Stephan Hannappel u. a.

Flächenhafte Ermittlung der Konzentrationen diffus eingetragener Nährstoffe in das oberflächennahe Grundwasser Nordostdeutschlands

In Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin, Sachsen-Anhalt und Sachsen wurden zu Grundwasserinhaltsstoffen, die überwiegend aus diffus verteilten Quellen in den Untergrund eingetragen werden, flächenhafte Konzentrationen mit geostatistischen Methoden ermittelt. Die Daten wurden seitens der Landesbehörden anschließend dazu verwendet, den chemischen Zustand der Grundwasserkörper in Bezug auf die europäischen Berichtspflichten zu ermitteln oder diese mit bereits vorhandenen Ergebnissen der Zustandsbestimmung zu vergleichen. Die hier erstmals länderübergreifend dokumentierten Konzentrationen zeigen in ihrer räumlichen Verteilung oftmals Zusammenhänge zum hydrogeologischen Aufbau des Untergrundes, aber auch zur aktuellen Landnutzung.

1. Einleitung

Zur Erfüllung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und der Grundwasserrichtlinie [GWRL, 1] war es seitens der zuständigen Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder notwendig, die Grundwasserkörper in Deutschland in Bezug auf den chemischen Zustand zu bewerten. Die Bewertung wurde auf Grundlage von Kriterien durchgeführt, die von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser abgestimmt worden waren [2]. Sie erfolgte durch den Vergleich mit konzentrationsbezogenen Qualitätsnormen und Schwellenwerten für ausgewählte Grundwasserinhaltsstoffe. Hierfür war es im Vorfeld notwendig, in flächenhafter Form möglichst aktuelle Konzentrationen von Stoffen zu ermitteln, die einerseits in natürlichen Konzentrationsbereichen im Grundwasser vorkommen, andererseits aber auch dem diffus geprägten anthropogenen Stoffeintrag in das oberflächennahe Grundwasser unterliegen. Auf Grundlage dieses Kenntnisstandes konnten dann die Grundwasserkörper nach [2] in den „guten" oder „schlechten" chemischen Zustand eingestuft werden, z. B. [3].

2. Methodisches Vorgehen

Die Berechnung der flächenhaften Konzentrationen in fünf Bundesländern im Osten Deutschlands wurde mit geostatistischen Methoden in den vergangenen Jahren in vergleichbarer Form, jedoch in jeweils separaten Projekten, durchgeführt. Im Folgenden wird daher zunächst kurz auf die Auswahl der Stoffe und länderspezifischen Belange eingegangen.

2.1. Auswahl von Inhaltsstoffen für die flächenhafte Ermittlung der Konzentrationen

Der Anhang der Grundwasserrichtlinie enthält zu einigen Grundwasserinhaltsstoffen Qualitätsnormen (Anhang 1) und Schwellenwerte (Anhang 2). Die für das Grundwasser festgelegten Qualitätsnormen sind Umweltqualitätsnormen (UQN) im Sinne der WRRL für Oberflächengewässer. Die Ableitung der Schwellenwerte ist durch die Mitgliedsstaaten selbst vorzunehmen. In Deutschland werden für die Schwellenwerte die Geringfügigkeitsschwellenwerte [4] verwendet [5], die bei Vorliegen höherer geogener Hintergrundgehalte regional angehoben werden können. So sind in einzelnen Ländern die Schwellenwerte bis hinab auf die Ebene der Grundwasserkörper abgeleitet worden.

Aus dem Stoffspektrum wurden für die flächenhafte Ermittlung der aktuellen Konzentrationen solche Stoffe ausgewählt, die im Grundwasser zumeist als Haupt- oder Nebeninhaltsstoffe in Bezug auf das Lösungsspektrum vorhanden sind. Dies sind die beiden auch geogen maßgeblich im Grundwasser vorkommenden Salzkomponenten Chlorid und Sulfat sowie die beiden anorganischen Stickstoffverbindungen Nitrat (als Qualitätsnorm) und Ammonium. Die beiden letztgenannten Verbindungen werden häufig durch menschliche Aktivitäten in das Grundwasser eingetragen.

Bei den übrigen in den beiden Anhängen der GWRL aufgeführten Stoffen handelt es sich um Stoffe, die zumeist nur untergeordnet (Spurenelemente) oder gar nicht (synthetische Stoffe) im Grundwasser vorkommen. Aus diesem Grund eignen sich die punktuell an den Messstellen gemessenen Konzentrationen dieser Inhaltsstoffe weniger gut für die flächenhafte Ermittlung mit geostatistischen Mitteln. Für die Bewertung der Grundwasserkörper wurden hier von den Ländern zumeist andere Methoden angewendet.

Charakteristisch für die ausgewählten Stoffe ist, dass bei ihnen eine Konzentrationserhöhung auf den diffus wirksamen Eintrag hindeuten kann, der jedoch aus hydrodynamischen Gründen weder räumlich noch von der Art der Stoffquelle her eindeutig identifizierbar ist. Im Folgenden werden diese Stoffe kurz in Bezug auf ihre hydrogeochemische Relevanz charakterisiert.

Sulfat liegt zumeist an Calcium gebunden vor. In mineralischer Form sind Gips

und Anhydrit die wichtigsten Gesteinsbildner. Daneben stammen Sulfate im Grundwasser aus dem Schwefelkreislauf der Organismen, d. h. aus Abbauprodukten von tierischem und pflanzlichem Eiweiß. Im reduzierenden Milieu kann die Konzentration durch die Wechselwirkung von Eisensulfiden (Pyrit) mit Nitrat erhöht werden. Auf diese Weise sind hohe Konzentrationen ein Indiz für Denitrifikationsvorgänge. Der flächenhafte Eintrag kann durch Niederschläge („saurer Regen") und lokal durch industrielle bzw. kommunale Abwässer, (Kohle-) Bergbauhalden und Deponien erfolgen. In unbesiedelten Gebieten kann eine Sulfatzufuhr durch organische Wirtschaftsdünger oder Mineraldünger erfolgen. Sowohl der Grenzwert der TrinkwV als auch der für Deutschland allgemein festgelegte Schwellenwert, der im Einzelfall regional erhöht ist, beträgt bei 240 mg/l.

Chlorid kommt ebenso wie Sulfat in nahezu allen Grundwässern vor und ist in der Regel an die Kationen Natrium, Kalium oder Calcium gebunden. Chlorid ist ein idealer Tracer, der weder Abbau- noch Adsorptionsvorgängen unterliegt. Erhöhte Konzentrationen sind ein deutliches Anzeichen für Salzlagerstätten im Untergrund, den Aufstieg von Salzwasser aus tieferen Schichten oder für anthropogene Einträge durch z. B. Düngemittel, Streusalz oder Abwässer. Bei Chloridgehalten über 250 mg/l wird ein Grundwasser ungenießbar. Diese Konzentration ist sowohl der Grenzwert nach der TrinkwV aus auch der für Deutschland allgemein festgelegte Schwellenwert.

Bei Nitrat ist der geogene Anteil im Grundwasser gering, da alle Nitratsalze sehr leicht wasserlöslich sind, sodass im Laufe der Erdgeschichte keine Nitratgesteine gebildet wurden, aus denen Nitrat durch das zirkulierende Grundwasser gelöst werden kann. Bedeutendste Eintragsquellen in das Grundwasser sind die nicht von Pflanzen aufgenommenen Stickstoffmengen aus der landwirtschaftlichen Düngung. Ist ein Grundwasser sauerstofffrei, kann das mit dem Sickerwasser eingetragene Nitrat bei Anwesenheit von organischen Kohlenstoffverbindungen und/oder reduzierten Schwefel-Eisen-Verbindungen (Pyrit) reduziert werden. Die Qualitätsnorm für Nitrat beträgt 50 mg/l.

Ammonium wird durch die Verwitterung der Gesteine in so geringen Mengen freigesetzt, dass die dadurch entstehenden natürlichen Gehalte im Grundwasser unbedeutend sind [6]. Es kann jedoch auch als Abbauprodukt von Harnstoff entstehen, sodass neben erhöhten Nitrat- auch erhöhte Ammoniumwerte auf anthropogene Beeinflussung (Abwässer, Gülle, Jauche) hinweisen.

Ergänzend in die flächenhafte Ermittlung der Konzentrationen einbezogen wurde in einigen Gebieten noch Kalium, der wie Stickstoff und Phosphor ein bedeutender Pflanzennährstoff ist. Folge hiervon

Tab. 2.1 | Anzahl der für die Berechnung in den fünf Ländern zur Verfügung stehenden Messwerte pro Inhaltsstoff

Bundesland	Größe	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Ammonium	Kalium
Mecklenburg-Vorpommern	23.185	1.876	1.916	1.908	1.864	1.339
Brandenburg	29.480	1.070	1.065	1.060	1.072	1.057
Berlin	891	894	928	n. b.	890	853
Sachsen-Anhalt	20.447	1.598	1.560	1.538	1.508	1.305
Sachsen	18.418	2.534	2.447	2.726	2.406	1.827

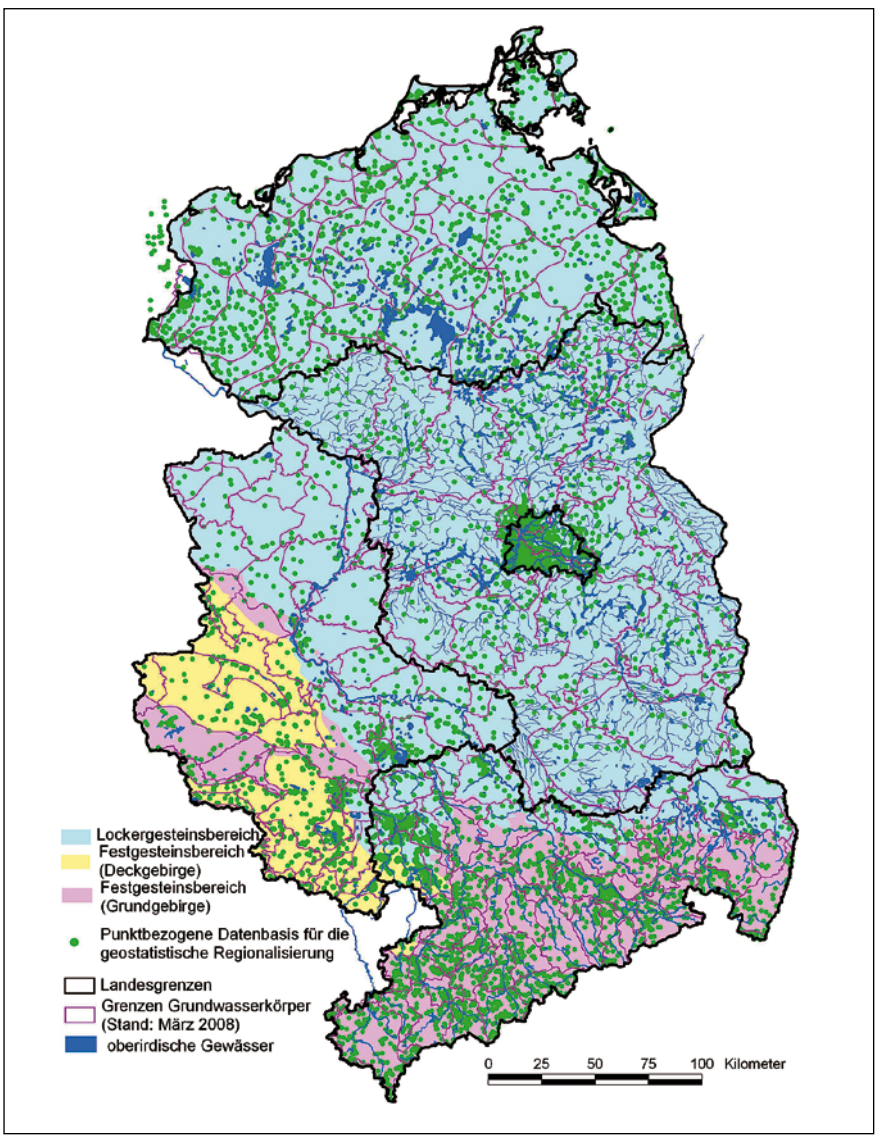

Bild 2.1: Regionale Verteilung der Grundwasseraufschlüsse als Datenbasis der Regionalisierung in den fünf Ländern

sind oft erhöhte Konzentrationen in Regionen, in denen sorptionsschwache Böden vorherrschen. Daneben kann es aber auch zu erhöhten Gehalten in der Nähe von Salzlagerstätten und im Bereich aufsteigender Tiefenwässer sowie durch häusliche und industrielle Abwässer kommen.

2.2. Datenvorauswahl

Die ausschließlich digital zur Verfügung stehenden Messwerte wurden vor den geostatistischen Berechnungen umfangreichen Plausibilitätsprüfungen unterzogen. Diese bezogen sich auf die Ermittlung vollständiger Stammdaten zu den Grundwasseraufschlüssen (Brunnen, Messstellen, Quellen), auf die einheitliche Verwendung von Angaben unterhalb von Bestimmungsgrenzen, die Eliminierung von unplausiblen Analysen anhand des Ionenbilanzfehlers und die primärstatistische Bewertung des aggregierten Datenbestandes anhand von entsprechenden Maßzahlen. Außerdem mussten alle verwendeten Aufschlüsse anhand ihrer Stammdaten den für die Regionalisierung verwendeten flächenhaften Zusatzinformationen (s. Kap. 3) zugeordnet werden.

Als untere Grenze des Bezugsniveaus „oberflächennahes Grundwasser" wurde eine Grenze von 50 Meter unter Gelände festgelegt, so dass alle digital zur Verfügung stehenden Analysen von Messstellen, deren Filterausbau darunter liegen, im Zuge der Datenvorprüfung von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen wurden. **Tabelle 2.1** dokumentiert die Anzahl der in den fünf Ländern für die geostatistischen Berechnungen im Ergebnis aller Vorbereitungsarbeiten vorhandenen Messwerte, **Bild 2.1** zeigt die regionale Verteilung der Grundwasseraufschlüsse innerhalb der Länder sowie der drei hydrogeologischen Großeinheiten des Locker-, des Deck- und des Grundgebirgsbereiches, in denen oftmals geogen sehr unterschiedliche Konzentrationen auftreten können.

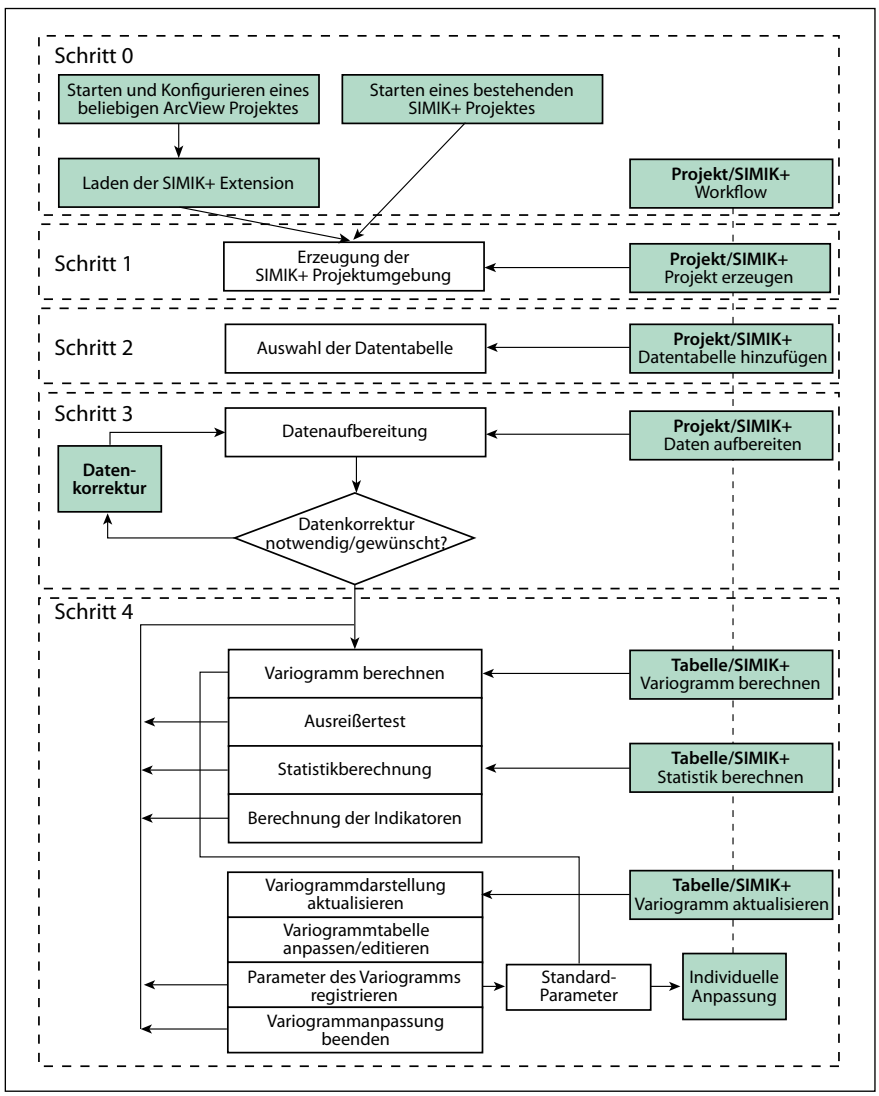

Bild 3.1: SIMIK-interne Verfahrensschritte (aus: FRAUNHOFER 2003)

2.3. Länderspezifische Informationen

In Mecklenburg-Vorpommern wurde nach einer erstmaligen Berechnung der flächenhaften Konzentrationen auf der Grundlage von Altdaten der hydrogeologischen Erkundungen [7] eine zweite Berechnung ausschließlich auf Basis aktueller Konzentrationen aus dem Zeitraum von 2001 bis 2007 für die fünf in Kap. 2.1 genannten sowie vier weitere Stoffe durchgeführt [8]. Die für die Bewertung relevanten Grundwasserleiter werden komplett durch Lockergesteine aufgebaut. Die von der einheitlichen Bohrungsdatenbank des Landesamtes übernommene Datenbasis (s. **Tabelle 3.1**) besteht etwa zu gleichen Teilen aus Messstellen des Landesmessnetzes, aus ergänzenden Messstellen (Vorfelduntersuchungen von Altlasten, Lagerstättenüberwachung) sowie aus Anlagen der zentralen und dezentralen Wasserversorgung (Hausbrunnen). Ergänzend wurden zur Stützung des Berechnungsergebnisses in den Randbereichen Daten benachbarter Länder in die Berechnung einbezogen.

In Brandenburg wurden die Berechnungen im Zusammenhang mit der Erarbeitung des im fünfjährigen Rhythmus erarbeiteten Grundwasserbeschaffenheitsberichtes [9] durchgeführt. Die digital verfügbare Datenbasis bestand hier zum Zeitpunkt der Berechnung im Jahr 2006 lediglich aus Daten des Landesmessnetzes und der im Aufbau befindlichen Datenbank mit Messwerten von Wasserversorgungsunternehmen. Der Zeitraum der Messwerte reichte von 1990 bis 2005. Im Ergebnis der Datenaufbereitung ergibt sich im Vergleich mit den anderen Ländern eine etwas geringere Informationsdichte im Verhältnis zur Landesgröße (s. **Tab. 3.1**). Bei der Interpretation der geostatistisch ermittelten Konzentrationen ist zu berücksichtigen, dass keine Daten aus dem Monitoring der Bergbauunternehmen einbezogen werden konnten. Die Untersuchungsdaten lagen erst deutlich nach der Kartenerarbeitung vor. Wegen der fehlenden Datengrundlage wurde das

Braunkohlenbergbaugebiet Brandenburgs in den parameterbezogenen Karten schraffiert. Inzwischen vorliegende wichtige Informationen zur regionalen stofflichen Situation wurden in den Textteil aufgenommen..

In Berlin konnten sowohl Daten der Messnetze des Landes und der Berliner Wasserbetriebe als auch altlastbezogene Daten und Informationen aus Bohrprogrammen zur Erkundung der Wasserversorgung aus dem Zeitraum von 1990 bis 2002 in die Berechnungen integriert werden [10]. Durch die große Datenfülle stand hier die höchste Informationsdichte mit etwa 1 Messwert pro km^2 zur Verfügung (s. **Tabelle 3.1**). Für Nitrat wurde keine Berechnung durchgeführt, da dieser Stoff im zumeist reduzierten Grundwasser des Ballungsraumes nicht in relevanten Konzentrationen vorkommt.

In Sachsen-Anhalt zirkuliert das oberflächennahe Grundwasser sowohl im Locker- als auch im Festgestein. Aus dem Festgesteinsbereich standen sehr viele Messwerte zur Verfügung, da diese Gebiete auf Grund der Siedlungsstruktur wasserwirtschaftlich intensiv genutzt werden. Auch in der Umgebung der großen Braunkohletagebaue existieren viele Informationen. In die Datenbasis wurden etwa zu gleichen Anteilen Messwerte der landesweiten Messnetze als auch Daten aus der Bohrungsdatenbank des Landesamtes für Geologie und Bergwesen integriert [11]. Ergänzend wurden Daten von Quellen, Stollen, Brunnen und altlastbezogene Informationen genutzt. Die Zeitspanne der Daten reichte im Wesentlichen von 1992 bis 2004.

Auch in Sachsen wurden Analysen sowohl aus dem Locker- als auch aus dem Festgesteinsbereich verwendet [12]. Die Daten entstammen dem Zeitraum von 1990 bis 2006. Parallel durchgeführte Berechnungen auf Basis ausschließlich von Werten eines nur zweijährigen Zeitraumes (2005/2006) zeigten auf Grund der deutlich reduzierten Datenbasis zwar vergleichbare, jedoch geostatistisch deutlich weniger signifikante Ergebnisse. Die Messwerte wurden der einheitlichen Bohrungsdatenbank des Landes entnommen und entstammen zu etwa gleichen Teilen den o. g. unterschiedlichen Herkunftsarten. Im Grundgebirgsbereich des Erzgebirges ist die Datendichte auf Grund des hydrogeologischen Erkundungsgrades deutlich geringer und besteht hier oft aus Quellen und Stollen.

Tab. 3.1 | Angaben zu in zwei Ländern verwendeten geostatistischen Parametern im Programm SIMIK+

Variogramm	Einheit	Kalium	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Ammonium
Sachsen-Anhalt						
Nugget – Sill (Höhe)	mg^2/l^2	0,544	43	34	230,911	2,45093
Sill (Höhe) – Gesamt	m	1.689,79	210.685	926.425	1.300,38	3,81285
Range (sphärisch)	m	17.000	12.050	7.000	35.000	10.000
Lag (sampling intervall)	m	2.000	2.000	3.000	6.000	5.000
Reichweite	m	50.000	40.000	90.000	90.000	50.000
Mecklenburg-Vorpommern						
Nugget – Sill (Höhe)	mg^2/l^2	3,21	974	156,43	53,41	0,23
Sill (Höhe) – Gesamt	m	126,00	544	7.596,4	1324	1,22
Range (sphärisch)	m	8.700	4.750	6.300	4.800	4.400
Lag (sampling intervall)	m	2.000	2.000	1.600	1.400	1.600
Reichweite	m	50.000	50.000	50.000	30.000	30.000

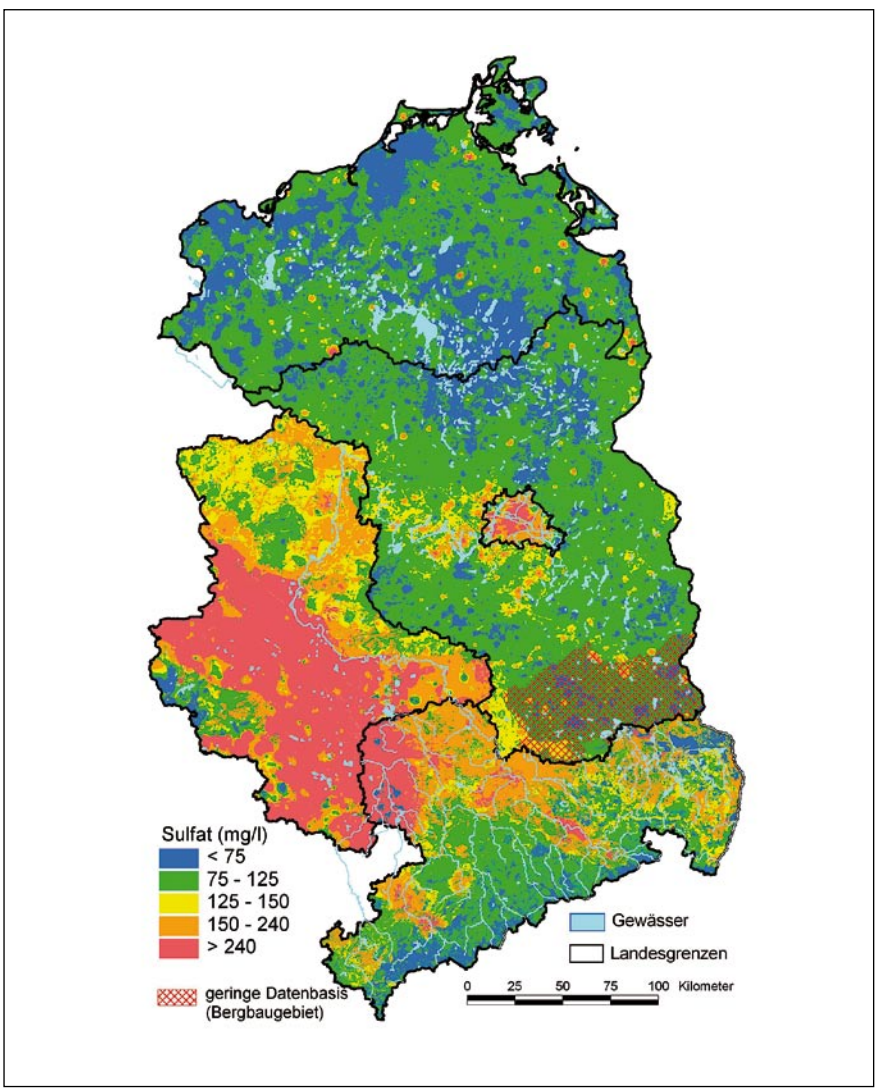

Bild 4.1: Ergebnis der flächenhaften Berechnung der Sulfatkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser

Tab. 3.2 | Angaben zu den länderübergreifenden Konzentrationsklassen pro Parameter (alle Angaben in mg/l)

Parameter	Chlorid	Sulfat	Ammonium	Nitrat
	< 40	< 75	< 0,30	<10
	40 – 80	75 – 125	0,30 – 0,50	10 – 15
	80 – 120	125 - 150	0,50 – 0,75	15 – 25
	120 – 250	150 – 24	0,75 – 1,0	25 – 50
	> 250	> 240	> 1,0	> 50

3. Geostatistische Berechnung

Die „Regionalisierung" ist die Übertragung der, punktbezogen an den Grundwasseraufschlüssen vorliegenden, Messwerte in die Fläche der Grundwasserkörper bzw. der Länder. Hier wurde das Verfahren „SIMIK+" (Simple Updating and Indicator Kriging based on additional Information) genutzt, das in Baden-Württemberg entwickelt wurde [13]. Es ist eine Erweiterung des GIS ArcView in der Version 3.x und setzt die Erweiterung „Spatial Analyst" voraus.

Das Programm nutzt eine Methode, die zusätzlich zu den punktbezogenen Daten zwei ausgewählte Flächeninformationen in den Regionalisierungsprozess einbeziehen kann und so plausiblere Ergebnisse liefert. Diese werden zur Schätzung der Werte an nicht untersuchten Orten herangezogen. SUK kann diese qualitativen Informationen in klassierter Form nutzen und damit plausiblere Schätzergebnisse liefern als standardmäßig eingesetzte Kriging-Methoden. **Bild 3.1** dokumentiert die Verfahrensschritte. Zur detaillierten Arbeitsweise des SIMIK+-Verfahrens sei auf das Benutzerhandbuch [14] verwiesen, das die inhaltliche und rechentechnische Vorgehensweise dokumentiert.

Als flächenhafte Zusatzinformationen wurden bei allen durchgeführten Berechnungen Daten zur Landnutzung und zur Hydrogeologie verwendet, da beiden ein signifikanter Einfluss auf die Formierung der hydrochemischen Konzentrationen im oberflächennahen Grundwasser zugesprochen werden kann. Für die Landnutzung wurde der Corine Landcover-Datensatz in der Fassung von 2005 verwendet und zu den Hauptnutzungsarten aggregiert (Wald, Acker, Grünland, Siedlung, Wasser). Zusätzlich wurden Daten der „HÜK 200" (Hydrogeologische Übersichtskarte im Maßstab 1:200 000) verwendet, die länderübergreifend und einheitlich von den Staatlichen Geologischen Diensten erarbeitet worden ist [15, 16]. Auch hier wurden Flächenaggregierungen vorgenommen, die länderspezifisch jeweils etwas variieren. So wurden im Festgestein mehr Einheiten als im Lockergestein verwendet, da das Fließgeschehen hier oft in kleinräumigeren Strukturen verläuft. **Tabelle 3.1** dokumentiert exemplarisch die in zwei Ländern verwendeten geostatistischen Parameter:

In der Rubrik „Range (sphärisch)" sind die Angaben zu den Reichweiten der angepassten Variogramme eingetragen. Hieraus wird ersichtlich, bis zu welchem Abstand Messwerte benachbarter Messstellen abstandsabhängig noch in die Berechnung des Gitterpunktes eingingen (bei Ammonium in Mecklenburg-Vorpommern z. B. bis 4,4 km). Die Rubrik „Reichweite" enthält darüber hinaus Angaben zu den ursprünglich im Rahmen der Variogrammanalyse berücksichtigten Reichweiten.

Nach Anwendung des SIMIK+-Verfahrens liegen die räumlich unregelmäßig vorliegenden Punktkonzentrationen in einem regelmäßigem Raster (z. B. 100 mal 100 Meter) vor. Zu den Rasterelementzellen bestehen die Informationen in Form von numerischen Werten, die beliebig in

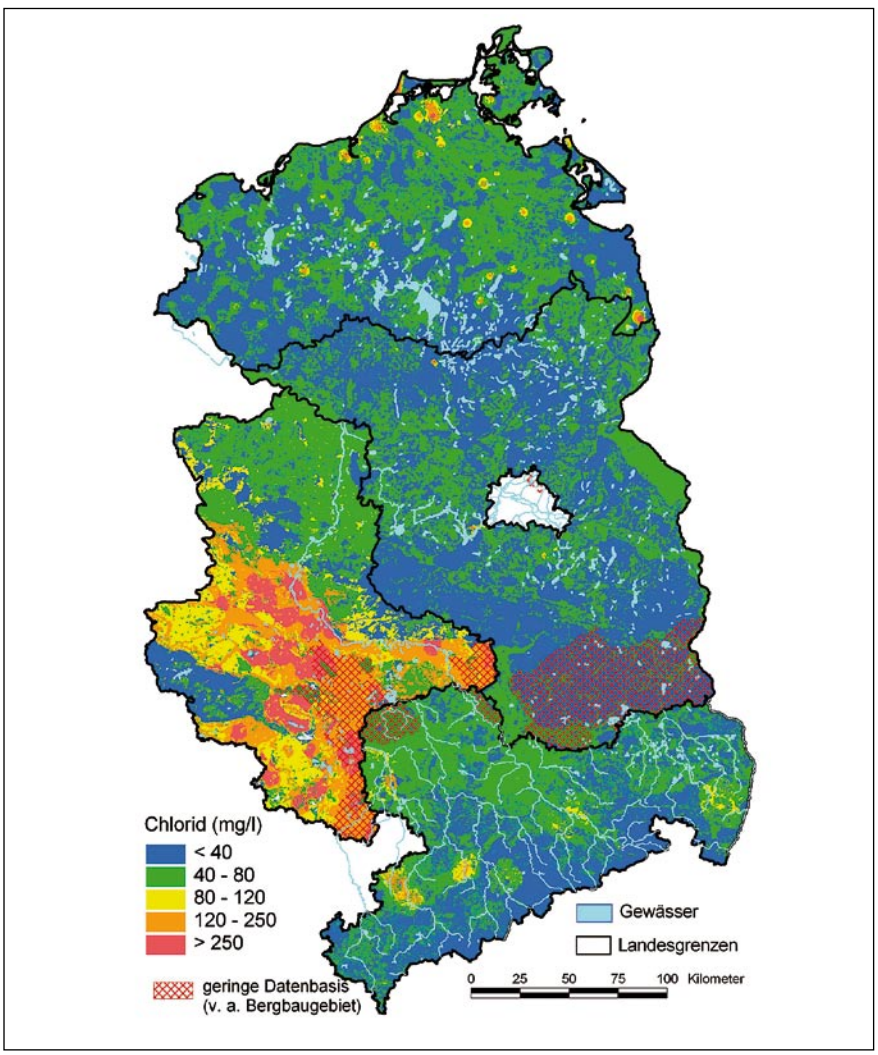

Bild 4.2: Ergebnis der flächenhaften Berechnung der Chloridkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser

weitere Rechenoperationen einbezogen werden können. Die Kartendarstellung der Ergebnisse erfolgt in klassierter Form. Standardmäßig erfolgt die Ergebnisdarstellung in SIMIK+ in Form von 11-fach klassierten Perzentilbereichen (<5 / <10 / <20 / <35 / <50 / <65 / <80 / <90 / <95 / <98 / >98-Perzentil) der berechneten Rasterdaten.

Durch diese Standardeinstellung entsteht ein relatives Erscheinungsbild unabhängig von den Absolutkonzentrationen, z. B. in Bezug auf Überschreitungen der Qualitätsnorm oder der Schwellenwerte der GWRL. Die Standardform ist digital jedoch beliebig modifizierbar, und zwar sowohl in Bezug auf die Klassengrenzen als auch die Anzahl der Klassen. Beide Aspekte wurden für die länderübergreifende Darstellung berücksichtigt. Die Anzahl der Klassen wurde zugunsten einer übersichtlicheren Darstellbarkeit mit optisch klar unterscheidbaren Farben von elf auf fünf reduziert. **Tabelle 3.2** dokumentiert die Klassengrenzen für die vier in Kap. 4 vorgestellten Parameter der GWRL sowie die Farbtöne, die in den Karten jeweils verwendet wurden.

4. Ergebnisse der flächenhaften Berechnungen

4.1. Sulfat

Bild 4.1 zeigt große regionale Unterschiede bei den berechneten Konzentrationen für Sulfat. In den Lockergesteinsgebieten dominieren Konzentrationen unterhalb von 125 mg/l, oftmals sind noch niedrigere Werte erkennbar. Das sind Bereiche, in denen die Grundwässer – z. B. im zentralen und nordwestlichen Mecklenburg-Vorpommern – unter zumeist bindiger Überdeckung (Geschiebemergel) im gespannten Zustand vorliegen und die Verweilzeiten des Wassers in der ungesättigten und gesättigten Zone lang genug für den mikrobiellen Sulfatabbau waren. In Brandenburg treten erhöhte Sulfatgehalte im mittleren Teil, insbesondere im westlichen und südlichen Umland von Berlin sowie im Südwesten auf. Die sehr hohen Konzentrationen in den Bergbaugebieten (bis 9.000 mg/l) werden in der Karte nicht wiedergegeben. Ein Sonderfall ist hier der urbane Ballungsraum von Berlin, wo im Stadtbereich zum Teil sehr hohe Konzentrationen (weit oberhalb des Schwellenwertes der GWRL) ermittelt wurden, die ihre Ursachen u. a. auch noch in lang anhaltenden Auswirkungen der Trümmerschuttverbringung nach dem 2. Weltkrieg haben. Im Umland von Berlin sind weitere Sondereffekte, wie z. B. die Rieselfelder im Süden der Stadt erkennbar.

In Sachsen-Anhalt ist die deutliche Trennung der beiden hydrogeologischen Großeinheiten des Locker- und Festgesteinsbereiches erkennbar. Im Norden dominieren Lockergesteine mit zumeist niedrigeren Konzentrationen, in der Mitte und im Süden des Landes hingegen wurden zumeist hohe bis sehr hohe Konzentrationen bis oftmals über dem Schwellenwert der GWRL ermittelt. In Niederterrassenbereichen variieren die Konzentrationen extrem stark: im östlichen Bereich des Elbtales liegen sie um die 240 mg/l, weiter im Westen bzw. Richtung Norden steigen die Werte dagegen bis auf 500 mg/l und mehr an. Auch im Süden wird der geogene Einfluss (z. B. im Muschelkalk) durch anthropogene Einflüsse überlagert. Extrem hohe Konzentrationen (z. T. mehr als 1000 mg/l) finden sich z. B. in der Umgebung der Tagebaue. Hier steigen durch die oxidativ wegen des Rohstoffabbaus induzierte Pyritoxidation, die zu einem hohen Angebot an schwefelhaltigen Verbindungen führt und im wässrigen Milieu zu Sulfat oxidiert, die Sulfatwerte an.

In Sachsen zeigen sich vergleichbare Phänome im Nordwesten in Gebieten, in denen die Grundwässer ebenfalls im hydraulischen Kontakt mit Braunkohle führenden tertiären Sedimenten stehen. Daneben sind sehr hohe Werte mit anderen Ursache-/Wirkungszusammenhängen erkennbar. Dies zeigt sich z. B. im Bereich der Elbaue bei Dresden und des Randpleistozäns bzw. der Hochflächensande bei Großenhain, wo jeweils auch die Nitratwerte hoch sind und eine Kopplung der Wirkungsbeziehungen auf

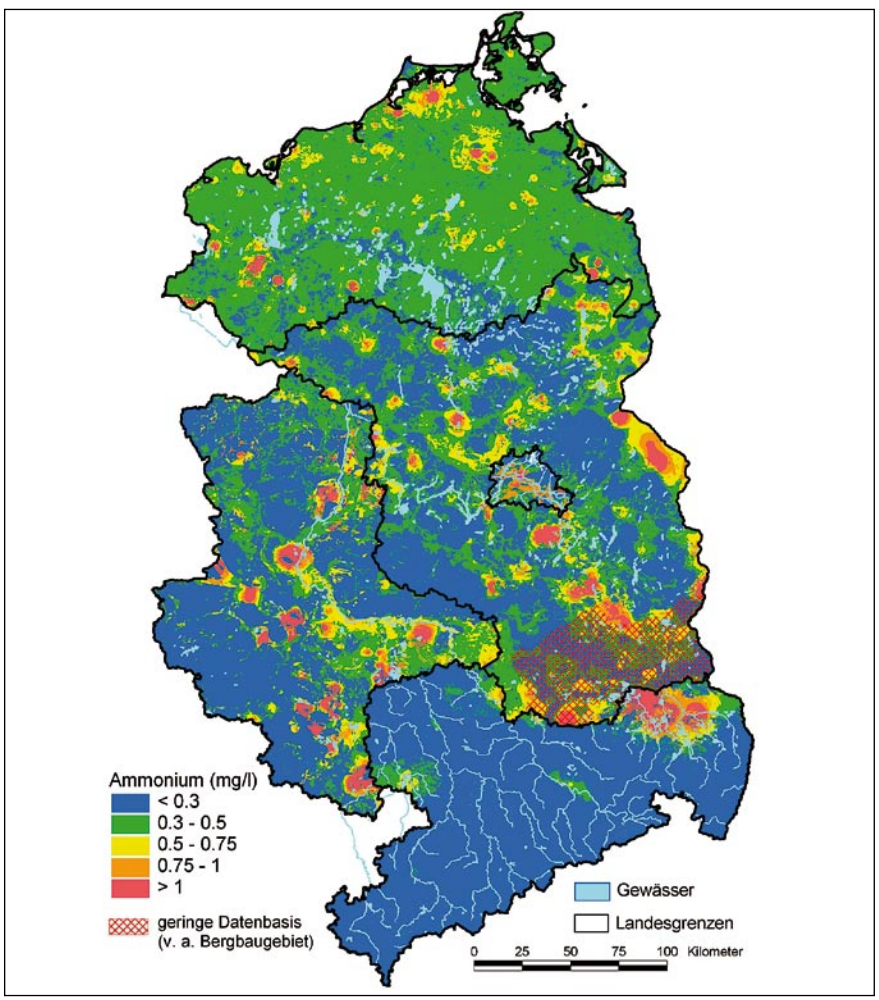

Bild 4.3: Ergebnis der flächenhaften Berechnung der Ammoniumkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser

Grund des Anstieges der Sulfatwerte durch mikrobiellen Nitratabbau zu vermuten ist. Im Grundgebirgsbereich (Erzgebirge) hingegen liegen, wie auch in Sachsen-Anhalt im Harz, die Werte niedrig.

4.2. Chlorid

Dieser Stoff zeigt in vielen Bereichen des Lockergesteins ähnliche Muster wie Sulfat mit überwiegend niedrigen Konzentrationen in allen fünf Ländern. Zu berücksichtigen ist bei der Interpretation von **Bild 4.2** jedoch, dass die Datenbasis der Messwerte oftmals im Lockergestein auch oberflächennahe Salzanomalien nicht repräsentiert, da hier zumeist keine wasserwirtschaftliche Nutzung und auch keine Messstellen vorhanden sind. In Mecklenburg-Vorpommern pausen sich lokal kleinräumige Strukturen durch, deren Ursachen jedoch im Detail sowohl in geogenen als auch anthropogenen Anomalien liegen können. In Brandenburg existiert seit einigen Jahren ein Sondermessnetz zur geogenen Grundwasserversalzung, mit dem die zeitliche Entwicklung der Salzwasserintrusionen in das süßwasserführende Stockwerk langfristig beobachtet wird [17]. Geogene Versalzungserscheinungen treten in mehreren Entlastungs- und Durchflussgebieten mit einem Schwerpunkt in Mittelbrandenburg auf. Hohe Chloridgehalte infolge anthropogener Belastungen sind die Ausnahme. In Berlin ist eine geringfügige Beeinflussung durch Siedlungseffekte erkennbar, die jedoch bei weitem nicht das Ausmaß wie bei Sulfat einnimmt.

In Sachsen-Anhalt sind hingegen deutlich andere Muster erkennbar. Außerhalb des Lockergesteinsbereiches sind die Werte oftmals deutlich erhöht, insbesondere in Niederterrassen, aber auch in den glaziflu-viatilen Sanden variieren sie bis 250 mg/l und mehr. Dies hat seinen Ursprung primär in geogen verursachten Prozessen des Aufstieges hochmineralisierter Wässer aus dem präquartären Untergrund in geologischen Ausräumungs- und tektonischen Scherzonen. Überlagert wird das von anthropogenen Einflüssen in urbanen Ballungsräumen, in denen Chlorid z. B. durch den Winterdienst oder durch Altlasten in das Grundwasser eingetragen wird.

Im Grenzbereich zwischen Sachsen-Anhalt und Sachsen sind Gebiete erkennbar, in denen die Datenbasis für die geostatistische Berechnung nicht ausreichend war und so nur mit großen Unsicherheiten interpretiert werden kann. Aus diesem Grund wurden sie mit einer gesonderten Schraffur gekennzeichnet.

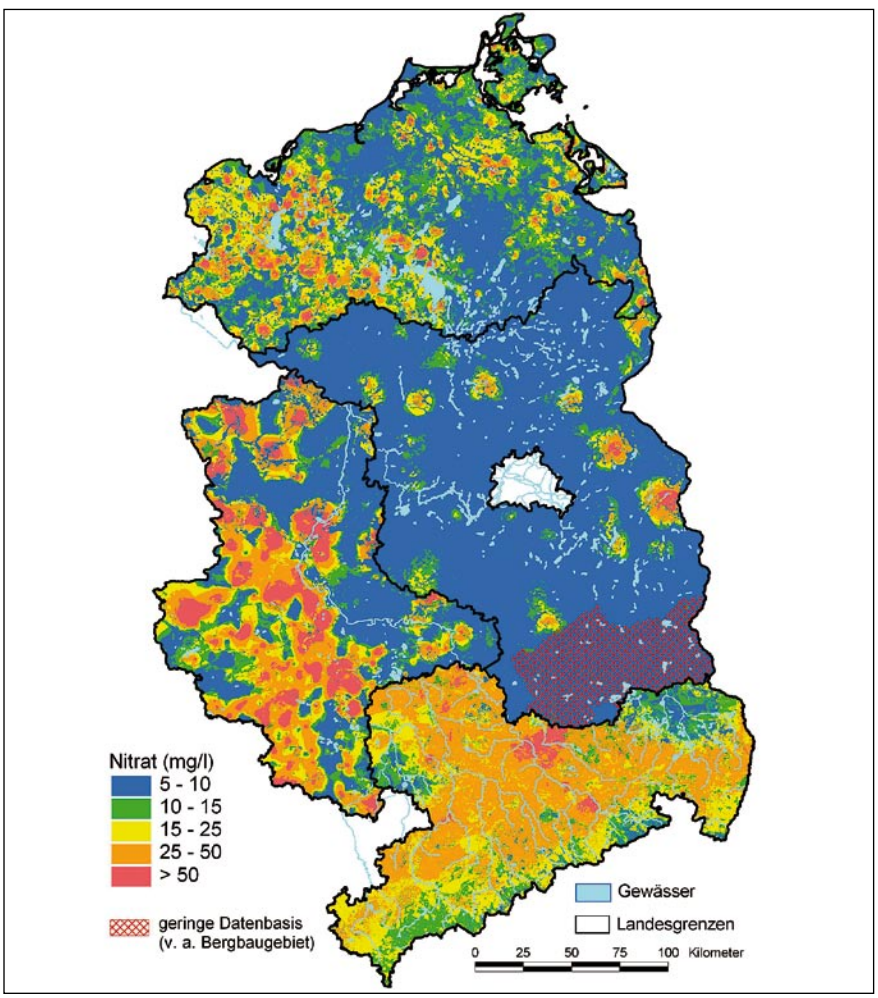

Bild 4.4: Ergebnis der flächenhaften Berechnung der Nitratkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser

4.3. Ammonium

Im Gegensatz zu Sulfat und Chlorid liegen die Werte von Ammonium (s. **Bild 4.3**) im Lockergestein höher als im Festgestein. Das liegt an den hier vorherrschenden reduzierten Milieubedingungen mit niedrigen Redoxpotenzialen bei oft annähernder Sauerstofffreiheit. Dies ist im Festgestein sehr selten, so dass im Grundwasser vorhandener Stickstoff nicht als Ammonium stabil sein kann. In Mecklenburg-Vorpommern, wo diese Verhältnisse in Gebieten mit tief liegenden und oftmals auch im hydraulischen Kontakt mit tertiären Bildungen stehenden Grundwasserleitern weit verbreitet sind, liegen die Werte daher durchschnittlich am höchsten (zwischen 0,3 und 0,5 mg/l). In Brandenburg sind die Gehalte ähnlich hoch, was auf anthropogene und geogene Ursachen zurückgeführt werden kann. Charakteristisch ist, dass hohe Konzentrationen im ganzen Bundesland ermittelt wurden. Insbesondere Niederungsgebiete, aber auch die Lausitzer Tagebaugebiete sind davon betroffen. Da die Ammoniumwerte im Ergebnis der vielfältigen hydrogeochemischen Prozesse [18] hier kleinräumigen Schwankungen (s. **Tabelle 4.2** mit niedrigen range-Werten) unterliegen, sind sie geostatistisch schwer zu bearbeiten.

In Sachsen-Anhalt sind deutlich erhöhte Werte in Terrassengebieten sowie in der Mitte und im Süden des Landes erkennbar, die durch tertiäre Bildungen aufgebaut sind. Hier liegen auch die Hintergrundgehalte höher als der Schwellenwert der GWRL (Hannappel et al. 2008). Besonders hohe Konzentrationen (> 1,0 mg/l) treten primär im Umfeld punktueller Eintragsquellen (z. B. um Magdeburg) auf. Auch in Sachsen liegen erhöhte Konzentrationen fast ausschließlich im Lockerge-

stein. Es sind überwiegend Talbereiche (Elbtal, Partheaue), wo oftmals geringdurchlässige Auensedimente das Grundwasser überlagern, während in den besser belüfteten Hochflächensanden die Konzentrationen geringer sind.

4.4. Nitrat

Die Ergebnisse der Berechnung für Nitrat (s. **Bild 4.4**) dokumentieren die methodischen Grenzen der Anwendbarkeit des geostatistischen Verfahrens. Deutlich erkennbar sind große Unterschiede zwischen den Ländern, die klar auf die zum Teil sehr unterschiedliche Datenbasis hinweisen. Bei dem sehr stark durch kleinräumige Wechsel im hydrochemischen Milieu (Redoxpotential) geprägten Stoff wirkt sich die räumlich sehr inhomogene Messstellenbelegung deutlich auf das Ergebnis aus. Dennoch zeigen sich zumeist plausible Konzentrationen mit überwiegend sehr niedrigen Konzentrationen im flächenhaften Lockergestein. Das trifft vor allem auf die großen Niederungsgebiete (Urstromtäler) zu, in denen zugleich die Ammoniumgehalte hoch liegen. Der umgekehrte Fall ist auch erkennbar, z. B. im Bereich von relativ gut belüfteten Hochflächensanden im Nordwesten, in der Altmark und vor allem im Norden von Sachsen.

Besonders hohe Konzentrationen (> 50 mg/l) treten vor allem in Sachsen-Anhalt in primär landwirtschaftlich genutzten Grundwasserkörpern auf. Dies trifft auch auf Brandenburg zu, insbesondere auf die Neubildungsgebiete mit sauerstoffhaltigen Grundwasserleitern, aber auch auf die ehemaligen Rieselfelder. Niedrigere Werte zeigen sich im Festgestein z. B. im vorwiegend forstlich genutzten Erzgebirge. Ebenfalls so gut wie nitratfrei sind die Grundwasserkörper in der Umgebung der Braunkohletagebaue im Südraum von Leipzig bzw. in der Lausitz.

5. Ausblick

Die Ermittlung der flächenhaften Konzentrationen für die in der GWRL aufgeführten Stoffe mit geostatistischen Mitteln geschah in den fünf Ländern mit der Absicht, ein effektives und in der Praxis bereits in anderen Ländern bewährtes Werkzeug zur Regionalisierung von Grundwasserbeschaffenheitsdaten, also zur Übertragung von Punkt- in Flächeninformationen einzusetzen. Diese Absicht wurde erfolgreich und mit überwiegend plausiblen Ergebnissen umgesetzt, es zeigte sich aber zugleich die große Abhängigkeit des Werkzeuges von der digital zur Verfügung stehenden Datenbasis der Messwerte. Zu empfehlen ist eine Wiederholung der Berechnungen, wenn umfangreiche Datenbestände vorliegen.

Die Ergebnisse der Regionalisierung wurden in den Ländern dazu genutzt, den chemischen Zustand der Grundwasserkörper anhand des Vergleichs mit den Qualitätsnormen und Schwellenwerten der GWRL und eines länderübergreifend abgestimmten Verfahrens zu ermitteln oder mit den zum Teil bereits vorhandenen Ergebnissen der Zustandsbestimmung zu vergleichen. Auch dieses Vorgehen hat sich bewährt und kann als sehr effektiv bezeichnet werden. Außerdem trägt es dazu bei, dass die Ergebnisse der vorgenommenen Zustandsbewertung untereinander vergleichbar, nachvollziehbar und jederzeit, mit neuen digitalen Datengrundlagen, reproduzierbar sind.

Autoren

Dr. Stephan Hannappel
HYDOR Consult GmbH, Am Borsigturm 40, 13507 Berlin, E-Mail: hannappel@hydor.de

Dipl. Chem. Gabriele Lemke
Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Goldberger Straße 12, 18 273 Güstrow

Dipl. Ing. Michael Wagner
Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, Brückenstraße 6, 10179 Berlin
Dipl. Ing. Jörg Kunze, Landesumweltamt Brandenburg, Seeburger Chaussee 2, 14476 Potsdam/OT Groß Glienicke

Dipl. Ing. (FH) Eike Barthel
Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft, Willi-Brundert-Strasse 14, 06132 Halle (Saale

Dr. Peter Börke
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, PF 80 01 32, 01101 Dresden

Literatur

[1] EG (2006): Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung. – 2006/118/EG, Gemeinsamer Entwurf nach Billigung durch den Vermittlungsausschuss des Artikels 251 Absatz 4 EG-Vertrag vom 12.12.2008, Brüssel

[2] LAWA (2008): Fachliche Umsetzung der Richtlinie zum Schutz des Grundwasser vor Verschmutzung und Verschlechterung (2006/118/EG), Sachstandsbericht des Unterausschusses „Fachliche Umsetzung der Grundwassertochterrichtlinie v. 31.01.2008 (unveröff.)

[3] LfUG (2008): Chemischer Grundwasserkörperzustand Nitrat. – Übersichtskarte, online unter: http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/documents/Nitrat_2008.pdf

[4] LAWA (2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. – Hrsg: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Bonn

[5] Schenk, R., Böhme, M. & L. Keppner (2009): Das Geringfügigkeitsschwellenkonzept für das Grundwasser. – Wasser und Abfall, Heft 3, 11. Jahrgang, S. 35-38, Wiesbaden.

[6] Voigt, H.-J. (1990): Hydrogeochemie. – Springer Verlag, Berlin

[7] Kollatsch, R.-A., Küchler, A., Schwerdtfeger, B., Stölken, B. & S. Hannappel (2006): Regionalisierung diffuser stofflicher Grundwasserbelastungen in Mecklenburg-Vorpommern. – Wasser & Abfall, 3/06, Hildesheim

[8] LUNG (2008): Aktualisierung der Regionalisierung von stofflichen Grundwasserbelastungen in Mecklenburg-Vorpommern und Ableitung eines belastungsorientierten Grundwasserkörperzuschnitts. – Bericht der HYDOR Consult GmbH an das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow (unveröff.)

[9] LUA (2007): Bericht zur Grundwasserbeschaffenheit 2001 – 2005 des Landes Brandenburg.- Hrsg.: Landesumweltamt Brandenburg, Studien und Tagungsberichte, Band 55, ISSN 0948 0838, Potsdam

[10] Hannappel, S., Asbrand, M. & M. Wagner (2004): Hydrochemische Charakterisierung des Grundwassers in Berlin. – In: Hydrogeologie regionaler Aquifersysteme, Schriftenreihe der Dt. Geol. Ges., Heft 32, Hannover

[11] Hannappel, S., Heer, S. & E. Barthel (2008): Regionalisierung hydrogeochemischer Parameter der diffus wirksamen Belastung und Ableitung von Schwellenwerten für das Grundwasser Sachsen-Anhalts. – In: Grundwasserressourcen, Schriftenreihe der Dt. Ges. für Geow. Heft 57 (Hrsg.: M. Sauter et al.), Hannover

[12] Kuhn, K., Hannappel, S. & B. Gabriel (2007): Grundwassermonitoring gemäß WRRL in Sachsen unter Nutzung von Beschaffenheitsmustern.- Wasser & Abfall, Heft 1/07, Wiesbaden

[13] Bárdossy, A., Giese, H., Grimm-Strele, J. & K.-P. Barufke (2003): SIMIK+ – GIS – implementierte Interpolation von Grundwasserparametern mit Hilfe von Landnutzungs- und Geologiedaten. – HW – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 47, H. 1, S. 13 – 20, 2003

[14] FRAUNHOFER (2003): Benutzerhandbuch SIMIK+ ArcView-Erweiterung zur flächenhaften Darstellung der Grundwasserbeschaffenheit. – Hrsg.: Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung

[15] Dörhöfer, G., Hannappel, S. & H.-J. Voigt (2001): Die Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland 1 : 200 000 (HÜK 200) . – Zeitschrift für Angewandte Geologie, Bd. 47, H. 3+4, Hannover

[16] Clos, P., Boehme, J. & U. Philipp (2008) : Hydrogeologische Übersichtskarte 1 : 200 000 von Deutschland, Oberer Grundwasserleiter. – In: Grundwasserressourcen, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften Heft 57 (Hrsg.: M. Sauter et al.), ISBN 978-3-510-49204-6, Hannover

[17] HYDOR (2009): Auswertung und Fortschreibung der Konzeption des Messnetzes „Geogene Grundwasserversalzung" in Brandenburg.- Bericht der HYDOR Consult GmbH an das Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg, Potsdam (unveröff.)

[18] Merten, O. (2003): Versauerungserscheinungen in quartären Lockergesteinsgrundwasserleitern unter besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Stoffeinträge. – Diss. BTU Cottbus, Hrsg.: Landesumweltamt Brandenburg, Studien und Tagungsberichte, Band 45, Potsdam