

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 299 22 278
UBA-FB 000251



Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern

Projektleitung:

Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Lehrstuhl Umweltgeologie, Cottbus

Unter Mitwirkung von

FUGRO CONSULT GmbH, Berlin

Projektteam

Dr. T. Heinkele (BTU Cottbus)

Prof. Dr. habil. H.-J. Voigt (BTU Cottbus)

Dipl. Krist., Dipl. Geol. C. Jahnke (BTU Cottbus)

Dr. S. Hannappel (FUGRO CONSULT GmbH)

Dipl. Geol. E. Donat (FUGRO CONSULT GmbH)

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese TEXTE-Veröffentlichung kann bezogen werden bei

Vorauszahlung von 10,00 €

durch Post- bzw. Banküberweisung,
Verrechnungsscheck oder Zahlkarte auf das

Konto Nummer 4327 65 - 104 bei der

Postbank Berlin (BLZ 10010010)

Fa. Werbung und Vertrieb,

Ahornstraße 1-2,

10787 Berlin

Parallel zur Überweisung richten Sie bitte
eine schriftliche Bestellung mit Nennung
der **Texte-Nummer** sowie des **Namens**
und der **Anschrift des Bestellers** an die
Firma Werbung und Vertrieb.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und
Vollständigkeit der Angaben sowie für
die Beachtung privater Rechte Dritter.
Die in dem Bericht geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet II 3.1
Dr. Rüdiger Wolter

Berlin, Mai 2002

Berichts-Kennblatt

Berichtsnummer 1. UBA-FB	2.	3.
4. Titel des Berichts Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern		
5. Autoren, Namen, Vornamen Heinkele, Thomas., Jahnke, Christoph., Voigt, Hans-Jürgen (BTU Cottbus) Hannappel, Stephan., Donat, Elena. (FUGRO CONSULT GmbH)	8. Abschlussdatum 30.04. 2001	
	9. Veröffentlichungsdatum	
	10. UFOPLAN-Nr. 299 22 278	
	11. Seitenzahl: 118	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Brandenburgische Technische Universität, Lehrstuhl Umweltgeologie, Postfach 101344, 03013 Cottbus FUGRO CONSULT GmbH, Wolfener Str. 36K, 12681 Berlin	12. Literaturangaben: 96	
	13. Tabellen und Diagramme: 20	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 14193 Berlin	14. Abbildungen: 15	
15. Zusätzliche Angaben : 19 Karten 1:200.000 als Anlagen		
16. Kurzfassung Zur Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern wurde eine neue Methodik erarbeitet. Danach werden in einem zweistufigen Verfahren Komponenten des hydrogeologischen Systems bewertet sowie die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung analysiert. Diese Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung basiert auf der Ermittlung der Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone. Die lithologischen Eigenschaften der Gesteine der Grundwasserüberdeckung, der Grundwasserflurabstand sowie die Grundwasserneubildungsrate fließen als bestimmende Parameter zur Berechnung der Verweilzeit ein. Die Methodik basiert im wesentlichen auf Grundlagendaten, die in der Bundesrepublik Deutschland verfügbar sind bzw. in absehbarer Zeit verfügbar sein werden. Die erarbeitete Methodik wurde unter Verwendung eines GIS beispielhaft an einem Flusseinzugsgebiet in Norddeutschland getestet. Die Bearbeitung des Beispielgebietes erfolgte im Maßstab 1:200.000.		
17. Schlagwörter Grundwasser, Grundwasserkörper, Flusseinzugsgebiet, Verschmutzungsempfindlichkeit, Geographische Informationssysteme, Deckschichten, Grundwasserüberdeckung, Grundwasserneubildung, EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)		
18. Preis	19.	20.

Report No. 1. UBA-FB	2.	3.
4. Report Title Characterization of groundwater vulnerability		
5. Authors, Names, First Names Heinkele, Thomas., Jahnke, Christoph., Voigt, Hans-Jürgen (BTU Cottbus) Hannappel, Stephan., Donat, Elena. (FUGRO CONSULT GmbH)		8. Report Date 30.04.2001
6. Performing organisation (Name, Adress) Brandenburgische Technische Universität, Lehrstuhl Umweltgeologie, Postfach 101344, 03013 Cottbus FUGRO CONSULT GmbH, Wolfener Str. 36K, 12681 Berlin		9. Publication Date
		10. UFOPLAN-Ref. No. 299 22 278
		Number of pages: 118
7. Sponsoring Agency (Name, Adress) Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 14193 Berlin		Number of references: 96
		13. No. of tables/diagrams: 20
15. supplementary notes : 19 Karten 1:200.000 als Anlagen		14. No. of figures: 15
16. Abstract A new method for the characterization of the groundwater vulnerability was developed. According to this method, components of the hydrogeological system and the protection capacity of the unsaturated zone are analysed and evaluated in a two step procedure. The protection capacity of the unsaturated zone is evaluated according to the travel time of infiltrating water. The travel time of infiltrating water in the unsaturated zone is determined by the lithology and the thickness of the unsaturated zone and by the amount of groundwater recharge. The method is mainly based on existing geographical maps and data. The method was tested in a drainage area in northern Germany using a GIS. This method was carried out in a mapscale 1:200.000.		
17. Keywords groundwater, groundwater bodies, drainage area, vulnerability, geographical information system (GIS), unsaturated zone, groundwater recharge, EU water framework directive		
18. Preis	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Tabellen	3
Verzeichnis der Abbildungen	4
Verzeichnis der Anlagen	4
Verzeichnis der Abkürzungen	5
0 Zusammenfassung	6
1 Einleitung	11
1.1 Veranlassung und Zielsetzung	11
1.2 Aktueller Hintergrund (WRRL)	12
1.3 Definition der Empfindlichkeit von Grundwasservorkommen	14
2 Methoden und Kenntnisstand zur Ableitung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit	17
2.1 Klassifizierung von Methoden zur Ableitung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit	17
2.2 Übersicht über wichtige Arbeiten zur Ableitung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit	18
2.2.1 Ableitung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit durch Hydrogeologische Systembetrachtung und Analogieschlüsse	19
2.2.2 Matrix- und Punktbewertungsverfahren	20
2.2.3 Mathematische Modelle	32
2.2.4 Andere Methoden zur Ableitung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit	36
2.3 Beurteilung der Entwicklung von Methoden zur Charakterisierung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit	38
2.4 Methodenkritik unter Beachtung der Anforderungen der WRRL zur Berichterstattung	40
3 Bearbeitungsmethodik der vorliegenden Studie	42
3.1 Methodik zur Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasservorkommen für die Berichterstattung im Rahmen der WRRL	42
3.1.1 Bearbeitungsschritte in der erstmaligen Beschreibung	42
3.1.2 Bearbeitungsschritte in der weitergehenden Beschreibung	47
3.2 Vergleich mit der Methodik der Geologischen Landesämter der Bundesrepublik Deutschland (Hölting et al., 1995)	53
4 Untersuchungsgebiet zur Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasservorkommen	58
4.1 Auswahl eines geeigneten Untersuchungsgebietes	58
4.2 Daten und Unterlagen zur beispielhaften Anwendung der Methodik im Untersuchungsgebiet Große Aue	59
4.3 Geologisch-morphologische Übersicht über das Untersuchungsgebiet Große Aue	61
5 Anwendung der Bearbeitungsmethodik auf das Beispielgebiet Große Aue	63
5.1 Bearbeitungsschritte im Rahmen der Erstmaligen Beschreibung nach WRRL	63
5.1.1 Ermittlung der geohydraulischen Gebietstypen	63

<u>5.2</u>	<u>Bearbeitungsschritte zur Kennzeichnung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit im Rahmen der weitergehenden Beschreibung</u>	66
<u>5.2.1</u>	<u>Ermittlung der Verweilzeiten in den Neubildungsgebieten und in Gebieten mit eingeschränkter Neubildung</u>	66
<u>5.2.2</u>	<u>GW-Neubildungsrate</u>	66
<u>5.2.3</u>	<u>Ermittlung der Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung</u>	69
<u>5.2.4</u>	<u>Ermittlung der Feldkapazität der Grundwasserüberdeckung</u>	70
<u>5.2.4.1</u>	<u>Flächenbezogene Ermittlung der Feldkapazität der Grundwasserüberdeckung</u>	70
<u>5.2.4.2</u>	<u>Ermittlung der standortkonkreten Feldkapazität an Schichtenverzeichnissen von Bohrungen</u>	71
<u>5.2.4.3</u>	<u>Plausibilitätsprüfung der flächenbezogenen Feldkapazitäten der Grundwasserüberdeckung</u>	72
<u>5.2.5</u>	<u>Berechnung der Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone</u>	72
<u>5.3</u>	<u>Ermittlung der Schutzfunktion der Deckschichten nach der Methode der Geologischen Landesämter der Bundesrepublik Deutschland</u>	73
<u>6</u>	<u>Ergebnisse der Ermittlung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit im Untersuchungsgebiet „Große Aue“</u>	75
<u>6.1</u>	<u>Ergebnisse der Bearbeitungsschritte im Rahmen der Erstmaligen Beschreibung nach WRRL</u>	75
<u>6.1.1</u>	<u>Geohydraulische Gebietstypen</u>	75
<u>6.1.2</u>	<u>Beurteilung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit auf der Grundlage der Untersuchungen im Rahmen der Erstmaligen Beschreibung nach WRRL</u>	79
<u>6.2</u>	<u>Ermittlung der Verweilzeiten des Sickerwassers zur Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasservorkommen im Rahmen der weitergehenden Beschreibung nach WRRL</u>	82
<u>6.2.1</u>	<u>Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet</u>	82
<u>6.2.2</u>	<u>Mächtigkeit der ungesättigten Zone</u>	83
<u>6.2.3</u>	<u>Feldkapazität der Grundwasserüberdeckung</u>	83
<u>6.2.3.1</u>	<u>Flächenbezogene Feldkapazität der Grundwasserüberdeckung</u>	83
<u>6.2.3.2</u>	<u>Standortkonkrete Feldkapazität der Grundwasserüberdeckung</u>	86
<u>6.2.3.3</u>	<u>Vergleich der flächenbezogenen Feldkapazität und der standortkonkreten Feldkapazität (Plausibilitätsprüfung)</u>	91
<u>6.2.4</u>	<u>Verweilzeiten des Sickerwassers</u>	94
<u>6.3</u>	<u>Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserdeckschichten nach der Methode der Geologischen Landesämter und Vergleich zu der BTU-Methodik</u>	104
<u>6.4</u>	<u>Zusammenfassende Diskussion der Untersuchungsergebnisse</u>	107
<u>7</u>	<u>Ausblick: Stoff- und stoffgruppenspezifische Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers</u>	111
<u>8</u>	<u>Literaturverzeichnis</u>	113

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Datenanforderung zur Ermittlung der Verweilzeit nach DIN 19732 und zur Kennzeichnung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung nach der Methode der Geologischen Landesämter (Hölting et al., 1995).....	54
Tabelle 2: Ableitung von Feldkapazität und Punktzahl eines Modellprofils Lockergestein.....	56
Tabelle 3: Berechnung der Verweilzeit nach DIN 19732 und der Punktzahl S des Modellprofils Lockergestein bei 300 mm Grundwasserneubildungsrate	56
Tabelle 4: Berechnung der Verweilzeit nach DIN 19732 und der Punktzahl S des Modellprofils Lockergestein bei 50 mm Grundwasserneubildungsrate	57
Tabelle 5: Dateninput zur Charakterisierung der Verschmutzungsempfindlichkeit im Untersuchungsgebiet Große Aue	59
Tabelle 6: Zuordnung von Neubildungsgebieten und Gebieten mit eingeschränkter Neubildung zu den Bodenartengruppen der Karte der Bodenarten (Anlage 4)	65
Tabelle 7: Reduktionsfaktoren zur Ermittlung der Grundwasserneubildung aus dem Gesamtabfluss nach ABIMO in Anlehnung an Dörhöfer/Josopait 1980.....	69
Tabelle 8: Relative Flächenanteile von Feldkapazitätsklassen in Flurabstandsklassen in Gebieten mit eingeschränkter Neubildung	84
Tabelle 9: relative Flächenanteile von Feldkapazitätsklassen in Flurabstandsklassen in Neubildungsgebieten....	85
Tabelle 10: Flächenanteile von Verweilzeitklassen in Neubildungsgebieten (Neubildungsgebiete und Gebiete mit eingeschränkter Neubildung), berechnet mit Grundwasserneubildungsraten nach der Methode von Dörhöfer & Josopait (1980) sowie Flächenanteile der Entlastungsgebiete und der Gebiete ohne nutzbare Grundwasserführung.	96
Tabelle 11: Flächenanteile von Verweilzeitklassen in Neubildungsgebieten (Neubildungsgebiete und Gebiete mit eingeschränkter Neubildung), berechnet mit Grundwasserneubildungsraten der Bodeninformationssysteme sowie Flächenanteile der Entlastungsgebiete und der Gebiete ohne nutzbare Grundwasserführung.	96
Tabelle 12: Flächenanteile von Verweilzeitklassen in Neubildungsgebieten (Neubildungsgebiete und Gebiete mit eingeschränkter Neubildung), berechnet mit Grundwasserneubildungsraten nach dem Modell ABIMO sowie Flächenanteile der Entlastungsgebiete und der Gebiete ohne nutzbare Grundwasserführung. 96	
Tabelle 13: Flächenanteile von Verweilzeitklassen, getrennt nach Neubildungsgebieten und Gebieten mit eingeschränkter Neubildung, berechnet mit Grundwasserneubildungsraten nach der Methode von Dörhöfer & Josopait (1980).....	97
Tabelle 14: Flächenanteile von Verweilzeitklassen, getrennt nach Neubildungsgebieten und Gebieten mit eingeschränkter Neubildung, berechnet mit Grundwasserneubildungsraten der Bodeninformationssysteme.....	98
Tabelle 15: Flächenanteile von Verweilzeitklassen, getrennt nach Neubildungsgebieten und Gebieten mit eingeschränkter Neubildung, berechnet mit Grundwasserneubildungsraten nach dem Modell ABIMO	98
Tabelle 16: Flächenanteile von Verweilzeitklassen in Neubildungsgebieten (Neubildungsgebiete und Gebiete mit eingeschränkter Neubildung), berechnet mit Grundwasserneubildungsraten nach der Methode von Dörhöfer & Josopait (1980), getrennt nach Flurabstandsklassen	99
Tabelle 17: Flächenanteile von Verweilzeitklassen in Neubildungsgebieten (Neubildungsgebiete und Gebiete mit eingeschränkter Neubildung), berechnet mit Grundwasserneubildungsraten der Bodeninformationssysteme, getrennt nach Flurabstandsklassen	100
Tabelle 18: Flächenanteile von Verweilzeitklassen in Neubildungsgebieten (Neubildungsgebiete und Gebiete mit eingeschränkter Neubildung), berechnet mit Grundwasserneubildungsraten nach dem Modell ABIMO, getrennt nach Flurabstandsklassen	100
Tabelle 19: Flächenanteile von Verweilzeitklassen in Neubildungsgebieten (Neubildungsgebiete Gebiete mit eingeschränkter Neubildung), berechnet auf Grundlage von Feldkapazitätsklassen (siehe Text) und mit Grundwasserneubildungsraten nach der Methode von Dörhöfer & Josopait (1980) sowie Flächenanteile der Entlastungsgebiete und der Gebiete ohne nutzbare Grundwasserführung.	103
Tabelle 20: Differenz von Verweilzeitklassen bei Ermittlung der Verweilzeiten mit vereinfachter und exakter Berechnungsgrundlage (Erläuterungen siehe Text).....	104

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Natürliches Schutzpotalential von Grundwasserkörpern verschiedener Gesteinsarten (nach Schenk & Kaup, 1998, verändert)	43
Abb. 2: Abflussverhältnisse der geohydraulischen Gebietstypen Grundwasserneubildungsgebiet und Grundwasserentlastungsgebiet (nach Lawa, 2000, verändert).....	45
Abb. 3: Informationsgehalt von Bodenkarten zur Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasservorkommen.....	49
Abb. 4: Informationsgehalt von Geologischen Übersichtskarten zur Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasservorkommen.....	50
Abb. 5: Erstellung eines Grundwasserflurabstandsplans.....	51
Abb. 6 Schema zur Berechnung von Verweilzeiten	52
Abb. 7: Flächengewichtete mittlere Feldkapazität in Neubildungsgebieten und Gebieten mit eingeschränkter Neubildung	86
Abb. 8: Häufigkeitsverteilung von Feldkapazitätsklassen der Schichten in Bohrungen in Niedersachsen.....	87
Abb. 9: Häufigkeitsverteilung von Feldkapazitätsklassen der Schichten in Bohrungen in Nordrhein-Westfalen....	87
Abb. 10: Standortkonkrete Feldkapazität der Grundwasserüberdeckung ermittelt aus Schichtenverzeichnissen .	89
Abb. 11: Standortkonkrete Feldkapazität der Grundwasserüberdeckung ermittelt aus Schichtenverzeichnissen verschiedener geologischer Einheiten.....	90
Abb. 12: Beziehung zwischen der flächenbezogenen Feldkapazität und der standortkonkreten, aus Schichtenverzeichnissen berechneten Feldkapazität im niedersächsischen Teil des Untersuchungsgebietes.....	93
Abb. 13: Beziehung zwischen der flächenbezogenen Feldkapazität und der standortkonkreten, aus Schichtenverzeichnissen berechneten Feldkapazität im nordrhein-westfälischen Teil des Untersuchungsgebietes.....	93
Abb. 14: Mittlere Verweilzeiten in Neubildungsgebieten und Gebieten mit eingeschränkter Neubildung	98
Abb. 15: Flächengewichtete Mittelwerte der Verweilzeitklassen in Abhängigkeit von Flurabstandsklassen	102

Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1 : Geologische Übersichtskarte	
Anlage 2 : Hydrogeologische Gesteinseigenschaften	
Anlage 3 : Bodentypen	
Anlage 4 : Bodenarten	
Anlage 5 : Flächennutzung (CORINE)	
Anlage 6 : Digitales Geländemodell	
Anlage 7 : Grundwasserneubildung nach dem Verfahren von Dörhöfer/Josopait	
Anlage 8 : Grundwasserneubildung nach Niedersächsischem Bodeninformationssystem / Informationssystem Bodenkarte Nordrhein-Westfalen	
Anlage 9 : Grundwasserneubildung berechnet nach dem Modell ABIMO	
Anlage 10 : Geohydraulische Gebietstypen	
Anlage 11 : Grundwassergleichen	
Anlage 12 : Grundwasserflurabstand	
Anlage 13 : Feldkapazität der Grundwasserüberdeckung	
Anlage 14 : Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern berechnet mit den Grundwasserneubildungsraten nach Dörhöfer/Josopait	
Anlage 14a: Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern berechnet mit den Grundwasserneubildungsraten nach NIBIS/GLA-NRW	
Anlage 14b: Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern berechnet mit den Grundwasserneubildungsraten nach ABIMO	
Anlage 15 : Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (berechnet nach Hölting et al. 1995)	

Anlage 16 : Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern berechnet mit den Grundwasserneubildungsraten nach Dörhöfer/Josopait und standardisierten Feldkapazitäts-Klassen

Anlage 17 : Analyse unterschiedlicher Methoden der Verweilzeitberechnung

Verzeichnis der Abkürzungen

ABIMO	Abflussbildungsmodell
BK	Bodenkarte
BTU	Brandenburgische Technische Universität
BÜK	Bodenübersichtskarte
DIN	Deutsches Institut für Normung
EU	Europäische Union
FK	Feldkapazität
Gew%	Gewichtsprozent
GIS	Geographisches Informations-System
GLA-NRW	Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen
GÜK	Geologische Übersichtskarte
GW	Grundwasser
HK	Hydrogeologische Karte
HÜK	Hydrogeologische Übersichtskarte
i.e.S.	im engeren Sinne
KA 4	Bodenkundliche Kartieranleitung, 4.Auflage
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LCKW	Leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe
nFK	nutzbare Feldkapazität
NIBIS	Niedersächsisches Bodeninformationssystem
NLfB	Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
NLÖ	Niedersächsisches Landesamt für Ökologie
NN	normal Null
NRA	National River Authority
SRU	Rat von Sachverständigenrat für Umweltfragen
STUA	Staatliches Umweltamt
TÜK	Topografische Übersichtskarte
Vol%	Volumenprozent
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

0 Zusammenfassung

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie fordert entsprechend Artikel 5 von den Mitgliedsstaaten eine Charakterisierung der Flusseinzugsgebiete, insbesondere eine Beschreibung, um zu beurteilen, „inwieweit die Grundwasserkörper genutzt werden und wie hoch das Risiko ist, dass sie die Ziele für jeden einzelnen Grundwasserkörper gemäß Artikel 4 (Umweltziele) nicht erfüllen“ In diesem Zusammenhang spielt die Charakterisierung der Empfindlichkeit der Grundwasservorkommen eine entscheidende Rolle.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern wurde die Verschmutzungsempfindlichkeit zum einen als Maß für die Verweilzeit des in den Untergrund eindringenden Niederschlagswassers in der Versickerungszone und zum anderen als Maß für die Wechselwirkungs- und Abbauprozesse, die die Ausbreitung der Stoffe verhindern bzw. verzögern können, verstanden und folgendermaßen definiert: **Die Verschmutzungsempfindlichkeit eines Grundwasservorkommens ist die Wahrscheinlichkeit, ob ein bestimmter Anteil eines Schadstoffes in einer bestimmten Zeit das Grundwasser erreicht bzw. erreichen kann.**

Ausgehend von den in der WRRL bestehenden Anforderungen und der o.g. Definition wurde ein Verfahren entwickelt, das die durch die WRRL vorgegebenen Bearbeitungsschritte berücksichtigt und weitgehend auf den in der Bundesrepublik Deutschland flächenhaft vorliegenden (bzw. zur Zeit in Bearbeitung befindlichen) geowissenschaftlichen Grundlagen basiert.

Nach der hier entwickelten Methodik werden zunächst in einem **ersten Bearbeitungsschritt** allgemeine und noch wenig differenzierte Aussagen zur Empfindlichkeit der Grundwasserkörper eines Einzugsgebietes getroffen. Diese basieren auf den hydrogeologischen Gesteinseigenschaften (Art des Porenraums und geochemische Eigenschaften) des Grundwasserleiters, insbesondere aber auf den geohydraulischen Gebietstypen, die im wesentlichen aus den allgemeinen Eigenschaften der Deckschichten des Grundwasserleiters abgeleitet werden können. Es werden dabei Entlastungsgebiete, Grundwasserneubildungsgebiete, Gebiete mit eingeschränkter

Grundwasserneubildung und Gebiete ohne nutzbare Grundwasserführung unterschieden.

Entlastungsgebiete werden aufgrund des Auftretens von hydromorphen Bodentypen, die einen Grundwasserflurabstand < 2 m anzeigen, ausgeschieden. Gebiete ohne nutzbare Grundwasserführung werden auf der Grundlage der hydrogeologischen Karte abgegrenzt. Die übrigen Gebiete werden nach dem Auftreten sandiger bzw. bindiger Deckschichten unterschieden in Neubildungsgebiete (bei sandiger Grundwasserüberdeckung) bzw. in Gebiete mit eingeschränkter Grundwasserneubildung (bei bindiger Grundwasserüberdeckung).

Die Entlastungsgebiete sind durch eine geringmächtige Grundwasserüberdeckung gekennzeichnet, die i.d.R. nur eine geringe Schutzfunktion gegenüber Stoffeinträgen in das Grundwasser besitzt. Aufgrund der spezifischen geohydraulischen Randsituation in diesen Gebieten, d.h. aufgrund der hydraulischen Verbindungen zu Oberflächengewässern und geringen lateralen Wasser- und Stoffflüssen bleiben die Auswirkungen von Stoffeinträgen im Grundwasser räumlich eng begrenzt. Diese Gebiete stellen Grundwasserkörper dar, bei denen direkt abhängige Oberflächengewässer-Grundwasser-Ökosysteme vorhanden sind und die deshalb als besonders sensibel für Wechselwirkungsprozesse zwischen Oberflächen- und Grundwasser gelten. Aufgrund der sehr geringmächtigen Grundwasserüberdeckung ist in diesen Gebieten die Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit im Sinne geringer Verweilzeiten in der Versickerungszone insgesamt als hoch einzustufen. Mit Blick auf die Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern sind die Entlastungsgebiete mit den o.g. Merkmalen hinreichend genau gekennzeichnet.

Gebiete ohne nutzbare Grundwasservorkommen brauchen mit Blick auf die Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit nicht näher betrachtet zu werden, da sie aufgrund der hydrogeologischen Gesteinseigenschaften des Grundwasserkörpers keine relevante Grundwasserführung aufweisen.

Da in den Neubildungsgebieten und den Gebieten mit eingeschränkter Grundwasserneubildung eine Infiltration von Niederschlagswasser stattfindet und somit ein Stofftransport zum Grundwasser erfolgt, sind sie grundsätzlich als verschmutzungsempfindlich zu kennzeichnen. Die Art der Überdeckung lässt orientierende Aussagen zum Ausmaß der Verschmutzungsempfindlichkeit zu. In Neubildungsgebieten ist

i.d.R. bei sandiger Grundwasserüberdeckung eine geringere Verweilzeiten des Sickerwassers und damit eine größere Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers zu erwarten als in Gebieten mit eingeschränkter Grundwasserneubildung, die durch eine bindige Grundwasserüberdeckung gekennzeichnet sind.

Hinreichend genaue Aussagen zur Empfindlichkeit des Grundwassers in Neubildungsgebieten und Gebieten mit eingeschränkter Grundwasserneubildung sind jedoch nur auf der Grundlage einer weiterführenden Kennzeichnung dieser Gebiete möglich. Diese weitergehende Kennzeichnung erfolgt in einem **zweiten Bearbeitungsschritt**. Dazu wird in Anlehnung an die DIN 19732 die Verweilzeit des Sickerwassers ermittelt.

Die Verweilzeiten werden aufgrund der Parameter Grundwasserflurabstand, Feldkapazität der Grundwasserüberdeckung und Grundwasserneubildungsrate nach den Regeln der DIN 19732 „Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nicht sorbierbaren Stoffen“ (Deutscher Normenausschuss, 1997) bestimmt. Die notwendigen Eingangsdaten zur Feldkapazität können aus den o.g. geowissenschaftlichen Grundlagen unmittelbar übernommen oder abgeleitet werden. Die flächenbezogenen Grundwasserneubildungsraten können ebenfalls aus bestehenden Kartenwerken übernommen oder aus klimatologischen Grundlagen, flächenbezogenen Landnutzungs- und Bodendaten durch geeignete Modelle berechnet werden. Zur Anwendung der o.g. DIN sind Grundwasserflurabstandspläne unverzichtbar.

Im Ergebnis der Anwendung der DIN 19732 können Flächen gleicher Verweilzeiten ermittelt werden. Die Verweilzeiten sind dabei als relatives Maß für die Verschmutzungsempfindlichkeit von Grundwasserkörpern im Sinne der o.g. Definition zu verstehen. Die berechnete Verweilzeit an sich ist nur für das Sickerwasser selbst sowie darin gelöste Stoffe, die sich wie ideale Tracer verhalten maßgebend. Darüber hinaus lässt sich durch die Verweilzeit eine relative Abschätzung von Potenzialen, die die Stoffverlagerung mit dem Sickerwasser beeinflussen, ableiten. So bedeuten hohe Verweilzeiten auch höhere Potenziale für Stoffumwandlungsprozesse in der Sickerzone, da längere Zeiträume zur Verfügung stehen. Daneben weisen Bereiche mit hoher Verweilzeit i.d.R. auch höhere Potenziale für Stoffbindungsprozesse auf, da

die Feldkapazität einer lithologischen Einheit ebenso wie die Kationenaustauschkapazität von der Korngrößenverteilung abhängt.

Die oben dargestellte Methodik wurde beispielhaft an dem Einzugsgebiet der Großen Aue getestet. In diesem Bearbeitungsgebiet konnte untersucht werden, inwieweit die Methodik für Fest- und Lockergesteine geeignet ist. Die Bearbeitung wurde auf der Grundlage vorhandener geologischer, hydrogeologischer, hydrologischer und bodenkundlicher digitaler Karten sowie von eigens für die Untersuchung ermittelten Grundwasserflurabständen und Grundwasserneubildungsraten in einem GIS (ArcView) durchgeführt.

Die beispielhafte Bearbeitung erbrachte die folgenden, wesentlichen Befunde:

- Allgemeine Aussagen zur Empfindlichkeit der Grundwasserkörper eines Einzugsgebietes lassen sich in dem ersten Bearbeitungsschritt auf der Grundlage der hydrogeologischen Gesteinseigenschaften der Grundwasserkörper und von Eigenschaften der Deckschichten der Grundwasserkörper problemlos und mit einem vergleichsweise überschaubaren Aufwand ableiten. Die dazu notwendigen Unterlagen liegen zum größeren Teil in den erforderlichen Maßstabsbereichen (1:200.000) als digitale Karten vor (Geologische Übersichtskarten) bzw. sind in Bearbeitung (Hydrogeologische Übersichtskarte M 1:200.000 und Bodenkundliche Übersichtskarte M 1:200.000).
- Eine genauere Kennzeichnung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit über die Berechnung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung im Rahmen des zweiten Bearbeitungsschrittes erfordert einen deutlich höheren Aufwand. Die zur Verweilzeitberechnung wesentlichen Parameter Grundwasserneubildungsraten und Grundwasserflurabstände liegen häufig nicht vor und müssen zunächst aus anderen Daten flächendeckend erzeugt werden.
- Die Grundwasserneubildungsraten haben großen Einfluss auf die Verweilzeit des Sickerwassers und damit auf die Einschätzung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit. Der Auswahl einer geeigneten Methodik zur Ermittlung der flächenbezogenen Grundwasserneubildungsraten kommt daher eine besonders große Bedeutung zu.

- Die Berechnung der Verweilzeit gelingt im Lockergestein einfacher und sicherer als im Festgestein. Einerseits sind in den Festgesteinsgebieten die Grundwasserflurabstände häufig nicht ausreichend exakt zu ermitteln (zu geringe Anzahl von Bohrungen und Grundwassermessstellen), andererseits sind die die Verweilzeit bestimmenden lithologischen Gesteinseigenschaften aus den vorhandenen Kartenunterlagen nur recht ungenau abzuleiten. Hier besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf
- Mit Blick auf die Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasservorkommen wurde mit dieser Methodik ein insgesamt recht ähnliches Ergebnis in dem untersuchten Bearbeitungsgebiet erzielt wie mit der Methode der Geologischen Landesämter der Bundesrepublik Deutschland (Hölting et al., 1995). Letztere kommt in der Tendenz jedoch zu einer insgesamt größeren Verschmutzungsempfindlichkeit.

Summary

The Water Framework Directive of the European Union requires according to article 5 a characterisation of the river catchment areas, in particular a description, in order to judge, "to what extent the groundwater bodies are used and the risk is as high that they do not fulfil the targets for each individual groundwater body in accordance with article 4 (environmental targets)" In this context, the characterisation of the groundwater vulnerability plays an important role.

Within this framework the groundwater vulnerability of the groundwater bodies of a catchment area was evaluated according to the retention time of the precipitation water in the infiltration zone penetrating to the groundwater body and according to interaction and reduction processes which can prevent or delay the groundwater bodies from contamination. The groundwater vulnerability was defined as the probability whether a certain proportion of a pollutant can achieve the groundwater in a certain time. A methodology for the evaluation of the groundwater vulnerability of catchment areas was developed. This methodology was mainly based on geographical informations (digital geological, hydro geological and soil maps) that are available in medium scales in the federal Republic of Germany.

According to the methodology developed here in a first step general and still few differentiated predicates for the vulnerability of the groundwater bodies of a catchment area are met. These are based on the hydrogeological rock characteristics (type of the pore space and geochemical characteristics) of the groundwater body, in particular on the geohydraulic area types, which are essentially derived from the general characteristics of the surface layers (unsaturated zone) of the groundwater body. Thereby discharge areas, groundwater recharge areas, areas with reduced groundwater recharge and areas without usable groundwater supply are differentiated.

Discharge areas are separated due to the occurrence of hydromorphic (gleyic) soil types, which display a groundwater table distance < 2 m. Areas without usable groundwater supply are defined on the basis of hydro geological maps. The remaining areas are separated according to the occurrence of sandy or loamy surface layers into

areas of groundwater recharge (sandy surface layers) or into areas with reduced groundwater recharge (loamy surface layers).

A thin groundwater cover characterizes the discharge areas. With regard to a protection of the groundwater from the input of contaminants into the groundwater, the thin surface layers have a very limited protective function. Due to the specific geohydraulic situation in groundwater discharge areas, i.e. due to the hydraulic connections to surface waters and a limited lateral flow of elements and water the effects of contaminant input remain spatially closely limited. These areas represent groundwater bodies, which are directly connected to surface water ecosystems and therefore are considered as particularly sensitive to interaction processes between surface waters and groundwaters. Due to the very thin groundwater cover the groundwater vulnerability is to be classified as high in these areas with regard to short retention times in the infiltration zone.

Areas without usable groundwater supply do not need to be evaluated with regard to groundwater vulnerability in detail, since they do not indicate relevant groundwater supply due to the hydrogeological rock characteristics of the groundwater body.

Areas of groundwater recharge and of reduced groundwater recharge are to be indicated basically as vulnerable because in these areas a transport of contaminants with the infiltrating water into the groundwater takes place. Due to the lithology of the unsaturated zone some preliminary estimates on the groundwater vulnerability in these areas can be made. In areas of groundwater recharge with sandy sediments of the unsaturated zone the retention times in the unsaturated zone are somewhat smaller and thus the groundwater vulnerability higher than in areas of reduced groundwater recharge.

Sufficiently exact predicates for the groundwater vulnerability in areas of groundwater recharge and in areas of reduced groundwater recharge are possible however only on the basis of a more precise evaluation of these areas, which is done in a second processing step. In applying the German Standard „DIN 19732“ the retention time of the infiltrating water in the unsaturated zone is determined. The retention times are determined due to the thickness of the unsaturated zone, the field capacity of the unsaturated zone and the rate of groundwater recharge according to the rules of the DIN 19732 "determination of the local infiltration potential of non-sorbable materials" (German stan-

standardization committee, 1992). The necessary input data to the field capacity can be taken over or derived from the above mentioned geoscientific maps directly. The rates of groundwater recharge can be likewise taken over from existing maps or be calculated from climatologically bases, land use and soil data by suitable models. As a result of the application of the DIN 19732 areas of same retention times can be determined. The retention times participate as relative measure for the vulnerability of groundwater bodies in the sense of the above mentioned definition. The calculated retention time actually is valid only for the infiltrating water itself as well as solved materials that behave like ideal tracers. Beyond that a relative estimation can be derived from potentials, which influence the material misalignment with the infiltration water by the retention time. Thus high retention times mean also higher potentials for processes of transformation in the seeping zone, since longer periods are available. Areas with high retention times indicate also higher potentials for processes of demobilization. The cation exchange capacity of a lithologic unit depends just like the field capacity on the particle size distribution.

The methodology represented above was tested exemplarily at the catchment area of the „Große Aue“ in Lower Saxony, Germany. This test was carried out on the basis of available geological, hydrogeological, hydrological and soil maps and some specific input data (thickness of unsaturated zone, maps of groundwater recharge rates) using a GIS (ArcView).

The exemplary handling furnished the following substantial results:

- A general evaluation of the vulnerability of the groundwater bodies of a catchment area can be derived in the first processing step on the basis of the lithology of the groundwater bodies and from characteristics of the surface layers (unsaturated zone). This evaluation can be derived from digital maps (geological maps, hydrogeological maps, soil maps) that are available in Germany in medium scale (1:200.000).
- A more detailed evaluation of the groundwater vulnerability by calculating the retention times of the infiltration water in the unsaturated zone requires a clearly higher expenditure. The rates of groundwater recharge and the thickness of the unsaturated zone are substantial for retention time calculation. These parameters are frequently not present and thus have to be calculated from other data.

- The rates of ground-water recharge have great influence on the retention time of the infiltration water and thus on the evaluation of the groundwater vulnerability. Therefore it is of great importance to select a suitable model for the calculation of groundwater recharge rates.
- The evaluation of the groundwater vulnerability is more reliable in areas of quaternary glacial and fluvioglacial sediments than in areas of consolidated sedimentary rocks. In the latter areas, the thickness of the unsaturated zone and some lithological features that determine the field capacity are difficult to determine.
- The evaluation of the groundwater vulnerability by the methodology presented above leads to results that are quite similar to those obtained by the method of the State Geological Services of Federal Republic of Germany (Hölting et al., 1995). However, the latter comes to somewhat higher groundwater vulnerability.