie den meisten Spurenelementen) nimmt der Gesamtlösungsinhalt des Grundwassers mit zunehmender Tiefe ab. Dies erscheint auf den ersten Blick verwunderlich, da man erwarten kann, dass die Mineralisierung des Grundwassers aufgrund der längeren Grundwasserverweilzeit im Aquifer mit der Tiefe zunimmt. Das auftretende Verhalten deutet daher auf den Einfluss anthropogener Stoffeinträge aus dem Sickerwasser im oberflächennahen Grundwasser hin. Für die meisten Haupt- und Nebeninhaltsstoffe konnte insbesondere bei der geringsten Tiefenstufe in zwei Komponenten unterschieden werden (siehe Abb. 8 und Abb. 9). Besonders deutlich ist dies bei den Parametern Na, K, Cl, SO_4 , NH_4 , H (pH), Al und Cr zu erkennen. Trotz der deutlich geringeren Stoffkonzentrationen, die im tieferen Bereich auftreten können (vgl. Tabelle 5), sind die mit der Komponentenseparation für alle Tiefenstufen ermittelten Konzentrationsbereiche der natürlichen Komponenten sehr ähnlich. Dies ist indirekt eine gute Bestätigung für die Validität des hier eingesetzten Verfahrens zur Komponentenseparation. Bei einigen Spurenstoffen (z.B. Cu, Ni, Hg oder Pb) tritt ein relativ hoher Anteil an Analysen unterhalb der Bestimmungsgrenze auf, wodurch die Aussagekraft der Daten eingeschränkt wird. In allen Fällen wurde die Verteilung als natürliche Komponente interpretiert. In größeren Tiefen ist bei keinem Spurenstoff eine beeinflusste Komponente auszuweisen (vgl. Abb. 15). Das kann als ein Hinweis dar-

auf interpretiert werden, dass in tieferen Aquiferschichten keine signifikante Beeinflussung mehr vorliegt.

Für eine Reihe von Parametern, z.B. Ca, HCO_3 , Fe, Mn oder O_2 treten zwar zweikomponentige Verteilungen auf (vgl. Abb. 8), hiervon kann jedoch keine Komponente als eindeutig beeinflusst bezeichnet werden. Die für Calcium und Hydrogencarbonat auftretenden Verteilungskomponenten sind vermutlich Folge der säuregepufferten Auswaschung dieser Stoffe aus dem Boden und wurden konsequenterweise als natürlich eingestuft. Bei Fe, Mn, und O_2 handelt es sich um Parameter, deren Konzentrationen durch die Redoxbedingungen im Aquifer beeinflusst werden. So zeigen sich für diese Parameter jeweils zwei Komponenten, die den Reduktionsgrad des Grundwassers widerspiegeln. Bei oxidierten Wässern mit hohen Sauerstoffkonzentrationen liegen im Allgemeinen nur geringe Mn- und Fe-Gehalte vor, während bei reduzierten Grundwässern geringe Sauerstoffkonzentrationen und deutlich höhere Fe- und Mn-Gehalte auftreten (Abb. 8, Abb. 11 und Abb. 14). Der Vergleich der Stoffkonzentrationen von O_2 , Fe und Mn zeigt, dass in tieferen Aquiferschichten erwartungsgemäß zunehmend reduzierte Grundwässer auftreten. Dies ist weitgehend unabhängig von anthropogenen Stoffeinträgen in das Grundwasser, so dass die auftretenden Verteilungskomponenten als natürlich eingestuft wurden.

Auch bei den Parametern NH_4 , NO_3 und SO_4 sind die auftretenden Konzentrationsverteilungen an die Redoxbedingungen im Aquifer gekoppelt. Hier sind jedoch zusätzlich die Einflüsse anthropogener Stoffeinträge zu berücksichtigen. Wie schon bei KÖLLE (1989) beschrieben, können sich in reduzierten Aquiferen bei weitgehendem Fehlen gelösten Sauerstoffs Verhältnisse einstellen, bei denen Nitrat mikrobiell als Sauerstofflieferant verbraucht wird. Bei diesem Prozess wird Pyrit umgesetzt und zu Sulfat oxidiert. Hohe Sulfatkonzentrationen im Grundwasser wären damit indirekt als Folge der Denitrifikation erklärbar. Dies wird auch dadurch unterstützt, dass bei zunehmender Entnahmetiefe der Sulfatgehalt in Grundwasser abnimmt. Aus diesen Gründen wurden die bei hohen Konzentrationen dominanten Verteilungskomponenten von NH_4 , NO_3 und SO_4 dem beeinflussten Bereich zugeschrieben.

Die Schotter- und Kiesablagerungen des Rheins wurden trotz der lithogenetischen Ähnlichkeit und eines ungefähr gleichen Gesamtlösungsinhaltes in die zwei Unterheiten „*Schotter und Kiese des Niederrheins*“ sowie „*Schotter und Kiese des Oberrheins*“ differenziert. Bei den ausgewiesenen Konzentrationen der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit unterscheiden sich die beiden Einheiten nämlich in signifikanter Weise. So zeigen die Fe-, Mn-, O_2 , und SO_4 -Konzentrationen

trationen in den Grundwässern des Niederrheins (Abb. 17), dass es sich dort um überwiegend oxidierte Grundwässer handelt. Dies trifft zwar auch auf die Schotter- und Kiesablagerungen des Oberrheins zu, jedoch treten hier vermehrt auch reduzierte Verhältnisse auf (vgl. Abb. 20). Aus diesem Grunde liegen die Fe-, Mn-, und SO_4 -Konzentrationen in den Grundwässern des Oberrheins deutlich über den in den „Schotter- und Kiesablagerungen des Niederrheins“ auftretenden natürlichen Grundwasserkonzentrationen. Beleg hierfür sind auch die signifikant niedrigeren NO_3 - und O_2 -Gehalte im Grundwasser der „Schotter und Kiese des Oberrheins“. Hinsichtlich der Grundwasserparameter K, Na sowie aller Spurenstoffe zeigen die Grundwässer des Niederrheins dagegen höhere Werte. Das deutet auf eine tendenziell höhere Beeinflussung des Grundwassers durch anthropogene Stoffeinträge hin.

Bei der primärstatistischen Analyse der Daten, bei der Grundwassermessstellen aus den Schotterfluren bzw. den Moränenablagerungen des Alpenvorlandes zunächst getrennt voneinander betrachtet wurden, zeigte sich, dass die Verteilung der Parameter in allen Fällen nahezu identisch war. Aus diesem Grunde wurden die beiden Einheiten in der hydrogeologischen Bezugseinheit „Schotter- und Moränenablagerungen des Alpenvorlandes“ zusammengefasst und gemeinsam ausgewertet. Hinsichtlich ihres Lösungsinhaltes ergeben sich sowohl zu den Grundwässern aus den Lockergesteinsablagerungen des Norddeutschen Flachlandes als auch zu denen des Niederrheins deutliche Unterschiede. Die Na-, K-, Mg-, Ca-, HCO_3 -Gehalte und die Spurenstoffkonzentrationen zeigen Ähnlichkeiten zu den Grundwässern aus den Schottern und Kiesen des Oberrheins. Eine Ursache hierfür ist sicherlich die durch das Liefergebiet der Sedimente bedingte petrografische Ähnlichkeit der grundwasserführenden Gesteine. Bei den Schottern und Moränen des Alpenvorlandes handelt es sich jedoch um sauerstoffreichere Grundwässer. Dementsprechend niedrig sind die Fe- und Mn-Gehalte, während die NO_3 -Gehalte hoch sind.

Die karbonatischen Festgesteinseinheiten wurden in die „Kalksteinfohlen des Muschelkalk“, „karbonatische Wechselfolgen“, „Kalksteine des Oberen Jura“, „Kalksteine des alpinen Raumes“ und „paläozoische Kalksteine“ untergliedert. Typisch für alle karbonatischen Festgesteinseinheiten ist der relativ hohe natürliche Lösungsinhalt für die Parameter Ca, Mg, HCO_3 und SO_4 . Bei den anderen Inhaltsstoffen treten jedoch signifikante Unterschiede auf, die sich zum einen im Gesamtlösungsinhalt (Leitfähigkeit), zum anderen aber auch in den Konzentrationsbereichen der Einzelparameter zeigen. So liegt z.B. das 90. Perzentil der Leitfähigkeit der „karbonatischen Wechselfolgen“ für natürliche Grundwässer bei mehr als 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, bei den „Kalksteinen des Oberen Jura“ bei 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dort steht der relativ geringe Lösungsinhalt

im Zusammenhang mit der hohen Durchflussgeschwindigkeit und der entsprechend geringen Verweilzeit des Grundwassers im Grundwasserleiter. Der höhere Lösungsinhalt der „*karbonatischen Wechselfolgen*“ ist hingegen Ausdruck einer höheren Grundwasserverweilzeit und der größeren Anteile an mergeligen, tonigen und gipshaltigen Bildungen.

Bei einer Reihe von Einzelparametern (z.B. Ca, Mg, HCO_3 , SO_4) weisen die Grundwässer aus den „*karbonatischen Wechselfolgen*“ Ähnlichkeiten mit den Grundwässern aus den „*Kalksteinfohlen des Muschelkalk*“ auf. Deutliche Unterschiede ergeben sich jedoch für die Parameter NO_3 , K, Na, B, Ba, und Cu. Tendenziell weisen hier die Grundwässer aus den „*karbonatischen Wechselfolgen*“ höhere Lösungsinhalte auf. Neben dem höheren Anteil an silikatischen Gesteinen ist hierfür die intensivere landwirtschaftliche Bewirtschaftung der Böden bzw. die hieraus resultierende ubiquitäre Belastung des Sickerwassers mit Schadstoffen verantwortlich.

Auch die Grundwässer aus den „*paläozoischen Kalksteinen*“ weisen die für Karbonatgesteine typischen hohen Lösungsinhalte für Ca, Mg, HCO_3 und SO_4 auf. Im Vergleich zu den anderen Karbonatgesteinseinheiten sind jedoch auch die Grundwasserkonzentrationen für Fe, As, Cr, Cd und Ni erhöht. Vermutlich sind diese geogen bedingt, z.B. durch Freisetzung von sekundär angereicherten Metallen.

Verglichen mit den anderen Karbonatgesteinen nehmen die „*Kalksteine des alpinen Raumes*“ eine gewisse Sonderstellung ein. So liegt der Gesamtlösungsinhalt natürlicher Grundwässer mit weniger als 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ deutlich unterhalb der für die anderen Karbonatgesteine typischen Werte. Ausschlaggebend hierfür sind die hydrodynamischen Verhältnisse. Hohe Gebietsabflüsse und ein hoher hydraulischer Gradient führen zu einer geringen Verweilzeit des Grundwassers im Aquifer und damit zu einem entsprechend geringen Lösungsinhalt.

Die Gesteinseinheit „*Sandsteine und silikatische Wechselfolgen*“ ist stratigrafisch, petrografisch und räumlich mit den „*karbonatischen Wechselfolgen*“ verzahnt. Trotz der faziellen Bezüge spiegelt sich dies allerdings nur tendenziell in der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit wider, so dass die beiden hydrogeologischen Bezugseinheiten getrennt voneinander ausgewiesen wurden. Bei den „*Sandsteinen und silikatischen Wechselfolgen*“ treten z.B. höhere natürliche K- und Na-Gehalte sowie durchwegs natürliche höhere Spurenstoffgehalte auf, während bei den „*karbonatischen Wechselfolgen*“, höhere Ca-, Mg- und HCO_3 -Gehalte auftreten.

Der natürliche Stoffgehalt von Grundwässern aus den silikatischen Festgesteinseinheiten „Sandsteinfohlen des Buntsandstein“, „paläozoische Sedimentgesteine“, „Vulkanite“ und „saure Magmatite und Metamorphite“ unterscheidet sich grundlegend von dem der Grundwässer aus den karbonatischen Festgesteinseinheiten. Vor allem die Grundwässer aus den „paläozoischen Sedimentgesteinen“ und den „sauren Magmatiten und Metamorphiten“ weisen geringe Lösungsinhalte auf, was auch die Leitfähigkeiten von weniger als 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dokumentieren. Insbesondere die für Karbonatgesteine typischen Inhaltsstoffe Ca, Mg, HCO_3 sowie Cl liegen in signifikant geringeren Konzentrationen vor. Dagegen sind selbst die als natürlich ausgewiesenen Al- und H-Gehalte deutlich höher als die entsprechenden Werte in den karbonatischen Festgesteinseinheiten. Dies kann als ein Anzeichen für eine ubiquitäre Belastung des Grundwassers durch atmosphärische Einträge (Säurebildner) angesehen werden. Durch die überwiegend silikatische Gesteinsausprägung und aufgrund der häufig nur geringmächtig ausgebildeten Böden sind die Wässer zumeist sehr ionenarm und versauerungsgefährdet. Für die „paläozoischen Sedimentgesteine“ wurden mit 0,7 mg Fe/l bzw. 0,8 mg Mn/l Obergrenzen der natürlichen Grundwasserkonzentrationen ausgewiesen, die deutlich über den für die anderen Festgesteinseinheiten ausgewiesenen Werten liegen. Dies ist durch den hohen Pyritgehalt der devonischen Schiefergesteine erklärbar.

7.5 Grenzen der Anwendbarkeit

Basierend auf einer großen Anzahl von Grundwasseranalysen aus den Messnetzen der Bundesländer wurde in diesem Projekt erstmals eine länderübergreifende Ableitung der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit durchgeführt. Die hier ermittelten Spannbreiten der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit können Wasserbehörden in ihrer täglichen Arbeit unterstützen. Den in der Grundwasserüberwachung des Bundes und der Länder tätigen Institutionen beispielsweise können die Werte helfen zu beurteilen, ob der Lösungsinhalt einer aus einer bestimmten hydrogeologischen Bezugseinheit stammenden Grundwasserprobe vor dem Hintergrund länderübergreifend ermittelter Wertespannen der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit innerhalb eines als natürlich eingestuften Wertebereichs liegt. Liegen die in der Grundwasserprobe gemessenen Gehalte im Bereich der für die hydrogeologische Bezugseinheit ausgewiesenen Hintergrundwerte, dann besteht kein

Handlungsbedarf. Aber auch in dem Fall, bei dem einzelne oder mehrere Parameter oberhalb dieses Bereichs liegen, bedeutet dies nicht notwendigerweise, dass die betreffende Grundwasserprobe ein nicht natürliches Grundwasser repräsentiert. Zunächst sind diese Proben lediglich als auffällig zu bewerten. In diesem Fall sollte im Rahmen einer Detailuntersuchung überprüft werden, ob es sich tatsächlich um ein anthropogen überprägtes Grundwasser handelt oder ob geogene Anomalien eine Rolle spielen. Vor der Einleitung von Maßnahmen sollte daher die Genese des Grundwassers überprüft und den Ursachen der Abweichung nachgegangen werden. Das folgende Beispiel mag die Notwendigkeit dieser Vorgehensweise verdeutlichen.

In den Sanden und Kiesen des Norddeutschen Lockergesteinsbereichs gibt es im Küstenbereich und im Tideeinfluss großer Flussmündungen Areale, in denen das Grundwasser durch die Intrusion von Salzwasser aus dem Meer bzw. aus den Flüssen durch Salzwasser geprägt ist. Im Bundesland Bremen, speziell in der Region Bremerhaven, treten Natrium- und Chloridkonzentrationen auf, die häufig oberhalb des für die hydrogeologische Bezugseinheit „*Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes*“ ausgewiesenen Wertespannen liegen. Die Ursachen hierfür sind auf natürlichen Prozessen beruhende Beeinflussungen der Grundwasserqualität (JENSEN ET AL., 2003). Die Weser führt in der Region Bremerhaven, bedingt durch den Einfluss der Nordsee, salzreiches Wasser mit einem Salzgehalt von 15-24 g/l. Da der Grundwasserleiter direkt an die Weser angeschlossen ist, findet ein Austausch von Grund- und Weserwasser statt. Hierbei wechselt abhängig von Hoch- und Niedrigwasser der hydraulische Gradient, so dass bei Flut (salzhaltiges) Weserwasser in den Grundwasserleiter infiltriert, bei Ebbe jedoch exfiltriert wird (siehe Abb. 59). Zusätzlich zur Bewegung zur und von der Weser findet ein weserparalleler Transport des Grundwassers im „Urstromtal“ der Weser statt, das ein Gefälle zur offenen Nordsee hat. Dies führt zu einer Abfolge charakteristischer Mischwässer senkrecht zum Flussverlauf. Diese Versalzungsfront kann im gesamten Stadtgebiet gut verfolgt werden. Die in der Wesermarsch auftretenden Natrium- und Chloridkonzentrationen, die häufig oberhalb des oberen Wertes der natürlichen Bandbreite liegen, sind also nicht anthropogen bedingt, sondern natürlichen Ursprungs. Vor der Feststellung einer möglichen anthropogenen Überprägung des Grundwasser muss also unbedingt die hydrogeologische und hydrogeochemische Situation geklärt werden. Nur so kann die fälschliche Ausweisung geogener Anomalien als vermeintlich anthropogen beeinflusst sowie eine hieraus resultierende Einleitung von Maßnahmen zur Erreichung des guten chemischen Zustands des Grundwassers gemäß Grundwasserrichtlinie vermieden werden. Erst in den Fällen, in denen eine signifikante Überschrei-

tung oder Unterschreitung (pH , O_2) der ausgewiesenen Spannweiten der natürlichen Grundwasserkonzentrationen vorliegt, für die es keine natürliche Erklärung (geogene Anomalien) gibt, ist die Aussage zulässig, dass es sich um ein anthropogen beeinflusstes Grundwasser handelt.

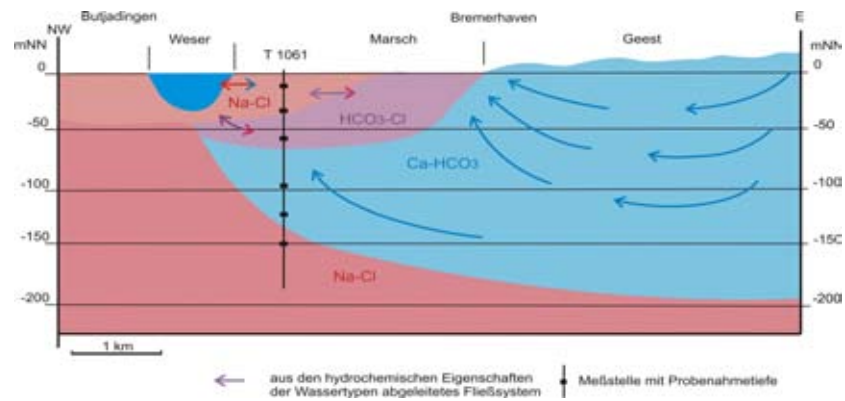


Abb. 59: Schematische Darstellung der Verbreitung der Wassertypen im tieferen Untergrund zwischen Butjadingen und dem Geestrücken bei Schiffdorf/Bramel.

8

Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die Ausweisung der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland auf wissenschaftlich fundierter Grundlage. Um hierbei die unterschiedlichen in Deutschland großräumig auftretenden petrografischen, hydrodynamischen und stratigrafischen Verhältnisse in ihrem Einfluss auf die Grundwasserbeschaffenheit zu berücksichtigen, wurde eine Differenzierung der Grundwasserleiter in hydrogeologische Bezugseinheiten vorgenommen. Als Grundlage hierzu dienten die von den staatlichen geologischen Diensten ausgewiesenen räumlichen Bezugseinheiten aus dem System der hydrogeologischen Räume des Locker- und Festgesteinsbereichs Deutschlands (Gliederung SGD). Auf diese Weise wurden 17 hydrogeologische Bezugseinheiten mit überregionaler Bedeutung ausgegliedert. Die durchgeführten Arbeiten gehen damit über die bisher ausschließlich länderspezifisch vorliegenden Angaben zu diesen Einheiten hinaus und führen zu einer Vereinheitlichung.

Die Bearbeitung des Projektes beruhte auf Grundwasserbeschaffenheitsdaten der Bundesländer. Nach Abschluss der Datenübergabe lagen etwa 154.000 Proben aus ca. 40.000 Grundwassermessstellen vor. Diese Daten wurden aufbereitet, hinsichtlich ihres Formates homogenisiert und in einer Projektdatenbank zusammengeführt. Anschließend wurden Plausibilitätstests von Einzelanalysen durchgeführt und Zeitreihen durch Medianbildung eliminiert. Insgesamt gingen Analysen von ca. 26000 Messstellen aus 17 hydrogeologischen Bezugseinheiten in die Auswertung ein.

Die Ausweisung der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit erfolgte separat für jede einzelne hydrogeologische Bezugseinheit. Je nach Datenlage wurden jeweils 25 bis 40 anorganische Parameter ausgewertet. Die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit wurde auf der Basis von zwei parallel, aber unabhängig voneinander eingesetzten Verfahren abgeleitet. Zum einen wurde ein *rangstatistisches Verfahren* auf Basis mehrerer hydrochemischer Präselektionsschritte nach Leitinhaltstoffen verwendet. Hierbei handelt es sich um eine einfach zu handhabende Methode, die jedoch zwei Nachteile aufweist. Zum einen beruhen die Kriterien zur hydrochemischen Präselektion nach Leitinhaltstoffen auf Erfahrungswissen und/oder subjektiv ausgewählten Kriterien. Es konnte nachgewiesen werden, dass der bei der Präselektion unterstellte Wirkzusammenhang zwischen der Konzentration von Leitinhaltstoffen und dem Beeinflussungsgrad nur in Einzelfällen vorliegt. Die Präselektion führt vor allem in sauerstoffreichen Grundwässern zu einer Reduzierung des auswertbaren Gesamtdatenbestandes um bis zu 90%, so dass die räumliche und statistische Relevanz der Auswertung in Frage gestellt werden kann.

Zum anderen wurde im Rahmen des Projektes das Verfahren der *Komponentenseparation* entwickelt und eingesetzt. Hierbei wird die beobachtete Häufigkeitsverteilung eines Grundwasserparameters analysiert und durch statistische Verteilungsfunktionen, welche die natürliche und beeinflusste Komponente repräsentieren, beschrieben. Da bei diesem Verfahren keine Präselektion der Daten erforderlich ist, geht der gesamte Datenbestand in die Auswertung ein. Als Ergebnis erhält man charakteristische, auf der Basis objektiver wissenschaftlicher Kriterien abgeleitete Kenngrößen von Wahrscheinlichkeitsfunktionen, die den natürlichen Komponenten der beobachteten Häufigkeitsverteilungen entsprechen. Hiermit war es möglich, in sich schlüssige Werte für den als natürlich anzusehenden Konzentrationsbereich eines bestimmten Grundwasserinhaltsstoffes in einer hydrogeologischen Bezugseinheiten zu ermitteln.

Aus diesen Gründen wurden zur abschließenden Ausweisung natürlicher Hintergrundwerte in den jeweiligen hydrogeologischen Bezugseinheiten ausschließlich die mit der Komponentenseparation ermittelten Konzentrationsbereichen der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit herangezogen. An dieser Stelle sei aber darauf hingewiesen, dass auch die rangstatistische Auswertung in vielen Fällen Werte liefert, die als repräsentativ für die natürliche Grundwasserbeschaffenheit angesehen werden können. In Tabelle 20, Tabelle 21 und Tabelle 22 sind die bundesweit ermittelten Spannweiten der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit aufgeführt. Vergleicht man die Konzentrationen der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit für die Einzelparameter in den jeweiligen hydrogeologischen Bezugseinheiten miteinander, so stellt man zwischen den Einheiten zum Teil beträchtliche Unterschiede fest. Diese belegen zum einen die enge Wechselbeziehung zwischen den jeweiligen hydrologischen, petrografischen und pedologischen Verhältnissen und der (natürlichen) Grundwasserbeschaffenheit. Zum anderen belegen sie eindrucksvoll, dass die Festlegung von Spannbreiten der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit getrennt nach hydrogeologischen Bezugseinheiten sachlich sinnvoll und notwendig ist.

Für die Haupt- und Nebeneinhaltsstoffe (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO_4 , HCO_3 , NO_3 , NH_4 , Fe(II), Mn(II)) lagen genügend Messwerte vor, um die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit für alle betrachteten hydrogeologischen Bezugseinheiten abzuleiten. Gleiches gilt für die Summen- und Milieuparameter (el. Leitfähigkeit, O_2 , pH, DOC) sowie für zehn Spurenstoffe (Al, As, B, Cd, Cr, Hg, Ni, NO_2 , PO_4 , Pb). Für die übrigen Spurenstoffe (Ag, Ba, Bi, Br, Co, Cu, F, J, Li, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Zn) lagen nur für einige Bezugseinheiten länderübergreifend genügend Messwerte vor, so dass nur im Einzelfall Hintergrundwerte ausgewiesen wurden.

In einer Reihe von Fällen konnte nur eine einzige Komponente identifiziert werden. Hierbei ist davon auszugehen, dass entweder eine signifikante anthropogene Beeinflussung dieses Parameters nicht vorliegt, oder aber aufgrund einer ubiquitären Überprägung nicht feststellbar ist. Für eine Reihe von Spurenelementen (vor allem den Schwermetallen) waren die gemessenen Konzentrationen häufig so gering, dass sie unterhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenzen liegen. Da die Bestimmungsgrenzen in diesem Fall als „Obergrenze“ angegeben waren, sind die Häufigkeitsverteilungen der betreffenden Parameter häufig signifikant von der jeweiligen Bestimmungsgrenze beeinflusst. In diesen Fällen wurde im Allgemeinen keine beeinflusste Komponente ausgewiesen. Die Bandbreiten der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit entsprechen dort im Wesentlichen den Werten, die sich auch aus der Primärstatistik ergeben.

Bei einigen Parametern wurden in einzelnen hydrogeologischen Bezugseinheiten zwei Komponenten identifiziert, die allerdings beide als natürlich eingestuft wurden. Dies betrifft beispielsweise Parameter, die in einer bestimmten hydrogeologischen Bezugseinheit einen beträchtlichen Anteil am Gesamtlösungsinhalt aufwiesen, wie z.B. Hydrogenkarbonat in karbonathaltigen Aquiferen oder Eisen in reduzierten Grundwasserleitern. Die ausgewiesenen Bandbreiten der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit entsprechen hierbei als Summe beider Komponenten den Werten, die sich aus der Primärstatistik ergeben.

Die ausgewiesenen Hintergrundwerte sollen die in der Grundwasserüberwachung des Bundes und der Länder tätigen Institutionen in ihrer täglichen Arbeit unterstützen, indem sie helfen zu beurteilen, ob der Lösungsinhalt einer aus einer bestimmten hydrogeologischen Bezugseinheit stammenden Grundwasserprobe vor dem Hintergrund länderübergreifend ermittelter Wertespanssen der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit innerhalb eines als natürlich anzusehenden Wertebereichs liegt. Aber auch wenn einzelne oder mehrere Parameter oberhalb dieses Wertebereichs liegen, bedeutet dies nicht notwendigerweise, dass die betreffende Grundwasserprobe ein beeinflusstes Grundwasser repräsentiert. Zunächst sind diese Proben lediglich als auffällig zu bewerten. In diesem Fall sollte im Rahmen einer Detailuntersuchung überprüft werden, ob es sich tatsächlich um ein anthropogen überprägtes Grundwasser handelt, oder ob hier geogene Anomalien (wie z.B. Meerwasserintrusionen) eine Rolle spielen. Vor der Einleitung von Maßnahmen für eine Trendumkehr zur Erreichung des guten chemischen Zustands des Grundwassers entsprechend WRRL sollte daher die konkrete Genese des Grundwassers überprüft und den Ursachen der Abweichung nachgegangen werden.



Ausblick

In dieser Studie wurden erstmalig für Deutschland länderübergreifende Hintergrundwerte der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit für 17 hydrogeologische Bezugseinheiten ausgewiesen. Offen bleibt jedoch noch die Frage, inwieweit diese Werte für die Umsetzung der WRRL verwendet werden können. Bezugseinheit für deren Umsetzung sind nämlich die an Vorfluter angebundenen Grundwasserkörper. Diese sind inzwischen bundesweit von den Ländern ausgewiesen worden. Die Lage der Grundwasserkörper ist nur im Einzelfall deckungsgleich mit den hier verwendeten hydrogeologischen Bezugseinheiten. Vor allem im Festgestein setzt sich ein Grundwasserkörper häufig aus verschiedenen hydrogeologischen Bezugseinheiten zusammen. Daher sind die ausgewiesenen Hintergrundwerte nicht ohne Weiteres für die Angabe von Hintergrundwerten für die Grundwasserkörper verwendbar.

Es wird daher empfohlen, die natürliche Grundwasserbeschaffenheit mit dem hier eingesetzten Verfahren exemplarisch für eine größere Anzahl von Grundwasserkörpern auszuweisen und mit den bislang vorliegenden Werten zu vergleichen. Im Rahmen dieser Detailuntersuchungen kann überprüft werden, ob eine flächengewichtete, auf die Grundwasserkörper bezogene Mittelwertbildung der für die 17 hydrogeologischen Bezugseinheiten bezogenen Hintergrundwerte unter Umständen schon ausreicht, um Referenzwerte für den guten chemischen Zustand des Grundwassers der Grundwasserkörper abzuleiten.

Parallel hierzu kann im Rahmen von Detailstudien verstärkt auf die Analyse des Ausmaßes und der Art von anthropogenen Einwirkungen auf den Zustand des Grundwassers eingegangen werden. Aus den „Flächenverhältnissen“ der beiden Grundwasserkomponenten bei der Komponentenseparation kann direkt auf den Grad der Beeinflussung geschlossen werden. Zum anderen sind durch eine Analyse der punktförmigen und der diffusen Schadstoffquellen in einem Grundwasserkörper der bzw. die Verursacher für mögliche Grundwasserverunreinigungen sowie das Ausmaß der anthropogenen Überprägung identifizierbar. Für die „weitergehende Beschreibung“ im Sinne der WRRL sind diese Analysen zur Quantifizierung der Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten auf die Grundwasserbeschaffenheit unerlässlich, z.B. im Hinblick auf die Ableitung weiterführender Maßnahmen nach WRRL zur Einleitung einer Trendumkehr von als „gefährdet“ eingestuften Grundwasserkörpern.

Die Grundwasserbeschaffenheit ist von einer Reihe von Einflussfaktoren abhängig, die nicht alle in ihrer Relevanz betrachtet werden konnten. Dies betrifft insbesondere den Einfluss der Landnutzung. Es gibt eine Reihe von Hinweisen, dass sich

beispielsweise der Lösungsgehalt des Grundwassers unter Waldflächen von dem unter Grünlandflächen deutlich unterscheiden kann. Um den Einfluss der ubiquitären Überprägung der Grundwässer näher untersuchen und quantifizieren zu können, sollte eine weitergehende Differenzierung der Grundwassermessstellen nach der Landnutzung, gefolgt von einer analog zu dieser Studie vorgenommenen Auswertung, durchgeführt werden.

Die Möglichkeit einer Regionalisierung der Grundwasserdaten mit dem SIMIK+-Verfahren wurde exemplarisch für Nitrat mit einem stark reduzierten Datensatz demonstriert. Bei Vorliegen einer Softwareversion, die den gesamten Datenbestand verarbeiten kann, ist eine bundesweite Anwendung des Verfahrens für alle Grundwasserparameter durchaus möglich. In diesem Fall kann nicht nur der Ist-Zustand, sondern auch die natürliche Grundwasserbeschaffenheit und die Differenz beider Größen bundesweit flächendifferenziert ermittelt und kartografisch dargestellt werden. Der Bearbeitungsaufwand hierfür ist jedoch sehr hoch und geht über den Rahmen der hier durchgeführten Arbeiten weit hinaus.

10

Literaturverzeichnis

- BAYGLA (2003):** Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns. Bayerisches Geologisches Landesamt, GLA-Fachberichte 21, München.
- BGR (1990):** Internationale Hydrogeologische Karte von Europa 1:1.500.000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BGR (1993):** Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000, Grundkarte. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BGR (2003):** Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland 1:200.000 (HÜK 200). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Staatliche Geologische Dienste der Länder (unveröff.).
- BSLU (1993):** Grundwasser, Menge und Beschaffenheit des Grundwassers in Bayern.- Schriftenreihe Wasserwirtschaft in bayern Heft 28, Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München.
- BSLU (2003):** Grundwasser, Menge und Beschaffenheit des Grundwassers in Bayern. Schriftenreihe Wasserwirtschaft in Bayern Heft 28, Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München.
- EG (2000):** Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie) vom 22.12.2000, Luxemburg.
- DVWK (1999):** Methoden für die Beschreibung der Grundwasserbeschaffenheit. DVWK-Schriften 125, Bonn.
- DVWK (1994):** Auswertung und Bewertung von Grundwasser-Untersuchungen. DVWK-Materialien 1/94, 70 S. Bonn.
- DVWK (1992):** Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, 128/1992, Bonn.
- GERB, L. (1958):** Grundwassertypen. Vom Wasser, 25, S. 16-47, Weinheim/Bergstraße.
- GLA SA (1996):** Hydrogeologische Übersichtskarte von Sachsen-Anhalt. Geologisches Landesamt Sachsen-Anhalt, Halle.
- HANNAPPEL, S., VILLWOCK, G. & H. SENZE (1999):** Grundwasserkataster Sachsen-Anhalt gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie. Wasser & Abfall, 6/99, S. 18-21, Wiesbaden.
- HANNAPPEL, S. (1996):** Die Beschaffenheit des Grundwassers in den hydrogeologischen Strukturen der neuen Bundesländer. Diss. FU Berlin, Berliner Geowiss. Abhandlungen, Reihe A, Bd. 182, Berlin.
- HEM, J.D.(1985).** Studies and interpretation of the chemical characteristics of natural water USGS Water Supply Paper, 2254, 263 S. Washington DC.

HLfB (1991): Hydrogeologisches Kartenwerk Hessen 1:300.000. Geologische Abhandlungen Hessen, 95, Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Wiesbaden.

HLfU (1998): Grundwasserbeschaffenheit in Hessen, Auswertung von Grund- und Rohwasseranalysen bis 1997. Hrsg.: Hessische Landesanstalt für Umwelt, Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Heft 250, Wiesbaden.

JAHN, D. & KLEIN, M. (1995): Der Tegeler See - ein Beispiel der Eutrophierungsbekämpfung im Ballungsraum Berlin. Die Havel, Studien und Tagungsberichte, 8, Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam.

JENSEN, H., FRITZ, J., BICKELMANN, H., GRÜTZMANN, J., KOCKEL, F., MEINER, D., REICHLING, J. & WINDELBERG, S. (2003): Grundwasser- und Geotechnische Planungskarte Bremerhaven.- 68 S., 6 Karten; Magistrat der Seestadt Bremerhaven, Umweltschutzamt (Bremerhaven).

KÖLLE, W. (1989): Stickstoffverbindungen im Grund- und Rohwasser. Weiterbildendes Studium Bauingenieurwesen, Wasserwirtschaft, Universität Hannover, Kurs SW 23, 39 S.; Hannover.

KÖLLE, W. (2001): Wasseranalysen - richtig beurteilt. Wiley-VCH Verlag, 357 S.

KRAJNOV, S.R. & V.M. SVEC (1992): Gidrogeochimija (russ.) Jzd. Nedra, Moskwa.

KUNKEL, R., HANNAPPEL, S., VOIGT, H.-J. & F.WENDLAND (2002): Die natürliche Grundwasserbeschaffenheit ausgewählter hydrostratigrafischer Einheiten in Deutschland. Bericht, 97 S.

LANGGUTH, H.-R. & R. VOIGT (1980): Hydrogeologische Methoden. 468 S., Berlin/Heidelberg/New York, Springer.

LANU SH (2002): Beobachtung und Überwachung der Grundwasserbeschaffenheit in Schleswig-Holstein, Basismessnetz 1996 bis 2000. Hrsg.: Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein, Flintbek.

LAU SA (1998): Gewässergütebericht Sachsen-Anhalt, Teil Grundwasser 1998. Hrsg.: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Dezernat Wassergütewirtschaft, Halle / S. (unveröffentlicht).

LfU BW (1994): Grundwasserüberwachungsprogramm, Geogen geprägte Hintergrundbeschaffenheit. Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.

LfU BW (2001): Grundwasserüberwachungsprogramm, Atlas des Grundwasserzustandes in Baden-Württemberg. Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz, Karlsruhe.

LfU BW (2003): Grundwasserüberwachungsprogramm, Ergebnisse der Beprobung 2002. Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz, Karlsruhe.

LfUG SN (1992): Geologische Übersichtskarte von Sachsen 1:400.000. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.

- LfUG SN (2002):** Bericht zur Grundwassersituation 1995-2000. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Radebeul.
- LfUG SN (2003):** Hydrogeologische Übersichtskarte von Sachsen 1:400.000. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg (unveröff.).
- LUA BB (1996):** Basisbericht zur Grundwassergüte des Landes Brandenburg. Fachbeiträge des Landesumweltamtes Brandenburg, Titelreihe Nr. 15, 57 S., Potsdam.
- LfW RP (2001):** Grundwasserbericht 2000. Hrsg.: Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland – Pfalz, Mainz.
- LUNG (1996):** Bewertung der hydrochemischen Analysenergebnisse aus den hydrogeologischen Ergebnisberichten des Landes Mecklenburg-Vorpommern. Hrsg.: Landesamt für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommern, Heft 2/97, 62 S., Stralsund.
- MANHENKE, V., REUTTER, E., HÜBSCHMANN, M., LIMBERG, A., LÜCKSTADT, M., NOMMENSEN, B., PETERS, A., SCHLIMM, W., TAUGS, R. & VOIGT, H.-J. (2001):** Hydrostratigraphische Gliederung des nord- und mitteldeutschen känozoischen Lockergesteinsgebietes. Z. Angew. Geol. 47 (2001) 3+4; S. 146-152.
- MARTIN, F. (1996):** „Seltene“ Elemente in Erzgebirgischen Grubenwässern in MERKEL, B; DIETRICH, P. G., STRUCKMEIER, W.; LÖHNERT, E. P. (Hrsg.) Grundwasser und Rohstoffgewinnung, Verlag Sven von Loga, Köln.
- MATTHESS, G. (1990):** Die Beschaffenheit des Grundwassers. Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 2, Verlag Gebr. Bornträger, Berlin und Stuttgart.
- MATSCHULLAT, J.; TOBSCHALL, H.-J. & H.J. VOIGT (1997):** Geochemie und Umwelt; Relevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- MUNLV (2002):** Grundwasserbericht 2000. Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Natur, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.
- NLfB (1995):** Quartärgeologische Übersichtskarte von Niedersachsen und Bremen 1:500.000. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.
- QUENTIN, K.-E & L. FEILER (1968):** Selen in Grund- und Oberflächenwässern. Vom Wasser, 34, 19 – 30, Weinheim/Bergstr.
- RECHENBERG, J., MARKARD, C. & U. IRMER (2000):** Die neue Wasserrahmenrichtlinie (Teil IV). Wasserwirtschaft-Wassertechnik, wwt wat, 4, 2000.
- SCHENK, V. (2003):** Natürliche Grundwasserbeschaffenheit. Definition und Abgrenzung gegen verwandte Begriffe. Grundwasser, 8 (2), 122-124, Hannover.
- SCHLEYER, R. & H. KERNDORFF (1992):** Die Grundwasserqualität westdeutscher Trinkwasserressourcen. Verlag VCH, 245 S., Weinheim.

SenStadtUm (1986): Das Grundwasser in Berlin - Bedeutung, Probleme, Sanierungskonzeptionen.- Besondere Mitteilungen zum Gewässerkundlichen Jahresbericht des Landes Berlin, Hrsg.: Der Senator für Stadtentwicklung und Umweltschutz, Berlin.

SENSTADT (1997): Sicherung der Trinkwasserversorgung Berlins, Hydrogeologische Voraussetzung, Abschlussbericht. Freie Universität Berlin, Institut für Geologie, Geophysik und Geoinformatik, Fachrichtung Rohstoff- und Umweltgeologie, Autoren: PEKDEGER, A., SOMMER-VON JARMERSTED, C. & E. KÖSTERS, im Auftrag des Senates von Berlin (unveröffentlicht).

SENSTADT (2002): Hydrogeochemische Charakterisierung des Grundwassers in Berlin. Bericht der FUGRO Consult GmbH und der HYDOR Consult GmbH im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin (unveröffentlicht).

TLUG (1997): Grundwasser in Thüringen, Bericht zu Menge und Beschaffenheit. Hrsg.: Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, Erfurt.

TRUDELL, M. R., GILLHAM, R. W. UND CHERRY, J. A. (1986): An in situ study of the occurrence and rate of denitrification in a shallow unconfined sand aquifer. J. of Hydrol., 83, 251–268.

UAG EU-WRRL (2002A): Konzept „Hydrogeologische Räume in Deutschland“. Unterarbeitsgruppe EU-Wasserrahmenrichtlinie der ad hoc AG „Hydrogeologie“ der Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands, Hannover (unveröff.).

UAG EU-WRRL (2002B): Tabellen zur Hydrostratigraphie „Mesozoikum“ und „Paläozoikum“. Unterarbeitsgruppe EU-Wasserrahmenrichtlinie der ad hoc AG „Hydrogeologie“ der Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands, Hannover (unveröff.).

UBA (2000): Entwicklung von Erfassungs- und Auswertungsverfahren für Grundwasserzustandsdaten zur Erfüllung internationaler Berichtspflichten des Bundes gegenüber der Europäischen Union. UBA-Forschungsbericht 298 23 241, Berlin (unveröffentlicht).

UHH (1998): Grundwasserbericht Hamburg 1997. Hrsg.: Umweltbehörde Hamburg, Amt für Umweltschutz, Abteilung Wasserwirtschaftliche Planung und Gewässerkunde, Hamburg.

VOIGT, H.-J. (1990): Hydrogeochemie, Eine Einführung in die Beschaffenheitsentwicklung des Grundwassers. 310 S., Springer, Berlin.

WENDLAND, F. & R. KUNKEL (1999): Das Nitratabbauvermögen im Grundwasser des Elbe-einzugsgebietes. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, B.13, 166 S., Jülich.

1. **Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland. Stand der Entwicklung**
IKARUS-Workshop vom 24. bis 25. Januar 1996
herausgegeben von S. Molt, U. Fahl (1997), 292 Seiten
ISBN: 3-89336-205-3
2. **Ausbau erneuerbarer Energiequellen in der Stromwirtschaft**
Ein Beitrag zum Klimaschutz
Workshop am 19. Februar 1997, veranstaltet von der Forschungszentrum Jülich GmbH und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
herausgegeben von J.-Fr. Hake, K. Schultze (1997), 138 Seiten
ISBN: 3-89336-206-1
3. **Modellinstrumente für CO₂-Minderungsstrategien**
IKARUS-Workshop vom 14. bis 15. April 1997
herausgegeben von J.-Fr. Hake, P. Markewitz (1997), 284 Seiten
ISBN: 3-89336-207-X
4. **IKARUS-Datenbank - Ein Informationssystem zur technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Bewertung von Energietechniken**
IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien
Abschlußbericht Teilprojekt 2 „Datenbank“
H.-J. Laue, K.-H. Weber, J. W. Tepel (1997), 90 Seiten
ISBN: 3-89336-214-2
5. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 1. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 410 Seiten
ISBN: 3-89336-215-0
6. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 2. Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen energiebedingtes CO₂
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 110 Seiten
ISBN: 3-89336-216-9

7. **Modelle für die Analyse energiebedingter Klimagasreduktionsstrategien**
IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien
Abschlußbericht Teilprojekt 1 „Modelle“
P. Markewitz, R. Heckler, Ch. Holzapfel, W. Kuckshinrichs, D. Martinsen,
M. Walbeck, J.-Fr. Hake (1998), VI, 276 Seiten
ISBN: 3-89336-220-7
8. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 3. Methodik-Leitfaden für die Wirkungsabschätzung von Maßnahmen zur Emissionsminderung
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1998), VIII, 95 Seiten
ISBN: 3-89336-222-3
9. **Horizonte 2000**
6. Wolfgang-Ostwald-Kolloquium der Kolloid-Gesellschaft
3. Nachwuchstage der Kolloid- und Grenzflächenforschung
Kurzfassungen der Vorträge und Poster
zusammengestellt von F.-H. Haegel, H. Lewandowski, B. Krah-Urban (1998),
150 Seiten
ISBN: 3-89336-223-1
10. **Windenergieanlagen - Nutzung, Akzeptanz und Entsorgung**
von M. Kleemann, F. van Erp, R. Kehrbaum (1998), 59 Seiten
ISBN: 3-89336-224-X
11. **Policy Scenarios for Climate Protection**
Study on Behalf of the Federal Environmental Agency
Volume 4. Methodological Guideline for Assessing the Impact of Measures for Emission Mitigation
edited by G. Stein, B. Strobel (1998), 103 pages
ISBN: 3-89336-232-0
12. **Der Landschaftswasserhaushalt im Flußeinzugsgebiet der Elbe**
Verfahren, Datengrundlagen und Bilanzgrößen
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im
Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 1.
von R. Kunkel, F. Wendland (1998), 110 Seiten
ISBN: 3-89336-233-9

13. **Das Nitratabbauvermögen im Grundwasser des Elbeeinzugsgebietes**
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im
Flußeeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 2.
von F. Wendland, R. Kunkel (1999), 166 Seiten
ISBN: 3-89336-236-3

14. **Treibhausgasminderung in Deutschland zwischen nationalen Zielen und
internationalen Verpflichtungen**
IKARUS-Workshop am 27.05.1998, Wissenschaftszentrum Bonn-Bad
Godesberg. Proceedings
herausgegeben von E. Läge, P. Schaumann, U. Fahl (1999), ii, VI, 146 Seiten
ISBN: 3-89336-237-1

15. **Satellitenbilddauswertung mit künstlichen Neuronalen Netzen zur
Umweltüberwachung**
Vergleichende Bewertung konventioneller und Neuronaler Netzwerkalgorithmen
und Entwicklung eines integrierten Verfahrens
von D. Klaus, M. J. Canty, A. Poth, M. Voß, I. Niemeyer und G. Stein (1999),
VI, 160 Seiten
ISBN: 3-89336-242-8

16. **Volatile Organic Compounds in the Troposphere**
Proceedings of the Workshop on Volatile Organic Compounds in the
Troposphere held in Jülich (Germany) from 27 – 31 October 1997
edited by R. Koppmann, D. H. Ehhalt (1999), 208 pages
ISBN: 3-89336-243-6

17. **CO₂-Reduktion und Beschäftigungseffekte im Wohnungssektor durch das
CO₂-Minderungsprogramm der KfW**
Eine modellgestützte Wirkungsanalyse
von M. Kleemann, W. Kuckshinrichs, R. Heckler (1999), 29 Seiten
ISBN: 3-89336-244-4

18. **Symposium über die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen Sonne und
Wind auf Fischereischiffen und in Aquakulturbetrieben**
Symposium und Podiumsdiskussion, Izmir, Türkiye, 28.-30.05.1998.
Konferenzbericht
herausgegeben von A. Özdamar, H.-G. Groehn, K. Ülgen (1999), IX, 245 Seiten
ISBN: 3-89336-247-9

19. **Das Weg-, Zeitverhalten des grundwasserbürtigen Abflusses im Elbeeinzugsgebiet**
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 3.
von R. Kunkel, F. Wendland (1999), 122 Seiten
ISBN: 3-89336-249-5

20. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 5. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2020
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1999), XII, 201 Seiten
ISBN: 3-89336-251-7

21. **Klimaschutz durch energetische Sanierung von Gebäuden. Band 1**
von J.-F. Hake, M. Kleemann, G. Kolb (1999), 216 Seiten
ISBN: 3-89336-252-2

22. **Electroanalysis**
Abstracts of the 8th International Conference held from 11 to 15 June 2000 at the University of Bonn, Germany
edited by H. Emons, P. Ostapczuk (2000), ca. 300 pages
ISBN: 3-89336-261-4

23. **Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050**
von M. Kleemann, R. Heckler, G. Kolb, M. Hille (2000), II, 94 Seiten
ISBN: 3-89336-262-2

24. **Grundlegende Entwicklungstendenzen im weltweiten Stoffstrom des Primäraluminiums**
von H.-G. Schwarz (2000), XIV, 127 Seiten
ISBN: 3-89336-264-9

25. **Klimawirkungsforschung auf dem Prüfstand**
Beiträge zur Formulierung eines Förderprogramms des BMBF
Tagungsband des Workshop „Klimaforschung“, Jülich, vom 02. bis 03.12.1999
von J.-Fr. Hake, W. Fischer (2000), 150 Seiten
ISBN: 3-89336-270-3

26. **Energiezukunft 2030**
Schlüsseltechnologien und Techniklinien
Beiträge zum IKARUS-Workshop 2000 am 2./3. Mai 2000
herausgegeben von U. Wagner, G. Stein (2000), 201 Seiten
ISBN: 3-89336-271-1

27. **Der globale Wasserkreislauf und seine Beeinflussung durch den Menschen**
Möglichkeiten zur Fernerkundungs-Detektion und -Verifikation
von D. Klaus und G. Stein (2000), 183 Seiten
ISBN: 3-89336-274-6

28. **Satelliten und nukleare Kontrolle**
Änderungsdetektion und objektorientierte, wissensbasierte Klassifikation von
Multispektralaufnahmen zur Unterstützung der nuklearen Verifikation
von I. Niemeyer (2001), XIV, 206 Seiten
ISBN: 3-89336-281-9

29. **Das hydrologische Modellsystem J2000**
Beschreibung und Anwendung in großen Flußgebieten
von P. Krause (2001), XIV, 247 Seiten
ISBN: 3-89336-283-5

30. **Aufwands- und ergebnisrelevante Probleme der Sachbilanzierung**
von G. Fleischer, J.-Fr. Hake (2002), IV, 64 Blatt
ISBN: 3-89336-293-2

31. **Nachhaltiges Management metallischer Stoffströme**
Indikatoren und deren Anwendung
Workshop, 27.-28.06.2001 im Congresszentrum Rolduc, Kerkrade (NL)
herausgegeben von W. Kuckshinrichs, K.-L. Hüttner (2001), 216 Seiten
ISBN: 3-89336-296-7

32. **Ansätze zur Kopplung von Energie- und Wirtschaftsmodellen zur
Bewertung zukünftiger Strategien**
IKARUS-Workshop am 28. Februar 2002, BMWi, Bonn. Proceedings
herausgegeben von S. Briem, U. Fahl (2003), IV, 184 Seiten
ISBN: 3-89336-321-1

33. **TRACE. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology**
Volume 1: Proceedings of the Dendrosymposium 2002,
April 11th – 13th 2002, Bonn/Jülich, Germany
edited by G. Schleser, M. Winiger, A. Bräuning et al., (2003), 135 pages, many
partly coloured illustrations
ISBN: 3-89336-323-8

34. **Klimaschutz und Beschäftigung durch das KfW-Programm zur CO₂-
Minderung und das KfW-CO₂-Gebäudesanierungsprogramm**
von M. Kleemann, R. Heckler, A. Kraft u. a., (2003), 53 Seiten
ISBN: 3-89336-326-2

35. **Klimaschutz und Klimapolitik: Herausforderungen und Chancen**
Beiträge aus der Forschung
herausgegeben von J.-Fr. Hake, K. L. Hüttner (2003), III, 231 Seiten
ISBN: 3-89336-327-0

36. **Umweltschutz und Arbeitsplätze, angestoßen durch die Tätigkeiten des
Schornsteinfegerhandwerks**
Auswertung von Schornsteinfeger-Daten
von M. Kleemann, R. Heckler, B. Krüger (2003), VII, 66 Seiten
ISBN: 3-89336-328-9

37. **Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen**
von H. Bogen, R. Kunkel, T. Schöbel, H. P. Schrey, F. Wendland (2003), 148
Seiten
ISBN: 3-89336-329-7

38. **Dendro-Isotope und Jahrringbreiten als Klimaproxis der letzten 1200 Jahre
im Karakorumgebirge/Pakistan**
von K. S. Treydte (2003), XII, 167 Seiten
ISBN: 3-89336-330-0

39. **Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland**
herausgegeben von P. Markewitz, G. Stein (2003), IV, 274 Seiten
ISBN: 3-89336-333-5

40. **Umweltverhalten von MTBE nach Grundwasserkontamination**
von V. Linnemann (2003), XIV, 179 Seiten
ISBN: 3-89336-339-4

41. **Climate Change Mitigation and Adaptation: Identifying Options for Developing Countries**
Proceedings of the Summer School on Climate Change, 7-17 September 2003, Bad Münstereifel, Germany
edited by K. L. Hüttner, J.-Fr. Hake, W. Fischer (2003), XVI, 341 pages
ISBN: 3-89336-341-6

42. **Mobilfunk und Gesundheit: Risikobewertung im wissenschaftlichen Dialog**
von P. M. Wiedemann, H. Schütz, A. T. Thalmann (2003), 111 Seiten
ISBN: 3-89336-343-2

43. **Chemical Ozone Loss in the Arctic Polar Stratosphere: An Analysis of Twelve Years of Satellite Observations**
by Simone Tilmes (2004), V, 162 pages
ISBN: 3-89336-347-5

44. **TRACE. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology**
Volume 2: Proceedings of the Dendrosymposium 2003,
May 1st – 3rd 2003, Utrecht, The Netherlands
edited by E. Jansma, A. Bräuning, H. Gärtner, G. Schleser (2004), 174 pages
ISBN: 3-89336-349-1

45. **Vergleichende Risikobewertung: Konzepte, Probleme und Anwendungsmöglichkeiten**
von H. Schütz, P.M. Wiedemann, W. Hennings et al. (2004), 231 Seiten
ISBN: 3-89336-350-5

46. **Grundlagen für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen in der Metropolregion Hamburg**
von B. Tetzlaff, R. Kunkel, R. Taug, F. Wendland (2004), 87 Seiten
ISBN: 3-89336-352-1

47. **Die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland**
von R. Kunkel, H.-J. Voigt, F. Wendland, S. Hannappel (2004), 204 Seiten
ISBN: 3-89336-353-X

Das Grundwasser in Deutschland hat eine große Bedeutung für die Versorgung der Bevölkerung und der Wirtschaft mit Trink- und Brauchwasser. Dem Schutz des Grundwassers tragen daher eine Vielzahl von landes-, bundes- und europaweiten Regelungen Rechnung. So sind beispielsweise die Mitgliedsstaaten der Europäischen Gemeinschaft durch die Wasserrahmenrichtlinie aufgefordert, Maßnahmen einzuleiten, die den guten mengenmäßigen und chemischen Zustand des Grundwassers und der Oberflächengewässer sichern bzw. wiederherstellen.

Ein nur durch Faktoren der Natur geprägtes und durch menschliches Zutun unbeeinflusstes Grundwasser gibt es in Deutschland schon seit Jahrhunderten nicht mehr. Durch Rodungen und Ackerbau, forstwirtschaftliche Nutzungen der Restwälder, Regulierung der Vorflut und Grundwasserentnahmen ist der Stoffgehalt des Grundwassers in der Regel ubiquitär überprägt. Hinzu kommen weitere diffuse und punktuelle Stoffeinträge, z.B. aus der Landwirtschaft, der Atmosphäre oder durch Abtablagerungen.

In diesem Buch werden die Ergebnisse eines von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) geförderten Forschungsvorhabens dokumentiert, welches die Ausweisung der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland zum Ziel hatte. Hierzu wurde eine Methode entwickelt, mit der die stoffspezifischen natürlichen von den anthropogen bedingten Stoffgehalten des Grundwassers abgetrennt werden können. Auf der Basis von ca. 26000 Grundwassermessstellen aus den Beständen der Bundesländer wurden die Hintergrundwerte für etwa 40 Hauptinhaltsstoffe, Nebeninhaltsstoffe und Spurenelemente getrennt für 17 hydrogeologische Bezugseinheiten ermittelt.

Forschungszentrum Jülich
in der Helmholtz-Gemeinschaft



HYDOR



Band/Volume 47
ISBN 3-89336-353-X

**Umwelt
Environment**