

Ber. d. Reinh.-Tüxen-Ges. 23, 90-102. Hannover 2011

Boden und Grundwasserinteraktionen Landschaftsentwicklung und ihre Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft

- Dr. Carsten Hansen, Mülheim/Ruhr -

Abstract

Most of the aquifers used for drinking water supply in north-western Germany are located in the Geest, a slightly raised and undulating landscape of glacial deposits of Pleistocene age. Syn- and postsedimentary formation of reductive phases (pyrite, solid organic carbon) in the aquifers during last 100,000s of years generated long lasting reducing redox conditions. Increasing nitrate input due to excessive application of fertilizers and manure causes an ongoing redox conversion of shallow aquifers and a decrease of their reductive capacity. Nitrate pollution of groundwater resources is an increasing problem and displays a major threat to drinking water supply. Ensuring future drinking water supply requires a sustainable management of water resources regarding both, quantity and quality. Hydrogeochemical modeling (PhreeqC) has been applied to retrace long term trends in raw water quality. For pre-defined scenarios of nitrate input long-term forecasts of raw water quality are calculated. Thus, this type of model is an appropriate tool to test the efficiency of agricultural measures on raw water quality development under consideration of an ongoing depletion of reductive potentials.

1. Einleitung

Über 70 % des für die Trinkwasserversorgung in Deutschland benötigten Wassers stammt aus Grundwasserreservoirien. Hierbei handelt es sich häufig um oberflächennahe Grundwasserleiter innerhalb quartärzeitlich abgelagerter Sedimentserien, deren geohydraulische und hydrogeochemische Eigenschaften von den Sedimentationsbedingungen geprägt wurden. Eine fundierte Kenntnis der Landschaftsentwicklung kann wichtige Hinweise zu einem verbesserten Verständnis der hydrodynamischen und hydrogeochemischen Prozesse in wasserwirtschaftlich genutzten Grundwasserreservoirien liefern.

Das nordwestdeutsche Tiefland kann in drei natürliche Großlandschaften unterteilt werden (POTT 1999): (1) das Küstenland mit den Inseln, Watten und Marschen, (2) die Geest (das Altmoränengebiet) sowie (3) die ausgedehnten Moorgebiete. Die Geest nimmt als ein 100 bis 170 km breiter Gürtel zwischen der Lössgrenze im Süden und dem sich anschließenden Berg- und Hügelland sowie den Marschen im Norden den größten Teil des nordwestdeutschen Tieflandes ein. Innerhalb des Geestgürtels befindet sich die überwiegende Mehrzahl der Wasserschutzgebiete Nordwestdeutschlands.

Die Geestlandschaften sind überwiegend aus elster- und saalekaltzeitlich abgelagerten, glazigenen Sedimenten aufgebaut, die den Formenschatz der glazialen Serie widerspiegeln. Der glaziale Formenschatz und die eng mit der Klimaentwicklung verbundene Vegetationsentwicklung prägten dabei die Bildungsbedingungen und damit auch die hydraulischen und hydrogeochemischen Eigenschaften der Sedimentkörper, die später als Grundwasserleiter

einer wasserwirtschaftlichen Nutzung dienen (Abb. 1). Hydraulisch gut durchlässige glaziofluviatile Sande und Kiese (Sander, Oser) bilden heute ergiebige Grundwasserleiter. Ton- und schluffreiche Grundmoränen und glaziolimnische Ablagerungen sind dagegen nur sehr gering durchlässig und wirken als Grundwasserhemmer oder -Nichtleiter, die zu einer stockwerkartigen Trennung von Grundwasserkörpern führen können. Lokal und regional können meist

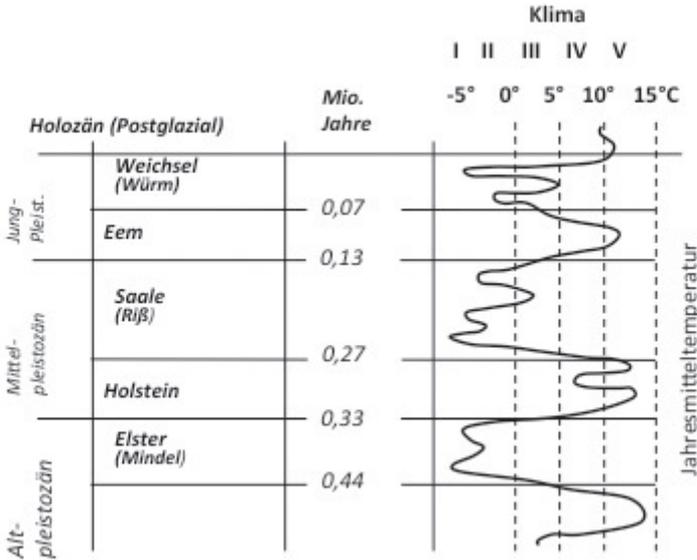


Abb. 1: Stratigraphische Übersicht, Jahresmitteltemperaturen und Vegetationsentwicklung in Nordwestdeutschland. Die römischen Zahlen bedeuten: I: Frostschuttundra, II: Strauchtundra, III: Birken-Kiefernwald, IV kühl-gemäßigte Waldvegetation, V: warm-gemäßigte Waldvegetation; zusammengestellt (aus FRAEDRICH 1996 und POTT 1999).

geringmächtige Interglazialsedimente aus der Holstein- und der Eem-Warmzeit eingeschaltet sein. Die elster- und saalezeitlichen Ablagerungen werden von weichselzeitlich entstandenen, periglaziären fluviatilen und äolischen Sedimenten überlagert. Wie auch in den vorherigen Interglazialen bewirkten im Holozän zunehmende Niederschläge die Vernässung weiter Gebiete, in deren Folge es zu Moorbildungen und zur Bildung von Auensedimenten in den Flusstälern kam (EHLERS 1994, MEYER 1998).

2. Hydrogeochemische Entwicklung der Grundwasserleiter

2.1 Überlegungen zum ursprünglichen Zustand und zur prähistorischen Entwicklung

Die chemische und mineralogische Zusammensetzung des Feststoffgerüsts der Grundwasserleiter in Nordwestdeutschland wird durch das von den nordischen Inlandgletschern aufgenommene, transportierte und abschließend glaziofluviatil abgelagerte Material bestimmt. Die Sande und Kiese bestehen nahezu ausschließlich aus Quarz und Feldspäten, untergeordnet finden sich u.a. Schichtsilikate, Eisen- und Manganoxide aber auch Eisendisulfide (Pyrit) und organisch gebundener Kohlenstoff.

Diese für die Entwicklung des Redoxmilieus relevanten Phasen können bereits synsedimentär entstanden sein – beispielsweise bei der glazigen-glaziofluviatilen Umlagerung tertiär-

rer Braunkohlensedimente. So beschreiben KÖLLE (1982) und STREBEL et al. (1992) für die Sedimente des Fuhrberger Feldes, einem typischen elster- und saalezeitlich gebildeten und wasserwirtschaftlich intensiv genutzten Gebiet nördlich von Hannover, detritische Braunkohlenreste in Form von „kleinen lignitischen Geröllchen“. Den Gehalt des Feststoffgerüsts an organischem Kohlenstoff (C_{org}) geben diese Autoren mit ca. 0,1 bis 1,0 Gew.-% an. Ebenso enthält das Feststoffgerüst des Grundwasserleiters auch sulfidische Bestandteile, die als Pyrit-Mineralkörper [FeS_2] oder auch „als +/- amorphe Verkrustungen und Verkittungen von Mineralkörnern“ vorkommen (STREBEL et al. 1992, KÖLLE 1982).

Nach der syndimentären Ablagerung reduzierender Feststoffphasen kam es vermutlich zu einer – postsedimentären – Anreicherung von C_{org} und Pyrit in den Grundwasserleitern: Klimaverbesserungen führten zu einem Auftauen des Permafrostes, so dass es wieder zu einer Neubildung von Grundwasser und zur Etablierung einer von den Hochflächen auf die Vorfluter ausgerichteten Grundwasserzirkulation kam. Es kann angenommen werden, dass das neu gebildete Grundwasser nur geringe Konzentrationen an Sauerstoff, Nitrat und Sulfat, aber vergleichsweise hohe Konzentrationen an gelöstem organisch gebundenem Kohlenstoff (DOC: dissolved organic carbon) enthielt. Während der Durchströmung des Grundwasserleiters wurde dieser DOC teilweise an den Kornoberflächen sorptiv angelagert. Eisenoxide konnten reduktiv gelöst und das freigesetzte zweiwertige Eisen in Form von Pyrit wieder demobilisiert werden.

Im Lauf mehrerer 100.000 Jahre kam es somit zum syn- und postsedimentären Aufbau reduktiver Vorräte in den Grundwasserleitern, in denen überwiegend reduzierende Verhältnisse herrschten.

2.2 Redoxkonversion oberflächennaher Grundwasserleiter infolge intensivierter Stickstoffdüngung

In den letzten Jahrhunderten haben sich die Redoxverhältnisse in den oberflächennahen Grundwasserleitern gewandelt – zunächst nur langsam – in den letzten Jahrzehnten aber immer schneller. Die Randbedingungen, die für die Sickerwasserbeschaffenheit im Bereich der Böden prägend sind, veränderten sich zusehends. Ursachen sind beispielsweise Rodungen und der zunehmende Ackerbau, später die mit Umstellung der Biozönose verbundene forstwirtschaftliche Nutzungen der Restwälder sowie die zunehmende Regulierung der Vorflut und ansteigende Grundwasserentnahmen (KUNKEL et al. 2002). Die allgemeine Ertragssteigerung und Intensivierung der landwirtschaftlichen Flächennutzung seit Anfang der 1950er Jahre infolge zunehmender Mechanisierung, zunehmender mineralischer und organischer Düngung und Meliorationsmaßnahmen (Dränage, Flächenzusammenlegungen, Urbarmachung von Ödland, Grünlandumbruch, ...) führten zu einem erheblichen Anstieg der diffusen Stoffeinträge in die Grundwasserleiter. Auf landwirtschaftlich intensiv genutzten Flächen wurden in den letzten Jahrzehnten vor allem Stickstoffdünger zur Ertragssteigerung ausgebracht (Abb. 2). Damit gelangten erhebliche Nitratmengen in die zur Trinkwasserversorgung genutzten Grundwasserleiter. Gelöst im Sickerwasserstrom wurden und werden neben Nitrat u.a. auch Sauerstoff und Sulfat als weitere Oxidationsmittel in den Grundwasserraum eingetragen, die dann auf der Fließstrecke des Grundwassers in Reaktionskontakt mit den feststoffgebundenen Reduktionsmitteln (C_{org} und Pyrit) gelangen und zu einer Abfolge von Redoxreaktionen führen. Für das vom Stoffumsatz bedeutendste Oxidationsmittel Nitrat sind die beiden relevanten Abbaureaktionen – die chemo-organotrophe Denitrifikation durch organisch gebundenen Kohlenstoff und die chemo-lithotrophe Denitrifikation durch Pyrit in den Gleichungen 1 und 2 dargestellt:

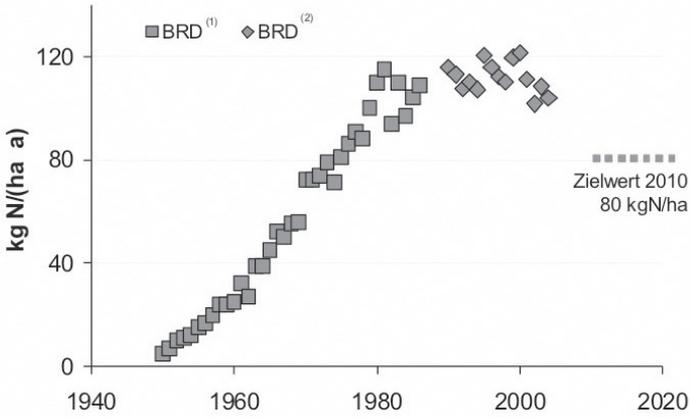
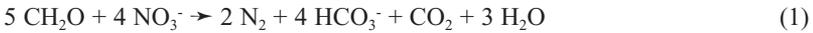


Abb. 2: Entwicklung des Flächenbilanzüberschusses für Stickstoff; Daten zusammengestellt aus: (1)KÖSTER et al. 1988, (2)UBA 2007.



Die sequenzielle Abfolge der Redoxreaktionen führt häufig zu einer hydrogeochemischen Schichtung von Grundwasserkörpern, die sich auch in einer – zum Teil sprunghaften – Abnahme des Redoxpotenzials (E_H -Wert) zeigt. Junge sauerstoff- und nitrat-haltige Grundwässer mit hohen Redoxpotenzialen werden von stärker reduzierten, sauerstoff- und nitrat-freien Grundwässern unterlagert (Abb. 3). Je nach Art und Umsatz der Denitrifikationsprozesse weisen diese Wässer höhere Konzentrationen der Reaktionsprodukte auf, beispielswei-

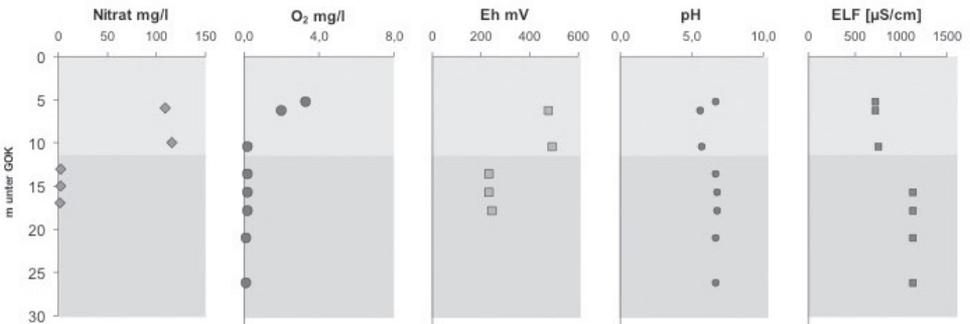


Abb. 3: Redoxzonierung eines Grundwasserleiters am Niederrhein, dargestellt für die Parameter Nitrat, Sauerstoff, EH-Wert (Redoxpotenzial), pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit (ELF). Die Bestimmung der Parameter erfolgte mittels Multi-Parameter-Sondierung in einer voll-verfilterten Grundwassermessstelle.

se höhere Hydrogenkarbonat- und Karbonatkonzentrationen oder Eisen- und Sulfatkonzentrationen. Aufgrund der Vielzahl konkurrierender, z.T. auch reaktionskinetisch gehemmter Redoxreaktionen und der daran gekoppelten Gleichgewichtsreaktionen erfordert ein mehr als qualitativ-schematisches Prozessverständnis hydrogeochemische Modellrechnungen (siehe Kapitel 3).

Der anhaltend hohe Eintrag von Oxidationsmitteln in den letzten Jahrzehnten führt zu einem sukzessiven Aufbrauch der reduktiven Vorräte im Grundwasserleiter und damit zu einem zunehmenden Verlust seines Nitratabbauvermögens. Die oxidierte Zone des Grundwasserleiters wird zu Lasten der reduzierten Zone ausgeweitet. Weisen die Grundwasserleiter einen Redoxsprung auf, so verlagert sich dieser tendenziell zur Tiefe hin. Dieses scheinbare Absinken des Sprungs beruht auf dem gegenüber der horizontalen Grundwasserströmung retardierten Durchbruch von Nitrat in Folge des fortschreitenden Verlusts des Abbauvermögens in einzelnen Stromröhren. Durch die fortlaufende Zehrung des Nitratabbauvermögens ist auch in den Rohwässern mit tendenziell steigenden Nitratkonzentrationen zu rechnen. Folgen für die wasserwirtschaftliche Ressourcennutzung können eine Außerbetriebnahme von Brunnen, die Verlagerung der Förderung in tiefere Stockwerke, höhere Aufwendungen für den Grundwasserschutz oder eine kostenintensive Nitratelimination bei der Wasseraufbereitung sein.

3. Entwicklung der Grund- und Rohwasserbeschaffenheit – Retrospektive und Prognose –

Für eine umweltökonomisch ausgerichtete Bewirtschaftung von Wassergewinnungsgebieten werden Planungs- und Prognosewerkzeuge benötigt, mit denen die Beschaffenheit der Grund- und Rohwässer vorhergesagt werden kann. Dies erfordert ein vertieftes und quantitatives Prozessverständnis. Hierzu ist es notwendig, die für die Rohwasserbeschaffenheit verantwortlichen hydrogeochemischen Prozesse zu verstehen, ihre Ursachen, Wirkungen und Entwicklungen retrospektiv nachzuvollziehen und – für eine nachhaltige Nutzung – prognostizieren zu können. Für die Identifizierung und die Quantifizierung der ablaufenden Prozesse haben sich hydrogeochemische Modellrechnungen als ein geeignetes Werkzeug herausgestellt. Erst solche Modellrechnungen und darauf aufbauende Prognosewerkzeuge erlauben es, Szenarien zur zukünftigen Entwicklung der Rohwasserqualität zu berechnen, um daraus langfristige Nutzungsstrategien abzuleiten.

3.1 Hydrogeochemische Stoffflussmodellierung

3.1.1 Hintergrund und Methodik

Mittels einer Stoffflussmodellierung werden die systemdominierenden Stoffeinträge und die resultierenden hydrogeochemischen Prozesse im Aquifer identifiziert und ihre Umsätze quantifiziert. Hydrogeochemische Stoffflussmodelle berechnen die Entwicklung der Wasserbeschaffenheit für repräsentative Fließpfade – von der Infiltration des Niederschlags in die Bodenzone über die Passage verschiedener Redoxzonen im Grundwasserleiter bis zur Mischung der Wässer im Förderbrunnen (HANSEN & VAN BERK 2004, VAN BERK & HANSEN 2006). Diese Fließpfade repräsentieren jeweils spezifische Nutzungs- bzw. Eintragsituationen und Reaktionsbedingungen im Untergrund (Abb. 4). Die Modellierung erfolgt mit dem Programm PhreeqC (PARKHURST & APPELO 1999) als Sequenz irreversibler Reaktionen und chemisch-thermodynamischer Gleichgewichtszustände zwischen der wässrigen Lösung und den gleichgewichtseinstellenden Mineral- und Gasphasen. Die Mischung der unter den verschiedenen Eintrags- und Umsetzungsbedingungen resultierenden Grundwässer repräsentiert das Rohwasser. Stoffflussmodelle sind – im Gegensatz zu reaktiven Stofftransportmodellen – weder räumlich noch zeitlich diskretisiert. Kann die Spannweite der gemessenen Rohwasserbeschaffenheit mit dem Stoffflussmodell für alle Hauptinhaltsstoffe plausibel nachvollzogen werden, so kann das Modell zu einem reaktiven Stofftransportmodell erweitert werden.

3.1.2 Anwendungsbeispiel Fuhrberger Feld

Die Wasserfassung Fuhrberg im Wassergewinnungsgebiet Fuhrberger Feld ist eine für norddeutsche Verhältnisse typische Grundwassergewinnungsanlage, in der seit 1959 aus fünf

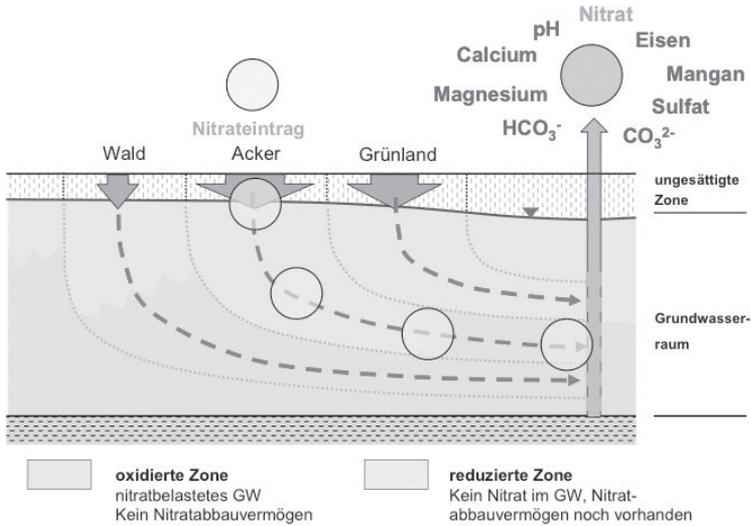


Abb. 4: Schematischer Profilschnitt durch einen Grundwasserleiter und Funktionsprinzip des hydrogeochemischen Stoffflussmodells.

Horizontalfilterbrunnen jährlich ca. 20 Mio. m³ Grundwasser für die Trinkwasserversorgung der Stadt Hannover gewonnen werden. Die Einzugsgebiete der Förderbrunnen werden nahezu ausschließlich land- und forstwirtschaftlich genutzt. Im Einzugsgebiet des Brunnens 4 wurden zwischen 1954 und 1998 im Mittel ca. 41% der Fläche als Nadelwald, 36% als Grünland und 20% als Acker genutzt. Moor- und Wasserflächen sowie Verkehrs- und Siedlungsflächen nehmen nur geringe Flächenanteile ein. Der Grundwasserleiter wird aus 20 bis 40 m mächtigen Serien aus quartären Sanden, Kiesen und zwischengelagerten Geschiebemergeln bzw. -lehmern aufgebaut, denen örtlich geringmächtige Schlufflagen zwischengelagert sind. Das Feststoffgerüst ist praktisch karbonatfrei, weist aber unterschiedlich hohe Gehalte an Eisendisulfiden (Pyrit) und abbaubaren organischen Kohlenstoffverbindungen auf (u.a. STREBEL et al. 1992, KÖLLE 1982, FRANKEN et al. 1997, FRIND et al. 1990, BÖTTCHER et al. 1989). STREBEL et al. (1992) geben die gemessenen Vorräte an mikrobiell verfügbaren sulfidischen Verbindungen (Pyrit) mit Werten zwischen 60 und mehr als 500 g S / m³ Sediment an. BÖTTCHER et al. (1989) geben Gehalte zwischen 60 und 200 g / m³ an.

Obwohl das Grundwasser lokal und zeitweise durch hohe Stickstoffeinträge aus der Landwirtschaft belastet wird, ist das geförderte Rohwasser praktisch nitratfrei, weist aber als Folge der Denitrifikation durch Oxidation von Eisendisulfiden z.T. hohe Eisen- und Sulfatgehalte auf (KÖLLE et al. 1983 und 1985, KÖLLE 2001). Während die pH-Werte im Rohwasser seit Beginn der Förderung konstant im neutralen Bereich liegen, zeigen sich insbesondere in den Sulfatkonzentrationen, aber auch in den Konzentrationssummen des anorganischen Kohlenstoffs und der Erdalkalien deutliche Konzentrationsänderungen (Abb. 5).

In der Modellierung werden alle natürlichen und anthropogen induzierten Teilprozesse, die Einfluss auf die Beschaffenheit der Rohwässer haben, identifiziert, quantifiziert, in einen Gleichgewichtsansatz überführt. Hierzu gehören u.a. die Stickstoff- und Kalkdüngung landwirtschaftlicher Flächen, die standortspezifischen CO₂-Partialdrücke in der Bodenluft, die Versauerung von Waldböden, die Denitrifikation durch Oxidation von Eisendisulfiden und die Sulfatreduktion sowie der Durchbruch nitratbelasteter Grundwässer in den Förderbrunnen. Die Grundlagen der Modellentwicklung sind in HANSEN & VAN BERK (2004) sowie in VAN BERK & HANSEN (2006) detailliert beschrieben.

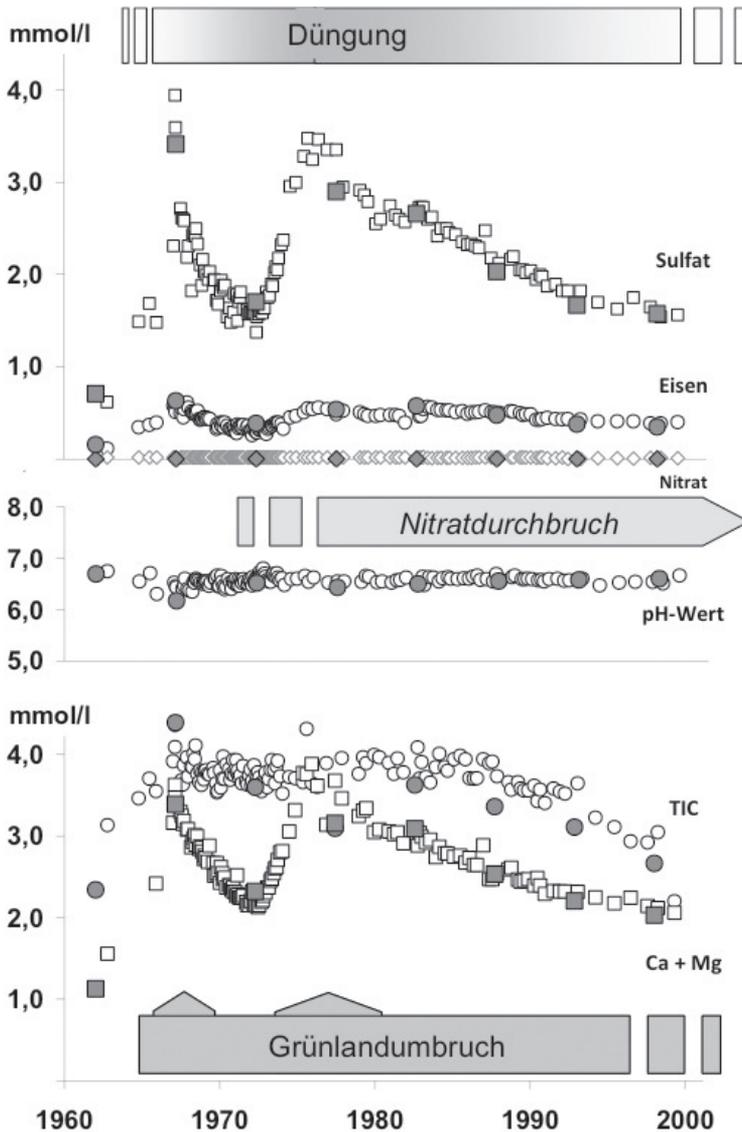


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung der Rohwasserqualität – Brunnen 4 Fuhrberger Feld: Vergleich zwischen gemessenen (nicht ausgefüllte Symbole) und berechneten Werten (grau gefüllte Symbole).

Mit dem entwickelten Stoffflussmodell werden die komplexen und sich wechselseitig beeinflussenden hydrogeochemischen Prozesse quantitativ beschrieben, die seit Beginn der Förderung für die Entwicklung der Rohwasserbeschaffenheit verantwortlich waren. Damit gelingt es, die zunehmende Komplexität des Geosystems als Folge der anthropogenen Nutzung nachzuvollziehen (Abb. 5): Zu Beginn der Förderung ist die Rohwasserbeschaffenheit durch niedrige Stickstoffeinträge aus landwirtschaftlichen Nutzflächen geprägt. Die sich anschließende Änderung der Wasserbeschaffenheit – insbesondere der starke Anstieg der Sulfatkonzentration – ist auf Stofffreisetzungen aus Grünlandumbrüchen und aus der Drainage ehemals staunässebeeinflusster Waldböden im Bereich des sich ausbildenden Absenkungs-

trichters zurückzuführen. Gleichzeitig wirkt sich auch ein Anstieg der Düngeintensität auf die Rohwasserbeschaffenheit aus. Während die Stoffausträge aus ehemals staunässebeeinflussten Nadelwaldflächen innerhalb weniger Jahre abklingen, wirken sich Grünlandumbrüche auch im weiteren Verlauf mit wechselnder Intensität auf das Rohwasser aus. Der brunnennahe Umbruch von Dauergrünlandflächen zu Ackerland führte in erheblichem Maße zu einer lokalen Abnahme der Reduktionskapazität des Sediments, so dass sauerstoff- und nitratthaltige Grundwasser seitdem bis in den Förderbrunnen durchbrechen können und dort zur Fällung von Eisen(III)-Hydroxiden („Brunnenverockerung“) führen. Die Stickstoffeinträge aus der Landwirtschaft wirkten sich bis Mitte der 1980er Jahre zunehmend stärker auf die Rohwasserbeschaffenheit aus. Die im Anschluss wieder rückläufige Auswirkung der Düngeintensität kann auf erfolgreiche Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers vor einer übermäßigen Nitratbelastung zurückgeführt werden.

3.2 Reaktive Stofftransportmodellierung

3.2.1 Hintergrund und Methodik

Um die zeitliche Entwicklung der Rohwasserqualität retrospektiv nachvollziehen und Beschaffenheitsprognosen rechnen zu können, müssen die Modelle räumlich und zeitlich diskretisiert werden. Über einen multiplen 1D-Stofftransportansatz mit PhreeqC wird das Stoffflussmodell zu einem reaktiven Stofftransportmodell erweitert, mit dem die zeitliche Entwicklung der Grund- und Rohwasserbeschaffenheit berechnet werden kann (BERGMANN et al. 2009, HANSEN et al. 2010). Entsprechend der Flächennutzung wird jede Fließzeitzone in mehrere Teilflächen untergliedert. Jeder Teilfläche wird dann eine 1D-Modellstromröhre zugeordnet, welche jeweils spezifische Nutzungs- und Eintragungssituationen sowie Reaktionsbedingungen und Verweilzeiten im Untergrund repräsentiert (Abb. 6). Jede Modellstromröhre besteht aus einer Reihe von Zellen, die unabhängig von ihrer Länge jeweils das gleiche austauschbare Porenvolumen aufweisen. Für jede Zelle werden die Gehalte an reaktiven Mineralphasen vorgegeben, die bei der Berechnung der Gleichgewichtseinstellung berücksichtigt

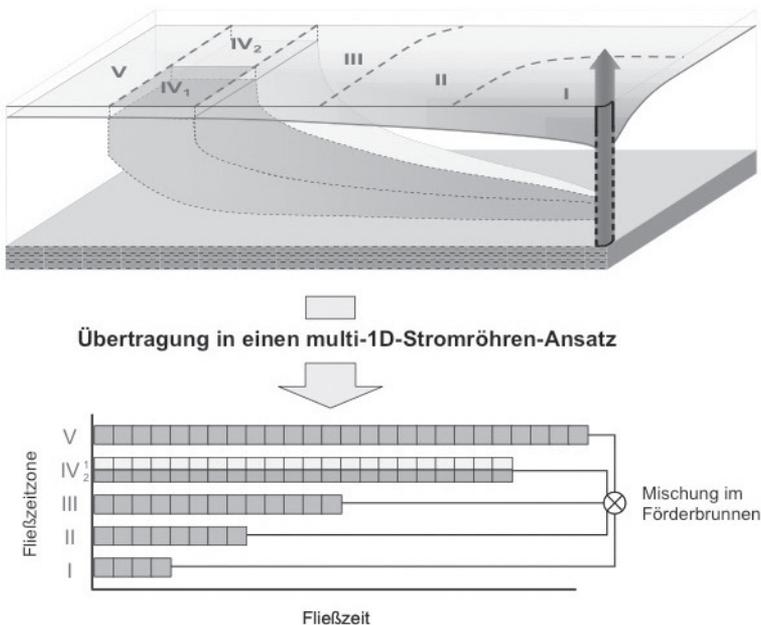


Abb. 6: Übertragung einer fließzeit-zonenbasierten Beschreibung der geohydraulischen Verhältnisse in einen Multi-1D-Stromröhren-Ansatz zur Modellierung des reaktiven Stofftransports im Grundwasserleiter und der resultierenden Entwicklung der Rohwasserbeschaffenheit.

werden. Der reaktive Stofftransport erfolgt in einer Abfolge von Schritten, bei denen sich das Wasser und die darin gelösten Stoffe entlang der Fließrichtung von Zelle zu Zelle bewegen. In jedem Zeitschritt der Transportberechnung wird das Volumen der Zellen zunächst vollständig ausgetauscht. Im Anschluss erfolgen die Berechnung kinetischer Reaktionen – beispielsweise der Umsatz von organisch gebundenem Kohlenstoff und die Einstellung der chemischen Gleichgewichte. Die resultierende Zusammensetzung der wässrigen Lösungen und der Phasenvorräte in den Zellen wird gespeichert und im nächsten Transport-Reaktionsschritt wieder aufgerufen. Auf diese Weise wird die hydrochemische Entwicklung des Sickerwassers und des Grundwassers sowie die Entwicklung der geochemischen Zusammensetzung des Feststoffgerüsts entlang der Fließstrecke berechnet.

Die über die nutzungsspezifischen Neubildungsraten und die Flächennutzungsanteile gewichtete Mischung der Grundwässer aus den jeweils letzten Zellen der Modellstromröhren zum Rohwasser wird in der Modellierung nicht verändert. Durch die Art der Diskretisierung des Modells (Taktung, Anzahl und Aufbau der Modellstromröhren) kann die Auswirkung der Überlagerung variierender Stoffeinträge in den einzelnen Fließzeitzonen auf die zeitliche Entwicklung der Rohwasserqualität berechnet werden.

Die zeitliche Entwicklung der Stoffeinträge aus der Landwirtschaft (Eintragsfunktion) kann aus vorhandenen Daten zur Grundwasserbeschaffenheit und zu den Stickstoffbilanzüberschüssen nährungsweise abgeleitet werden (Abb. 2). Schätzungen zu zeitvarianten Eingangsdaten des Modells werden im Rahmen der Modellkalibrierung angepasst. Modellentwicklung und Kalibrierung erfolgen auf der Entwicklungsebene und sind abgeschlossen, wenn die gemessene und die berechnete Entwicklung der Rohwasserbeschaffenheit hinreichend genau übereinstimmen. Zukünftige Einträge können durch den Benutzer vorgegeben werden. Hierzu wurde mit der Software NitraSim® eine Benutzeroberfläche entwickelt, mit der Eintragungsszenarien benutzerfreundlich definiert werden können (www.nitrasim.de).

3.2.2 Anwendungsbeispiel „Forstwald“

Das Wassergewinnungsgebiet Forstwald liegt wenige Kilometer südwestlich der Stadt Krefeld in der Niederrheinischen Bucht. Quartäre Terrassensande und Kiese bilden einen bis zu 37 m mächtigen, ergiebigen Porengrundwasserleiter, der von tertiären Schluffen und Feinsanden unterlagert wird. Über fünf Vertikalbrunnen werden seit Mitte der 1970er Jahre durchschnittlich 3,6 Mio. m³/a Grundwasser entnommen. Das Einzugsgebiet der Wassergewinnung weist eine Fläche von ca. 17,3 km² auf und schließt neben überwiegend landwirtschaftlich genutzten Flächen auch kleinere Forst- und Siedlungsflächen ein. Am südlichen Rand des Einzugsgebiets befindet sich ein Baggersee, aus dem es zur Infiltration von Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter kommt.

Oberflächennah ist das Grundwasser sauerstoffhaltig und weist Nitratkonzentrationen bis zu 200 mg/l auf. Im tieferen Bereich des Grundwasserleiters ist das Grundwasser sauerstoff- und nitratfrei, wobei es bis zu 10 mg/l gelöstes Eisen und bis zu 450 mg/l Hydrogenkarbonat enthält. Diese Redoxzonierung zeigt sich in durchgängig verfilterten Grundwasser-Messstellen auch häufig in Form einer sprunghaften Abnahme des Redoxpotenzials. Feststoffanalysen von Sedimentproben aus zwei Kernbohrungen zeigen, dass der oberflächennahe Bereich des Grundwasserleiters nur geringe Gehalte an organisch gebundenem Kohlenstoff (0,03 - 0,08 Gew.-%) aufweist. Unterhalb von 16 m treten mit Werten zwischen 0,02 und 0,83 Gew.-% deutlich höhere Gehalte auf. Bei den aus den fünf Einzelbrunnen geförderten Rohwässern handelt es sich jeweils um Mischwässer aus dem oxidierten und dem reduzierten Bereich des Grundwasserleiters. Im Mittel liegen die Nitratkonzentrationen im Rohwasser bei 8 mg/l, die Eisenkonzentrationen bei 5 mg/l und die Hydrogenkarbonatkonzentrationen zwischen 270 und 370 mg/l (Abb. 7). Das Rohwasser weist eine starke Tendenz zur Ausfällung von Eisenhydroxidphasen auf.

Das reaktive Stofftransportmodell besteht aus insgesamt 15 Modellstromröhren, mit denen die hydrogeochemische Entwicklung der Grundwässer von der Neubildung unter unterschiedlichen Flächennutzungsarten (Acker, Grünland, Siedlungsflächen, Wald) sowie des

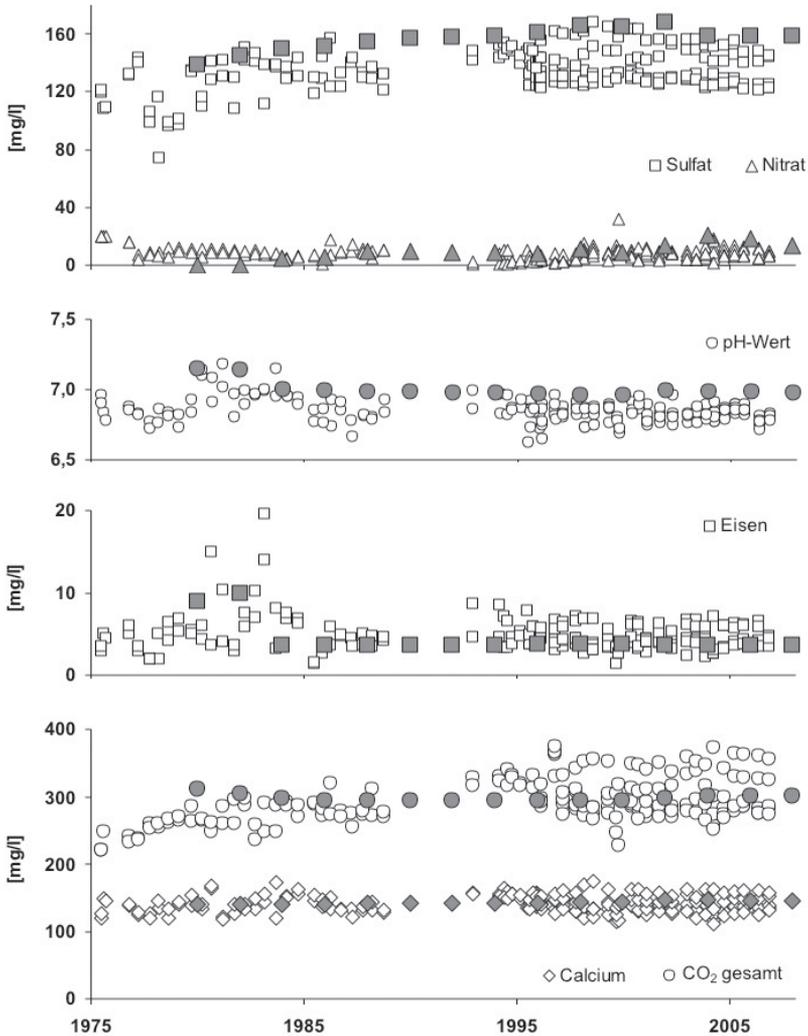


Abb. 7: Vergleich der gemessenen Entwicklung der Rohwasserbeschaffenheit mit der berechneten Entwicklung der Rohwasserbeschaffenheit (Messwerte: helle Symbole; Modellergebnisse: graue Symbole).

infiltrierenden Oberflächenwassers bis zur Mischung der Grundwässer im Förderbrunnen berechnet wird. In der Modellierung werden die fünf Förderbrunnen im Einzugsgebiet nicht getrennt betrachtet. Die Mischungsverhältnisse der Modellgrundwässer sind zeitlich konstant und wurden über die Flächenanteile und Neubildungsraten gewichtet. Für die Modellierung wird davon ausgegangen, dass die mittleren Nitratkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser unter landwirtschaftlichen Nutzflächen bei 90 mg/l, unter Siedlungsflächen bei 40 mg/l und unter Waldflächen bei 20 mg/l lagen. Entsprechend der zeitlichen Entwicklung der Stickstoffbilanzüberschüsse (Abb. 2) stiegen die Nitratkonzentrationen seit Beginn der

1950er Jahre kontinuierlich an und erreichten zwischen 1980 und 2000 ihr Maximum. Die Kalkdüngung der landwirtschaftlichen Flächen erfolgt auf Ziel-pH-Werte im Boden und Sickerwasser zwischen 5,8 und 6,3, wobei der eingesetzte Düngekalk ein mittleres Ca/Mg-Verhältnis von 7:1 aufweist.

Der beobachtete sequenzielle Abbau der eingetragenen Oxidationsmittel erfordert eine adäquate modelltechnische Umsetzung des Reaktionsumsatzes an organisch gebundenem Kohlenstoff (OC), da diese Redoxreaktionen zwar thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten folgen, aber reaktionskinetisch gehemmt sind. Hierzu wurde die chemisch-thermodynamisch basierte Berechnung der Verteilung aquatischer Spezies im Gleichgewicht mit Mineral- und Gasphasen mit einer sequenziell-multiplikativen Michaelis-Menten-Kinetik für den oxidativen Abbau feststoffgebundener organischer Kohlenstoffverbindungen gekoppelt (KÜBECK et al. 2010).

Mit dem reaktiven Stofftransportmodell wurde die Entwicklung der Rohwasserbeschaffenheit, beginnend vom Jahr 1980, über 60 Jahre bis zum Jahr 2040 berechnet. Dieser Zeitraum umfasst einen retrospektiven Abschnitt von 26 Jahren und einen Prognosezeitraum von 34 Jahren. Abb. 7 zeigt für die retrospektive Modellierung (1980 – 2006) den Abgleich zwischen modellierten und gemessenen Werten. Mit der reaktiven Stofftransportmodellierung wird eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten erzielt, wobei die berechneten Sulfatkonzentrationen und pH-Werte eher im oberen Bereich der gemessenen Entwicklung verlaufen. Alle übrigen Modellparameter verlaufen weitgehend in der Mitte der Messwertkurven. Auch zeigt sich in den modellierten Rohwässern eine Übersättigung bzw. Ausfällung an Eisenhydroxid, so dass auch die Beobachtung der „Brunnenverockerung“ mit der Modellierung nachvollzogen werden kann.

Prognosen zur Entwicklung der Rohwasserbeschaffenheit wurden für den Zeitraum 2006 - 2040 berechnet. Hierzu wurden zwei – hypothetische – Eintragsszenarien ab dem Jahr 2008 definiert. Im ersten Szenario liegen die zukünftigen Nitratkonzentrationen im neu gebildeten Grundwasser unter landwirtschaftlichen Nutzflächen konstant bei 50 mg/l, im zweiten Szenario liegen sie konstant bei 100 mg/l. Die Ergebnisse beider Modellläufe sind für die Nitrat- und Eisenkonzentrationen im Rohwasser in Abb. 8 dargestellt. Im ersten Szenario steigen die Nitratkonzentrationen zunächst an und bleiben dann bis zum Ende des Prognosezeitraums auf einem Niveau von etwa 20 mg/l. Im zweiten Modellszenario steigen die Nitratkonzentrationen zunächst nur geringfügig stärker an, erreichen aber Mitte der 2020er Jahre ein Konzentrationsniveau von ca. 30 mg/l. Im letzten Zeitschritt des Modells zeigt sich ein erneuter Anstieg der Nitratkonzentration auf über 40 mg/l. Die Eisenkonzentrationen entwickeln sich in beiden Szenarien praktisch gleich. Der Anstieg der Nitratkonzentrationen ist auf die zunehmende Erschöpfung des Nitratabbaupotenzials in einzelnen Stromröhren zurückzuführen. Höhere Einträge führen erwartungsgemäß auch zu einer schnelleren Erschöpfung des Abbaupotenzials. Die Spannbreite zwischen beiden Modellszenarien zeigt damit auf, in wie weit die zukünftige Entwicklung der Rohwasserbeschaffenheit durch Grundwasser-Schutzmaßnahmen beeinflusst werden kann.

4. Zusammenfassung

Im Lauf mehrerer 100.000 Jahre kam es zum syn- und postsedimentären Aufbau reduktiver Vorräte in den im Bereich der Geest liegenden, wasserwirtschaftlich genutzten Grundwasserleitern. Die reduktiven Vorräte liegen in Form von feststoffgebundenen Gehalten an organisch gebundenem Kohlenstoff und Pyrit vor und bewirken eine Ausbildung überwiegend reduzierender Verhältnisse in den Grundwasserleitern.

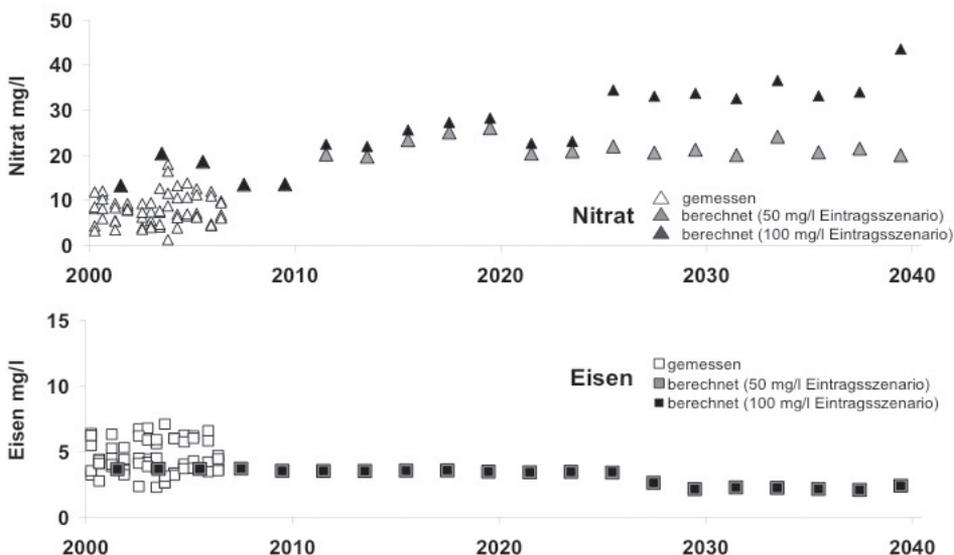


Abb. 8: Vergleich von zwei „NitraSim“-Prognoserechnungen für die Parameter Nitrat und Eisen.

Der zunehmende Eintrag von Oxidationsmitteln in den letzten Jahrzehnten – insbesondere von Nitrat in Folge einer intensivierten landwirtschaftlichen Flächennutzung – bewirkt eine fortschreitende Redoxkonversion in den oberflächennahen Grundwasserleiter. Damit einher gehen ein Abbau der reduktiven Phasen und ein zunehmender Verlust des Nitratabbauvermögens. Negative Folgen für die wasserwirtschaftliche Ressourcennutzung können eine Außerbetriebnahme von Förderbrunnen, die Verlagerung der Förderung in tiefere Stockwerke oder eine kostenintensive Nitratelimination bei der Aufbereitung sein.

Mit hydrogeochemischen Stoffflussmodellen und den darauf aufbauenden reaktiven Stofftransportmodellen können Ursache–Wirkungsbeziehungen klar identifiziert und quantifiziert sowie Aussagen über die durchschnittliche hydrogeochemische Entwicklung der Grund- und Rohwasserqualität gemacht. Auf Grundlage des damit gewonnenen Prozessverständnisses können langfristige, strategische wasserwirtschaftliche Entscheidungen getroffen und optimierte Bewirtschaftungskonzepte erarbeitet werden.

Danksagung

Die Entwicklung von NitraSim wurde innerhalb des Programms „Förderung von innovativen Netzwerken (InnoNet)“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Konsequenzen eines nachlassenden Nitratabbauvermögens werden derzeit im Rahmen eines vom DVGW und mehreren Wasserversorgern geförderten FuE-Vorhabens untersucht.

Literatur

- APPELO, C.A.J. & POSTMA, D. (1996): Geochemistry, groundwater and pollution. – 536 S., Balkema, Rotterdam.
- BERGMANN, A., HANSEN, C., SEEBODE, T., VAN BERK, W. & PODEWILS, W. (2009): Entwicklung der Nitratkonzentration im Grund- und Rohwasser - Hydrogeochemische Stoffflussmodellierung als Planungs- und Prognosewerkzeug. – 160 S. (IWW-Schriftenreihe 51), Mülheim/Ruhr.
- BÖTTCHER, J., STREBEL, O. & DUYNISVELD, W.H.M. (1989): Kinetik und Modellierung gekoppelter Stoffumsetzungen im Grundwasser eines Lockergesteins-Aquifers. – Geol. Jahrbuch C51: 3-40, Hannover.

- EHLERS, J. (1994): Allgemeine und historische Quartärgeologie. – 358 S., Enke, Stuttgart.
- FRAEDRICH, W. (1996): Spuren der Eiszeit. – 184 S., Springer, Heidelberg.
- FRANKEN, G., PUHLMANN, M., DUYNISVELD, W., H., BÖTTCHER, J. & STREBEL, O. (1997): Auswirkung saurer atmosphärischer Depositionen bei Nadelwald auf Stoffanlieferungen an das Grundwasser und Stoffumsetzungen in einem Aquifer aus basenarmen Sanden (Fallstudie Modellgebiet Fuhrberger Feld). – 272 S., Umweltbundesamt, UBA-FB 98-056 (Berlin).
- FRIND, E., DUYNISVELD, W.H.M., STREBEL, O. & BÖTTCHER, J. (1990): Modeling of Multicomponent Transport with Microbial Transformation in Groundwater: The Fuhrberg Case. – Water Resources Research, Vol. 26, No. 8, S. 1707-1719.
- HANSEN, C., BERGMANN, A., VAN BERK, W., KÜBECK, C. & KÖNIG, C. (2010): Ein Prognosewerkzeug zur Berechnung der Nitrat Ausbreitung in wasserwirtschaftlich genutzten Grundwasserleitern. (Balkema). – 140 S. (IWW-Schriftenreihe **53**), Mülheim/Ruhr.
- HANSEN, C. & VAN BERK, W. (2004): Retracing the development of raw water quality in water works applying reactive controlled material flux analyses. – Aquat. Science **66**: 60-77.
- KÖLLE, W. (1982): Auswirkungen der Nitratbelastung in einem reduzierten Grundwasserleiter. – DVGW-Schriftenreihe Wasser **31**: 109-126, Eschborn.
- KOELLE, W. (2001): Wasseranalysen – richtig beurteilt. – 357 pp., Wiley-VCH, Weinheim.
- KOELLE, W., STREBEL, O. & BOETTCHER, J. (1985): Formation of sulfate by microbial denitrification in a reducing aquifer. – Wat. Supply **3**: 35-40.
- KOELLE, W., WERNER, P., STREBEL, O. & BOETTCHER, J. (1983): Denitrifikation in einem reduzierenden Grundwasserleiter. – Vom Wasser **61**: 125-147.
- KUNKEL, R., VOIGT, H-J., WENDLAND, F. & HANNAPPEL, S. (2002): Die natürliche Grundwasserbeschaffenheit ausgewählter hydrostratigrafischer Einheiten in Deutschland. – Schriften des Forschungszentrum Jülich - Reihe Umwelt **47**, 222 S., Jülich.
- LILLICH, W., KUCKELKORN, K. & HOFMANN, W. (1973): Untersuchungen zum Grundwasserhaushalt im repräsentativen Lockergesteinsgebiet Fuhrberger Feld bei Hannover – Bilanzjahre 1967 und 1968. – Beih. Geol. Jb. **107**; 67 S.
- MEYER, K-D. (1998): Quartär zwischen Elbe und Aller/Weser. – In: FELDMANN, L. & MEYER, K-D. (Hrsg.): Quartär in Niedersachsen – Exkursionsführer zur Jubiläums-Hauptversammlung der Deutschen Quartärvereinigung. 155-205, Deuqua, Hannover.
- PARKHURST, D.L. & APPELO, C.A.J. (1999): Users Guide to PhreeqC (Version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. – U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259; Denver, Colorado.
- POTT, R. (1999): Nordwestdeutsches Tiefland zwischen Ems und Weser. – 256 S., Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- STREBEL, O., BÖTTCHER, J. & DUYNISVELD, W.H.M. (1992): Identifizierung und Quantifizierung von Stoffumsetzungen in einem Sand-Aquifer (Beispiel Fuhrberger Feld). – DVGW Schriftenreihe Wasser **73**: 55-73, Eschborn.
- STREBEL, O., DUYNISVELD, W.H.M. & BÖTTCHER, J. (1989): Nitrate pollution of Groundwater in Western Europe. – Agriculture, Ecosystems and Environments **26**: 189-214.
- VAN BERK, W. & HANSEN, C. (2006): Hydrogeochemische Stoffflussmodelle – Leitfaden zur Modellierung der Beschaffenheitsentwicklung von Grund- und Rohwässern. – 226 S., Springer, Berlin.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Carsten Hansen, IWW Zentrum Wasser, Moritzstr. 26, D-45308 Mülheim/Ruhr

e-Mail: c.hansen@iww-online.de

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft](#)

Jahr/Year: 2011

Band/Volume: [23](#)

Autor(en)/Author(s): Hansen Carsten

Artikel/Article: [Boden und Grundwasserinteraktionen Landschaftsentwicklung und ihre Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft 90-102](#)