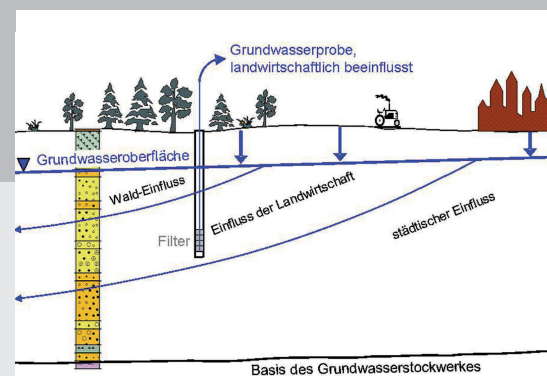


Stickstoffumsatz im Grundwasser

März 2015



BITTE BEACHTEN!

Stickstoffumsatz im Grundwasser

März 2015

Der Druckfehlerteufel hat sich eingeschlichen.

Bitte ergänzen Sie auf Seite 4, Autoren:

Herr Prof. Dr. Frank Eulenstein, ZALF, Müncheberg

Stickstoffumsatz im Grundwasser

März 2015



Herausgabe und Vertrieb:
Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
Theodor-Heuss-Allee 17 · 53773 Hennef · Deutschland
Tel.: +49 2242 872-333 · Fax: +49 2242 872-100
E-Mail: info@dwa.de · Internet: www.dwa.de

Inhaltsgleich mit DVGW-Information Wasser Nr. 85

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) setzt sich intensiv für die Entwicklung einer sicheren und nachhaltigen Wasser- und Abfallwirtschaft ein. Als politisch und wirtschaftlich unabhängige Organisation arbeitet sie fachlich auf den Gebieten Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall und Bodenschutz.

In Europa ist die DWA die mitgliederstärkste Vereinigung auf diesem Gebiet und nimmt durch ihre fachliche Kompetenz bezüglich Regelsetzung, Bildung und Information sowohl der Fachleute als auch der Öffentlichkeit eine besondere Stellung ein. Die rund 14 000 Mitglieder repräsentieren die Fachleute und Führungskräfte aus Kommunen, Hochschulen, Ingenieurbüros, Behörden und Unternehmen.

Impressum

Herausgeber und Vertrieb:

DWA Deutsche Vereinigung für
Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
Theodor-Heuss-Allee 17
53773 Hennef, Deutschland
Tel.: +49 2242 872-333
Fax: +49 2242 872-100
E-Mail: info@dwa.de
Internet: www.dwa.de

Satz:

DWA

Druck:

Siebengebirgsdruck Bad Honnef

ISBN:

978-3-88721-225-4

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier

© DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef 2015

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Digitalisierung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen werden.

Vorwort

Im Grundwasser werden aktuell immer noch hohe und teilweise noch weiter steigende Nitratkonzentrationen beobachtet. Die hohen Nitrateinträge in das Grundwasser sind im Wesentlichen das Ergebnis hoher Stickstoffüberschüsse aus der landwirtschaftlichen Flächennutzung. In Abhängigkeit von der Höhe der Grundwasserneubildung resultieren hieraus unterschiedlich hohe Nitratkonzentrationen. Diese führen in einigen Regionen Deutschlands im Grundwasser zu Überschreitungen der europaweiten Umweltqualitätsnorm sowie des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung im Rohwasser von Wasserwerken von jeweils 50 mg/l.

Ohne den in der Bodenzone und in zahlreichen Grundwasserleitern ablaufenden Nitratabbau – also die Denitrifikation – wären die Konzentrationen von Nitrat im Grund- und Rohwasser regional noch deutlich höher. Allerdings zeigen sich bereits vermehrt Anzeichen für eine Erschöpfung des natürlichen – und in der Regel nicht regenerierbaren – Nitratabbaupotenzials des Untergrunds. Für zahlreiche Wasserversorgungsunternehmen, Wasserbehörden, Verbände, Ingenieurbüros und Forschungseinrichtungen stellt sich daher die Frage, ob bzw. unter welchen Bedingungen der Nitratabbau stattfindet und wie lange die Nitratabbaukapazität noch erhalten bleibt. Fest steht: Die „Lebensdauer“ des Nitratabbaus ist endlich und belastbare Aussagen hierzu sind bisher eher Gegenstand von Forschungsprojekten als wasserwirtschaftliche Routine.

Damit Aussagen zum „Stickstoffumsatz im Grundwasser“ möglich sind, ist eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich, die die Stickstoffeinträge ebenso berücksichtigt wie den Wasserhaushalt und die hydrogeochemischen Prozesse in Grundwasserleitern. Darüber hinaus fasst der Themenband die aktuellen Kenntnisse zu Nitratabbauprozessen, zum reaktiven Stoffdepot im Grundwasserleiter und zur Abschätzung der tatsächlichen Lebensdauer des Nitratabbaus in verständlicher Form zusammen. Hierbei werden sowohl theoretische Ansätze genannt als auch reale Beispiele aufgeführt, um den Praxisbezug und die Praxisrelevanz des Themas in den Vordergrund zu stellen. Hierdurch bietet der Themenband Fachleuten verschiedener Fachdisziplinen die Möglichkeit, sich dem Thema Denitrifikation aus unterschiedlichen Blickwinkeln (z. B. Grundwasserbeschaffenheit, reaktives Material im Sediment, Labor- und Geländeuntersuchungen, hydrogeochemische Modelle) und mit unterschiedlicher Intensität zu nähern. Die beschriebenen Untersuchungen münden in einer quantitativen Abschätzung der Lebensdauer des Nitratabbaus. Diese beinhaltet eine hohe Relevanz für wasserwirtschaftliche Entscheidungen der Zukunft, ist aber auch mit diversen Unsicherheiten behaftet, deren Kenntnis eine zwingende Voraussetzung für die Einordnung von berechneten Daten zur noch verbleibenden Dauer des Nitratabbaus darstellt.

Der vorliegende Themenband wurde von einer interdisziplinär aus Geologen, Ingenieuren, Geografen und Biologen zusammengesetzten Arbeitsgruppe des DWA-Fachausschusses GB-6 „Bodennutzung und Wirkungen auf Gewässer“ in Zusammenarbeit mit dem DVGW im Zeitraum von 2009 bis 2014 erstellt.

Verfasser

Der Themenband wurde von der DWA-Arbeitsgruppe GB-6.9 „Stickstoffumsatz im Grundwasser“ im Fachausschuss „Bodennutzung und Stoffeinträge in Gewässer“ erstellt, der folgende Mitglieder angehören:

Bergmann, Axel	Dr., IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH, Mülheim an der Ruhr
CREMER, Nils	Dr., Erftverband, Bergheim (Sprecher)
HANNAPPEL, Stephan	Dr., HYDOR Consult GmbH, Berlin
HANSEN, Carsten	Dr., CONSULAQUA Hamburg Beratungsgesellschaft mbH, Hamburg
KUNKEL, Ralf	Dr., Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich
LESON, Martin	Dipl.-Geogr., FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V., Duisburg
RAUE, Werner	Dipl.-Ing. agr., Stadtwerke Hannover AG, Wedemark
SCHWARTZ, Arnold	Prof. Dr., Meckenheim
VAN STRAATEN, Lenardo	Dipl.-Geol., CONSULAQUA Hamburg Beratungsgesellschaft mbH, Hamburg
VOSS, Maren	Dr., Leibniz-Institut für Ostseeforschung, Rostock
WALTHER, Wolfgang	Prof. Dr.-Ing., TU Dresden und Hildesheim
WENDLAND, Frank	Dr., Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich
WISOTZKY, Frank	Prof. Dr., Ruhr-Universität Bochum, Bochum
WOLTER, Rüdiger	Dr., Umweltbundesamt, Dessau

Als Gäste haben mitgewirkt:

EULENSTEIN, Frank	Prof. Dr., Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Müncheberg
FANK, Johann	Dr., Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Graz, Österreich
NEUMANN, Peter	Dipl.-Geol., Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf

Projektbetreuer in der DWA-Bundesgeschäftsstelle:

BARION, Dirk	Dipl.-Geogr., Hennef Abteilung Wasser- und Abfallwirtschaft
--------------	--

Inhalt

Vorwort	.....	3
Verfasser	.....	4
Bilderverzeichnis	.....	6
Tabellenverzeichnis	.....	8
1	Anlass und Grundlageninformationen zum Stickstoff	9
1.1	Anlass	9
1.2	Stickstoffkreislauf.....	9
1.2.1	Stickstoffquellen	9
1.2.2	Stickstoffverlagerung im Untergrund	11
1.2.3	Wasserflüsse im Untergrund	13
1.2.4	Stickstofffluss im durchwurzelten Bereich des Bodens	15
1.3	Hydrogeologische Einheiten.....	17
2	Nitratkonzentrationen im Grundwasser	19
2.1	Nitratbelastung des Grundwassers in Deutschland und Europa.....	19
2.2	Situation in Wassergewinnungsgebieten	21
3	Stickstoffeinträge	22
3.1	Atmosphäre.....	22
3.2	Landnutzung	26
3.2.1	Allgemeines	26
3.2.2	Landwirtschaftliche Nutzflächen (Acker)	27
3.2.3	Dauergrünland.....	30
3.2.4	Wald	31
3.2.5	Siedlungsgebiete	31
4	Stickstoff-Umsetzungsprozesse	32
4.1	Grundlagen	32
4.2	Denitrifikation.....	33
4.2.1	Einführung.....	33
4.2.2	Chemo-organotrophe Denitrifikation	34
4.2.3	Chemo-lithotrophe Denitrifikation	34
4.2.4	Weitere Prozesse.....	35
5	Identifikation von Prozessen und Untersuchung des reaktiven Stoffdepots	36
5.1	Methodenübersicht	36
5.2	Prozessidentifikation aus vorhandenen Daten.....	37
5.2.1	Zeitreihenbetrachtungen mit Beispielen.....	37
5.2.2	Stickstoff – Massenbilanzen	43
5.3	Ergänzende Untersuchungen/Gewinnung neuer Daten.....	44
5.3.1	Untersuchung von Probenmaterial aus dem Grundwasserleiter	44
5.3.2	Versuche im Labor	47
5.3.3	Versuche im Gelände	48
5.3.4	Isotopenmethoden	50
5.4	Hydrogeochemische Modellierungen	54

6	Lebensdauer des Nitratabbaus	57
6.1	Zusammenwirken von Strömung und Nitratverlagerung.....	57
6.2	Zugang zum reaktiven Material	58
6.2.1	Reaktives Material, zu dem ein Zugang für den Nitratabbau notwendig ist.....	58
6.2.2	Hydraulische Zugänglichkeit und hydraulische Verfügbarkeit von reaktivem Material.....	59
6.2.3	Biochemischer Zugang zum reaktiven Material, Biofilm.....	60
6.3	Berechnung der Dauer des Nitratabbaus und Auswirkungen auf die Nitratverlagerung	61
6.4	Bestimmung des reaktiven Stoffanteils.....	67
6.4.1	Einleitung	67
6.4.2	Standversuche.....	68
6.4.3	Säulenversuche	72
6.4.4	Schlussfolgerungen	74
6.5	Bewertung und zusammenfassende Diskussion zum Thema „Lebensdauer“.....	74
7	Zusammenfassung	76
Literatur	.....	78
Glossar	.....	83

Bilderverzeichnis

Bild 1:	Stickstoffkreislauf, großräumig	10
Bild 2:	Hydrologische Gliederung des Untergrundes	12
Bild 3:	Visualisierung der Grundwasserströmung zwischen zwei Punkten A und B als Ergebnis eines Druckunterschieds zwischen diesen Punkten	14
Bild 4:	Stickstoffkreislauf im Boden.....	15
Bild 5:	Hydrogeologische Einheiten.....	18
Bild 6:	Chemischer Zustand des Grundwassers in Deutschland aufgrund der Nitratbelastung.....	20
Bild 7:	Überblick über die Nitratkonzentrationen im Grundwasser der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2010.....	20
Bild 8:	Karte der Gesamt-Deposition an Stickstoff über Deutschland, Ergebnis von Modellrechnungen für das Jahr 2007.....	23
Bild 9:	Atmosphärische Deposition auf eine vegetationsbedeckte Oberfläche, Anordnung der bulk-Sammler unter der „Kronentraufe“ und im „Freiland“.....	24
Bild 10:	Zusammenhang zwischen Grundwasserbeschaffenheit und Flächennutzung im Zustrom in Abhängigkeit von der Grundwasserströmungsrichtung und der Filterposition	27
Bild 11:	Dreijahresdurchschnitte des N-Überschusses sowie der N-Effizienz in Deutschland	29
Bild 12:	N-Flächenbilanzüberschuss der deutschen Landwirtschaft 2003 ohne N-Deposition, ohne Abzug NH_3 , ohne Sekundärrohstoffdünger	29
Bild 13:	Abfolge mikrobiologisch katalysierter Redoxreaktionen unter Beteiligung von organisch gebundenem Kohlenstoff entlang der Fließrichtung des Grundwassers, Redoxpotenzialbereiche der zugehörigen Redox-Halbreaktionen und freie Reaktionsenthalpie der Redoxreaktionen	32
Bild 14:	Denitrifikations-Reaktionskette	33
Bild 15:	Beispiel für die Entwicklung verschiedener Anionenkonzentrationen einschließlich Nitrat im Rohwasser eines Brunnens bei fehlendem Nitratabbaupotenzial des Aquifers.....	38
Bild 16:	Nahezu lineare Korrelation zwischen den Nitratkonzentrationen und den Chlorid- bzw. Sulfatwerten unter landwirtschaftlicher Nutzfläche bei fehlendem Nitratabbaupotenzial	38
Bild 17:	Beispiel für einen Nitratudbruch in einer Grundwassermessstelle als Beleg für die Erschöpfung des Nitratabbaupotenzials	39

Bild 18:	Beispiel für den tiefenabhängigen Anstieg der Konzentration gelösten anorganischen Kohlenstoffs in einer Multilevel-Messstelle bei gleichzeitigem Rückgang der Nitratwerte als Hinweis auf Nitratreduktion durch organischen Kohlenstoff.....	40
Bild 19:	Geologisches Profil durch das Einzugsgebiet eines Wasserwerks am Niederrhein mit Darstellung des Zustroms nitrathaltigen oberflächennahen Grundwassers in den tieferen Förderhorizont	41
Bild 20:	a) Tiefenspezifische Verteilung der Nitratkonzentrationen b) Tiefenspezifische Verteilung der Sulfatkonzentrationen. Vergleich der Messwerte und berechneter Konzentrationen unter Annahme einer Nitrat-Ausgangskonzentration von 105 mg/l und Reduktion durch chemo-lithotrophe Denitrifikation.....	42
Bild 21:	Visualisierung einer Stickstoffbilanz.....	43
Bild 22:	Tiefenspezifische Auflösung der Sedimentchemie eines Grundwasserleiters	45
Bild 23:	Aufbau eines Standversuches	47
Bild 24:	Aufbau eines Zirkulationssäulenversuches	48
Bild 25:	Möglichkeiten der graphischen Auswertung zur Identifikation von isotopenfraktionierenden Prozessen: a) linearer Zusammenhang zwischen dem Isotopenverhältnis und dem natürlichen Logarithmus der Nitratkonzentration, b) logarithmischer Kurvenverlauf.....	51
Bild 26:	Schematische Darstellung typischer $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^{15}\text{N}$ -Wertebereiche für Nitrat aus verschiedenen Quellen (nach MAYER et al. 2002)	52
Bild 27:	Schematische Darstellung typischer $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^{34}\text{S}$ -Wertebereiche für Sulfat aus unterschiedlichen Quellen und biogenen Pyrit	53
Bild 28:	Tiefenspezifische Darstellung zur Verteilung der $\delta^{15}\text{N}_{\text{Nitrat}}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{Nitrat}}$ -Isotopie des Grundwassers der Multi-Level-Messstellen an den Standorten 1, 2 und 3.....	54
Bild 29:	Idealisierte hydrogeologische Situation in einem einfachen reaktiven Stofftransportmodell	55
Bild 30:	Modellierte Entwicklung der Rohwasserbeschaffenheit seit Beginn der Grundwasserentnahme über einen Zeitraum von 20 Jahren	56
Bild 31:	Modellierte Grundwasserbeschaffenheit entlang der Fließstrecke nach einer Förderdauer von 20 Jahren; linkes Mehrfachdiagramm mit Pyrit; rechtes Mehrfachdiagramm ohne Pyrit.....	56
Bild 32:	Stark überhöhtes schematisches Profil eines Grundwasserleiters; GWM = Grundwassermessstelle.	57
Bild 33:	Scheinbares Absinken der Redoxzonierung eines Grundwasserleiters mit der Zeit durch den Eintrag, Transport und Abbau von Nitrat und der damit verbundenen Zehrung des Nitratabbauvermögens des Grundwasserleiters	58
Bild 34:	Beziehung zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und dem Gehalt von Disulfid-Schwefel in fünf Kernbohrungen.....	59
Bild 35:	Verteilung von Partikel reaktiven Materials im Lockersediment und Biofilm, Modellvorstellung.....	61
Bild 36:	Beispiel für die Ausbildung einer Nitratreduktionsfront in einem Grundwasserleiter und deren Auswirkungen auf die Nitratkonzentration des geförderten Grundwassers	67
Bild 37:	Versuch W 13, Verlauf der Elimination $E(t)$ von Nitrat, des freigesetzten Sulfats (t) und zeitlicher Verlauf der Summe $D(t)$ der Stickstoffreaktionsprodukte N_2 , N_2O und NO_2^-	70
Bild 38:	Ausgewählte hydrochemische Parameter während eines Säulenversuches.....	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Umweltrelevante Stickstoffverbindungen, ihre Entstehung und ihre Auswirkung	11
Tabelle 2:	Beispiele für Abstandsgeschwindigkeiten verschiedener Grundwasserleitertypen.....	14
Tabelle 3:	bulk-Deposition, 2 Stationen in Niedersachsen, Unterschied Freiland – Kronentraufe, Einfluss der topografischen Lage.....	25
Tabelle 4:	Ermittlung des betrieblichen Stickstoff-Saldos mit Hilfe der Hoftorbilanz	28
Tabelle 5:	Organische Kohlenstoff- und Pyrit-Schwefelgehalte ausgewählter Porengrundwasserleiter Deutschlands (1000 mg/kg entsprechen 0,1 Gew. %).....	46
Tabelle 6:	Spannbreiten der Eingangsgrößen für die Berechnung der Dauer der chemo-lithotropen Denitrifikation. Die im Berechnungsbeispiel gewählten Größen sind hervorgehoben.....	64
Tabelle 7a:	Dauer des Nitratabbaus unter „very-best-case“-Bedingungen bei 0,1 Gew. % Disulfid-Schwefel und Eingangsgrößen nach Tabelle 6. Werte auf ganze Jahre gerundet.....	65
Tabelle 7b:	Dauer des Nitratabbaus unter „very-best-case“-Bedingungen bei 0,05 Gew. % Disulfid-Schwefel und Eingangsgrößen nach Tabelle 6. Werte auf ganze Jahre gerundet.....	65
Tabelle 7c:	Dauer des Nitratabbaus unter „very-best-case“-Bedingungen bei 0,01 Gew. % Disulfid-Schwefel und Eingangsgrößen nach Tabelle 6. Werte auf ganze Jahre gerundet.....	65
Tabelle 8:	Ergebnisse des Versuchs W 13, Wasserparameter und Stickstoffgase, Mittelwerte von drei Parallelversuchen. Zur Erläuterung der Kürzel D(t) und E(t)	69
Tabelle 9:	Gegenüberstellung von λ_0 -Werten aus Laborversuchen für drei norddeutsche Gebiete.....	71
Tabelle 10:	Disulfid-Schwefel im Bohrkern vor den Versuchen sowie prozentualer Aufbrauch	72
Tabelle 11:	Kennwerte des Säulenversuches entsprechend Bild 38 (Trockendichte: 1,6 t/m ³)	73
Tabelle 12:	Abschätzung der realen Lebensdauer des Nitratabbaus durch Korrektur der stöchiometrisch berechneten Dauer (Abschnitt 6.3) um die Anteile des reaktiven Materials, die anhand zweier Laborversuchsreihen (Abschnitt 6.4) ermittelt wurden, exemplarisch dargestellt für drei Disulfid-Schwefel-Gehalte. Ergebnisse auf ganze Jahre gerundet	76

Die im **Glossar** erläuterten Begriffe sind im Text **fett** hervorgehoben

1 Anlass und Grundlageninformationen zum Stickstoff

1.1 Anlass

Die sich im Grundwasser einstellenden Konzentrationen des Nitrats und anderer Stickstoffverbindungen werden neben der Höhe der Stickstoffüberschüsse bei der Landnutzung und der Höhe der Grundwasserneubildungsrate maßgeblich durch die in den Grundwasserleitern ablaufenden Stickstoffumsatzprozesse geprägt. Die allgemeinverständliche Vermittlung des derzeitigen Kenntnisstandes zu diesen Nitratabbauprozessen stellt den Schwerpunkt des Themenbandes dar. Die beiden wesentlichen Nitratabbaureaktionen werden detailliert vorgestellt und Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Prozesse untersucht und quantifiziert werden können, so dass Abschätzungen zur Lebensdauer des Nitratabbaus ermöglicht werden. Neben der Betonung der Endlichkeit und – bis auf seltene Ausnahmen – nicht vorhandenen Regenerierbarkeit des Nitratabbaupotenzials wird betont, wie und mit welchen Einschränkungen Angaben der zur Dauer des Nitratabbaus vorgenommen werden können und in welchen Größenordnungen diese anzusetzen sind. Der Ort der Betrachtung ist hierbei immer der Grundwasserleiter. Angrenzende Bereiche wie die ungesättigte Zone oder mögliche Wechselwirkungen mit oberirdischen **Gewässern** werden angesprochen, um eine thematische Einbindung in den Gesamtzusammenhang sicherzustellen, aber nicht vertieft.

Erhöhte Stickstoff- bzw. Nitratkonzentrationen sind aus verschiedenen Gründen für alle Arten von **Gewässern** relevant. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den **Gewässertypen** und des Transportwegs vom Grundwasser über die oberirdischen **Gewässer** in die Meere ergibt sich ein komplexer **wasserwirtschaftlicher** Problemkreislauf, an dem das Grundwasser einen bedeutenden Anteil hat.

Grundwasser ist mit über 60 % Anteil an der Förderung wesentliche Grundlage der Trinkwasserversorgung in Deutschland. Hierfür gilt gemäß Trinkwasserverordnung ein Grenzwert von 50 mg/l Nitrat. Dieser Wert ist gleichzeitig die europaweit einheitliche Qualitätsnorm für Grundwasser nach der EG-Wasserrahmenrichtlinie, deren Ziel der gute Zustand aller **Gewässer** ist. Aussagen über die Verträglichkeit von 50 mg/l Nitrat für das **Ökosystem** Grundwasser können derzeit noch nicht getroffen werden.

Da oberirdische **Gewässer** maßgeblich über das Grundwasser gespeist werden, findet auf diesem Weg auch ein Nährstoffeintrag statt. Eine Folge ist zudem der Eintrag in die Meere, verbunden mit erhöhten Stickstoffkonzentrationen insbesondere der **Küstengewässer** in den Mündungsbereichen der Flüsse.

1.2 Stickstoffkreislauf

Für den Bereich des Grundwassers ist die durchwurzelte Zone des Bodens die wichtigste Quelle an Stickstoffverbindungen, besonders an Nitrat. Wegen der komplexen Zusammenhänge des Stickstoffkreislaufes wird er nachfolgend mit Hilfe von drei Bildern erläutert: Bild 1 zeigt die globale Sicht des Kreislaufes, Bild 2 die vertikale hydrologische Untergliederung des Untergrundes, (Bild 3 steht nicht in direktem Zusammenhang mit dem Stickstoffkreislauf und dient der Erläuterung der Grundwasserströmung) und Bild 4 zeigt detailliert den Stickstoffkreislauf im Wurzelraum des Bodens.

Stickstoffkreisläufe werden in der Literatur an verschiedenen Stellen beschrieben, die dort jeweils dem Hauptthema des Artikels angepasst dargestellt sind. Hier seien nur erwähnt DELWICHE (1970), WALTHER et al. (1985) und GEUPEL et al. (2009). Bei GEUPEL et al. (2009) sind im Bericht des Umweltbundesamtes über eine multimediale Stickstoff-Emissionsminderungsstrategie die aktuellen Stickstoffströme differenziert beschrieben und quantifiziert.

1.2.1 Stickstoffquellen

Bild 1 zeigt die Stickstoffströme und die Form, in der Stickstoff überwiegend transportiert wird. In Tabelle 1 sind die wichtigen Stickstoffverbindungen, ihre Hauptquellen und die wichtigsten Auswirkungen zusammengefasst, zum Beispiel auf ober- und unterirdische **Gewässer** sowie auf die menschliche Gesundheit.