4403

Aufsatz 04403

Berechnung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone nach der DIN 19732 zur Standortbewertung im Hinblick auf die Grundwassergefährdung

Dr. Stephan Hannappel, Berlin

Inhaltübersicht

			Rdnr.
Nr. 1	1	Einführung	1, 2
Nr. 1	2	Grundlagen zur Ermittlung der Sickerwasserverweilzeiten	3 – 17
Nr. 2	2.1	Definition der Empfindlichkeit des Grundwassers	3 – 6
Nr. 2 Nr. 2.1	2.2	Algorithmus zur Berechnung der Verweilzeiten des Sickerwassers nach der DIN 19732	7 – 15
Nr. 2 Nr. 2.2	2.3	Bearbeitungskonzept	16, 17
Nr. 2 Nr. 2.3	3	Anwendungsbeispiel: Berechnung der Verweilzeiten des Sickerwassers für die gesamte Landesfläche von Mecklenburg-Vorpommern	18 – 55
Nr. 3	3.1	Datengrundlagen	18, 19
Nr. 3 Nr. 3.1	3.2	Ermittlung der Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung	20 – 31
Nr. 3 Nr. 3.2	3.3	Ermittlung der Feldkapazitäten der Grundwasserüberdeckung	32 – 40
Nr. 3 Nr. 3.3	3.4	Flächendifferenzierte Grundwasserneubildungsraten	41 – 43
Nr. 3 Nr. 3.4	3.5	Verknüpfung der Teilinformationen zu den Verweilzeiten und regionale Übersicht	44, 45
Nr. 3 Nr. 3.5	3.6	Analyse der Berechnungsfaktoren der Verweilzeiten	46 – 55
Nr. 3 Nr. 3.6	4	Ausblick	56 – 63
Nr. 4	5	Literaturverzeichnis	

Schlagwortübersicht nach Rdnr.

Nr. 4
Nr. 5
Nr. 5
Nr. 5
Rz. 10
Rz. 19
Rz. 3
Rz. 4
Rz. 8
Rz. 1
Rz. 2
Rz. 2
Rz. 2
Rz. 2
Rz. 3
Rz. 2
Rz. 27

Adsorption 10
Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5 32
Bundes-Bodenschutzverordnung 21
Deckschicht 4
DIN 19732 7
Direktabfluss 42
Feldkapazität 8
Festgesteinsgebiete 63
Flurabstand 8
Geschiebemergelhochflächen 30
gespanntes Grundwasser 23
Grundwasser 1
Grundwassergleichen 19
Grundwasserkörper 3
Grundwasserleiter 4
Grundwasserneubildungsrate 8
Grundwasseroberfläche 1
Grundwasserrichtlinie 2
Grundwasserschutz 2
Grundwasserüberdeckung 2
Grundwasserverordnung 2
Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit 3
intrinsische Schutzfunktion 2
Kriging 27

4403 *Berechnung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone nach der DIN 19732 zur Standortbewertung im Hinblick auf die Grundwassergefährdung*

Rz. 11 Makroporenfluss 11
Rz. 10 mikrobieller Abbau 10
Rz. 2 Schadstoffe 2
Rz. 5 Schadstoffeintrag 5
Rz. 1 Sickerwasser 1
Rz. 21 Sickerwasserprognose 21
Rz. 15 Staatliche Geologischen Dienste 15
Rz. 1 ungesättigte Zone 1
ungespanntes Grundwasser 25
Variogrammanalyse 27
Verlagerungsgeschwindigkeit (Sickerwasser) 9
vulnerability 3
Wasserhaushaltsberechnungen 19

1 Einführung

1 Aufgrund der Heterogenität der Lagerungsverhältnisse in räumlicher und stofflicher Hinsicht sind die Verweilzeiten des Sickerwassers bis zum Erreichen der **Grundwasseroberfläche** zumeist stark gespreizt. Im Gegensatz zu grundwasserdynamischen Prozessen, bei denen über die Impulsweiterleitung nach einem Niederschlagsereignis ein Anstieg der Grundwasserstände auch in größeren Tiefen in rascher zeitlicher Abfolge geschehen kann (Wittenberg et al. 2011), erfolgt der mit dem **Sickerwasser** mitgeführte Stoffeintrag in das **Grundwasser** erst, wenn die gesamte **ungesättigte Zone** durchsickert ist.

2 Die Verweilzeiten des Sickerwassers können dafür verwendet werden, die allgemeine, **intrinsische Schutzfunktion** der **Grundwasserüberdeckung** gegenüber von oben mit dem Sickerwasser eindringenden **Schadstoffen** in das Grundwasser zu charakterisieren. Ihre Kenntnis ist somit eine wichtige Grundlage für Planungen und Maßnahmen im Hinblick auf einen vorsorgenden **Grundwasserschutz**, für prognostische Aussagen über die potenzielle Grundwassergefährdung sowie zur Erfüllung der grundwasserbezogenen Aufgaben der europäischen Wasserrahmen- und **Grundwasserrichtlinie** [EG 2000, EG 2006] sowie der darauf aufbauenden deutschen **Grundwasserverordnung** [GrwV 2011, Keppner 2011].

2 Grundlagen zur Ermittlung der Sickerwasserverweilzeiten

2.1 Definition der Empfindlichkeit des Grundwassers

3 Die Empfindlichkeit des Grundwassers gegenüber dem Eintrag von Schadstoffen hängt von den pedologischen und geochemischen Eigenschaften der Versickerungszone sowie den hydrogeologischen Lagerungsbedingungen der **Grundwasserkörper** ab. Die Empfindlichkeit oder Verletzlichkeit (**vulnerability**) des Grundwassers bzw. die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung ist an verschiedenen Orten unterschiedlich ausgeprägt. Physi-

kalische, chemische und biologische Prozesse in der ungesättigten Zone führen zu Abbau, Filterung, Adsorption, Verdünnung oder Verzögerung des Transportes von Stoffen in das Grundwasser. Das Ausmaß, in dem die diese Prozesse wirken und damit einer potentiellen Verschmutzung des Grundwassers entgegenwirken, ist von den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Grundwasserüberdeckung, insbesondere der Böden abhängig. Während die allgemeinen Zusammenhänge zwischen pedologischen, geologischen sowie hydrogeologischen Lagerungsbedingungen und der **Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit** recht einfach sind, ist die exakte Quantifizierung der Prozesse bzw. Potentiale, die die Empfindlichkeit determinieren, kompliziert.

So ist der Zusammenhang zwischen einer mächtigen, wenig durchlässigen **Deckschicht** sowie einer daraus resultierenden relativen Geschütztheit des darunterliegenden Grundwasserleiters und im Gegensatz dazu einer geringmächtigen, stark durchlässigen Deckschicht mit einem gegenüber Schadstoffeintrag empfindlichen **Grundwasserleiter** leicht verständlich. Die Bewertung der Prozesse hingegen, welche die unterschiedliche Verschmutzungsempfindlichkeit an verschiedenen Orten bedingt sowie deren Identifizierung zu reproduzierbaren Einheiten bzw. quantifizierbaren Parametern ist jedoch kompliziert. 4

Reg: Grundwasserleiter
Reg: Deckschicht

Unterschieden werden muss zwischen der intrinsischen und der spezifischen Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers. Erstgenannte bezieht sich ausschließlich auf die natürliche, geogene Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers, die durch die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung bedingt ist. Sie ist nach Hannappel & Voigt (1999) das worst case-Szenario eines Schadstoffeintrages in die ungesättigte Zone, bei dem keine Wechselwirkungen des Schadstoffes mit den Medien stattfinden. Die spezifische Empfindlichkeit hingegen bezieht die möglichen Auswirkungen menschlichen Handelns, insbesondere den Eintrag von Schadstoffen in den Untergrund, mit ein. Letztere ist immer im Hinblick auf eine bestimmte Nutzung bzw. einen von dieser Nutzung ausgehenden potentiellen **Schadstoffeintrag** in das Grundwasser zu betrachten. Dabei spielen nicht nur die geologisch-hydrologischen Randbedingungen, sondern vor allem das stoffspezifische Verhalten des zu betrachtenden Schadstoffes und dessen Mengen eine Rolle. 5

Reg: Schadstoffeintrag

Foster (1998) postuliert, dass Grundwasser überall empfindlich gegenüber an der Oberfläche eingetragenen Schadstoffen sei, es unterscheide sich räumlich lediglich durch unterschiedliche Zeiträume, in denen Effekte fest- 6

gestellt werden können. Darauf bezogen und in Anlehnung an Voigt et al. (2003) wird im Folgenden die Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers an der Verweilzeit des in den Untergrund eindringenden Niederschlagswassers bis zum Erreichen der Grundwasseroberfläche nach vollständigem Transport durch die ungesättigte Versickerungszone gemessen. Sie ist also abhängig von den Wechselwirkungs- und Abbauprozessen in der ungesättigten Zone, die die Ausbreitung der Stoffe verhindern bzw. verzögern können. Die Empfindlichkeit ist keine direkt parametrisierbare Größe, sie kann nicht durch einen spezifischen Wert unmittelbar beschrieben oder gemessen werden. Zudem unterscheidet sie sich auch von Ort zu Ort, ist also räumlich in der Natur sehr heterogen ausgeprägt.

Kap: Nummer/2.2

2.2 Algorithmus zur Berechnung der Verweilzeiten des Sickerwassers nach der DIN 19732

7 Die Verweilzeiten des Sickerwassers Zone können mit dem Algorithmus der **DIN 19732** (1997) für die gesamte ungesättigte Zone berechnet werden. In die Ermittlung gehen folgende Parameter ein: Reg: DIN 19732

8 – die Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung, also der **Flurabstand** des oberflächennahen ungespannten bzw. gespannten Grundwassers, Reg: Grundwasserneubildungsrate Reg: Flurabstand
– die **Feldkapazität** der gesamten Grundwasserüberdeckung, also der Bodenzone und der darunter liegenden ungesättigten Zone, Reg: Feldkapazität
– die flächendifferenzierte **Grundwasserneubildungsrate**.

9 Die Verweilzeit des Sickerwassers wird aus der **Verlagerungsgeschwindigkeit** des Sickerwassers und der Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung berechnet: Reg: Verlagerungsgeschwindigkeit (Sickerwasser)

$$t_s = M/v_s$$

oder

$$t\ F_s = \Sigma\ M_i \times FK_i\ /\ GWNB = (M_1\ FK_1 + M_2\ FK_2 + \ldots + M_e \times FK_n)\ /\ GWNB$$

dabei ist:

$v_s = GWNB/FK$	Verlagerungsgeschwindigkeit des Sickerwassers, in dm $\times\ a^{-1}$,
GWNB	Grundwasserneubildungsrate in mm $\times\ a^{-1}$

Berechnung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone nach der DIN 19732 zur Standortbewertung im Hinblick auf die Grundwassergefährdung **4403**

FK	durchschnittliche Feldkapazität der gesamten Grundwasserüberdeckung in mm × dm^{-1}
FK_i	Feldkapazität der n-ten Schicht des Bodens bzw. der tieferen Grundwasserüberdeckung in mm dm^{-1},
M	Mächtigkeit der gesamten Grundwasserüberdeckung in dm
M_i	Mächtigkeit der n-ten Schicht des Bodens bzw. der tieferen Grundwasserüberdeckung in dm

Die Verlagerungsgeschwindigkeit des Sickerwassers ist der Quotient aus der Sickerwasser- bzw. der Grundwasserneubildungsrate und dem Volumenanteil an Wasser im Boden bzw. der tieferen Grundwasserüberdeckung. Zur Charakterisierung des Wassergehaltes wird die Feldkapazität als Volumenanteil eingesetzt. **10** Reg: mikrobieller Abbau Reg: Adsorption

Die in den Untergrund eingetragenen Stoffe verbleiben unterschiedlich lang in der ungesättigten Zone, wodurch die dort stattfindenden Prozesse (**Adsorption, mikrobieller Abbau**) sich entsprechend differenziert auf die Konzentrationen beim Zutritt zum Grundwasser in der darunter liegenden gesättigten Zone auswirken können. Die folgenden Einschränkungen für die Gültigkeit der mit der DIN 19732 berechneten Verweilzeiten sind zu beachten):

- Die Verlagerungsgeschwindigkeit beschreibt den Massenschwerpunkt einer Verlagerungsfront. Der durch hydrodynamische Dispersion verursachte voraus- oder nacheilende Stofffluss wird dabei nicht berechnet. **11** Reg: Makroporenfluss
- Bevorzugte Fließwege, z. B. **Makroporenfluss**, können je nach Aufenthaltsort des Stoffes die Geschwindigkeit erhöhen – wenn der Stoff direkt an der Oberfläche von Poren vorliegt – oder verringern – wenn der Stoff in der Bodenmatrix vorliegt.
- Prozesse des **Makroporenflusses** und des preferential flow können nicht berücksichtigt werden. Diese Prozesse spielen vor allem in bindigen, quellfähigen, gefügereichen Böden eine Rolle.
- Auf Standorten mit Grundwasseranschluss führt der kapillare Aufstieg zu einer Minderung der Netto-Sickerwasserrate, da ein Teil der winterlichen Versickerung während des Sommerhalbjahres wieder in den Wurzelraum transportiert wird. Inwieweit diese oszillierende Wasserbewegung zur Grundwasserbelastung führt, hängt davon ab, ob die Verlage-

rungsgeschwindigkeit während des Winterhalbjahres ausreicht, die Stoffront bis zur Grundwasseroberfläche zu verdrängen. In diesen Fällen sollte die Sickerwasserrate für das hydrologische Winterhalbjahr gesondert berechnet werden.

12 Die Verweilzeit wird also aus bodenphysikalischen, hydrologischen und hydrogeolo-gischen Größen über ein einfaches Modell bestimmt. Die Methode der DIN 19732 hat den großen Vorteil, dass sie anhand vorhandener digitaler Daten zum Untergrund aus dem Fundus der Landesbehörden angewendet werden kann. Sie liefert zudem konkrete Zeitangaben, wie lange ein Wassertropfen braucht, um von der Erd- bis zur Grundwasseroberfläche zu gelangen.

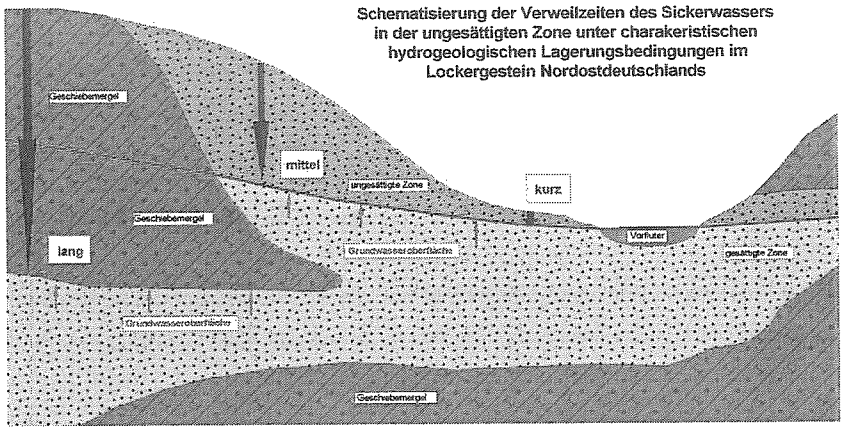
13 Der Berechnung der Verweilzeiten kann insbesondere im quartären Lockergestein einfach angewendet werden, hier treten auch aufgrund der unterschiedlichen Lagerungsverhältnisse sehr große Differenzen auf. Abb. 1 zeigt dies schematisch anhand charakteristischer Lagerungsbedingungen im nordostdeutschen Lockergestein mit daraus resultierend unterschiedlich langen Verweilzeiten des Sickerwassers.

Abb. 1

Abb: 1

14 **Abb. 1:** *Schematisierung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone in Lockergesteinsgebieten*

Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_1.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_1.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 1



15 Die Methode wurde bereits in mehreren Regionen Norddeutschlands (Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Berlin) angewendet (Heinkele et al. 2001, BTU 2003, HYDOR 2011) und als geeigneter im Vergleich mit der Bewertungsmethode der **Staatlichen Geologischen Dienste** (im Folgenden: „SGD"-Methode, Hölting et al. 1995) bewertet (s. Kap. 4). Die berechneten

Reg: Staatliche Geologischen Dienste

Nr. 4

Verweilzeiten waren jeweils geeignet, die im eiszeitlich überprägten Untergrund stattfindenden Prozesse in z. T. sehr langen Zeiträumen darzustellen. Zugleich konnten sie als Grundlage für eine effektive Maßnahmenplanung zur Erreichung der Umweltziele herangezogen werden. Als Input-Daten für die Modellierung des Stoffhaushaltes im System Boden – ungesättigte Zone – Grundwasser mit einer ebenfalls in Norddeutschland erprobten Methode (Wendland et al. 2010) werden die Daten zu den Verweilzeiten ebenfalls benötigt

Kap: Nummer/2.3

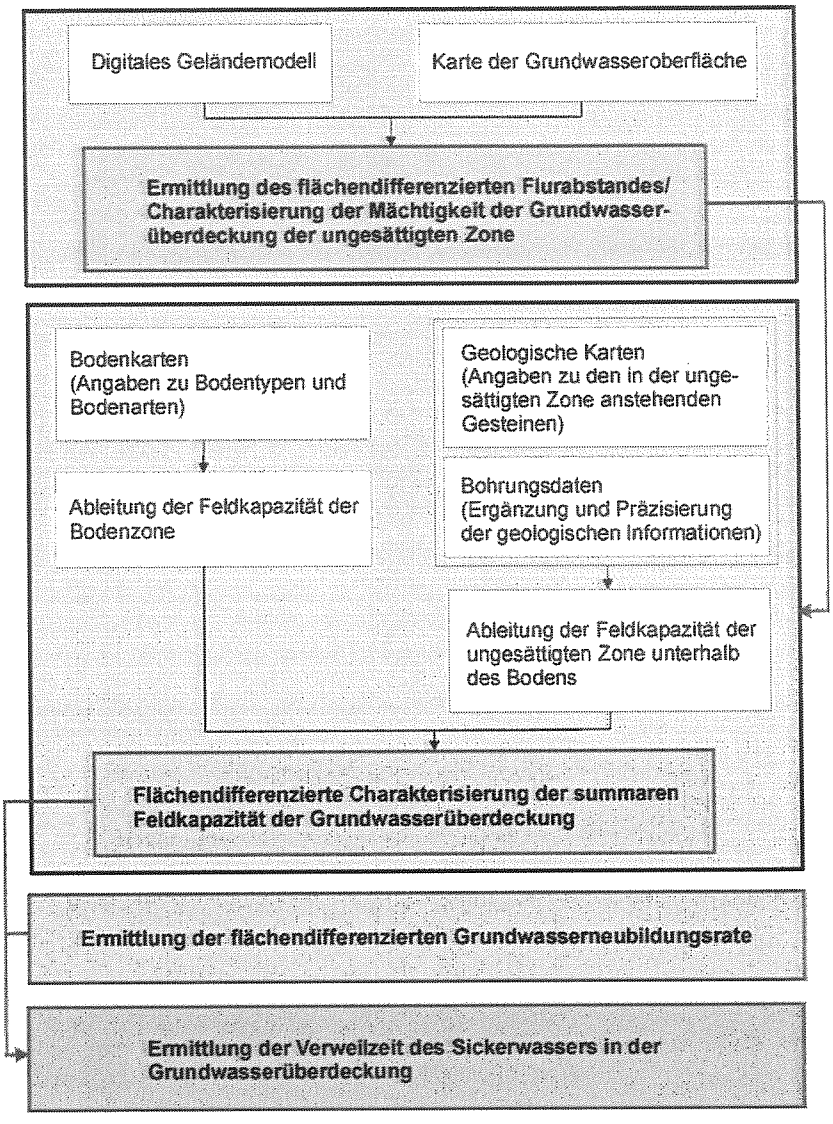
2.3 Bearbeitungskonzept

Abb. 2

Abb. 2 dokumentiert in schematischer Form den Bearbeitungsweg zur GIS- **16**
bezogenen Berechnung der Verweilzeiten sowie die digital einzubeziehenden Daten. Aus bisherigen Arbeiten in Norddeutschland ist bekannt, dass in der Reihenfolge Feldkapazität – Grundwasserneubildung – Flurabstand die Bedeutung der Faktoren bei der Berechnung der Verweilzeiten zunimmt (BTU 2003).

Abb: 2
Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_2.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_2.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 2

17 **Abb. 2:** *Schema des Bearbeitungskonzeptes*



Kap: Nummer/3

3 Anwendungsbeispiel: Berechnung der Verweilzeiten des Sickerwassers für die gesamte Landesfläche von Mecklenburg-Vorpommern

Kap: Nummer/3.1

3.1 Datengrundlagen

Folgende digital vorhandene Datengrundlagen aus den Beständen des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG MV) gingen in die Bearbeitung ein, in den folgenden Kapiteln werden diese exemplarisch erläutert: **18**

- Punktbezogene Höhenangaben aus dem digitalen Geländehöhenmodell des Landes (DGM 25), **19** Reg: Wasserhaushaltsberechnungen Reg: Grundwassergleichen
- Daten zu oberirdischen Fließ- und Standgewässern (z. B. Isobathen der Seevermessung),
- **Grundwassergleichen** der Druckflächen des oberflächennahen Grundwassers,
- Daten der Hydrogeologischen Karte 1: 50 000 (Voigt 1987) zu den flächenhaften Lagerungsbedingungen der Grundwasserleiter,
- Schichtbezogene, lithologische und genetische Beschreibungen von **Bohrungen** des Landesbohrdatenspeichers des LUNG MV,
- Feldkapazitäten der Bodenzone aus dem Lachinformationssystem Boden (LUNG 2010) sowie
- Flächendifferenzierte Grundwasserneubildungsraten im Ergebnis von **Wasserhaushaltsberechnungen** im Auftrag des LUNG (HGN 2008).

Kap: Nummer/3.2

3.2 Ermittlung der Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung

Der Grundwasserflurabstand ist in der DIN 4049-3 (s. auch Hölting 2009) als lotrechter Höhenunterschied zwischen der Erdoberfläche und der Grundwasseroberfläche definiert. Wird der Grundwasserleiter im Lockergestein von schlecht durchlässigen, bindigen Schichten – also Grundwasserhemmern, wie z. B. Geschiebemergel oder -lehm – überlagert, dass das Grundwasser nicht so hoch ansteigen kann, wie es seinem hydrostatischen Druck entspricht, liegt gespanntes Grundwasser vor. In diesem Fall ist der Flurabstand als der lotrechte Höhenunterschied zwischen der Geländeoberkante und der Unterkante des grundwasserhemmenden Geschiebemergels definiert, der den Grundwasserleiter überlagert. **20**

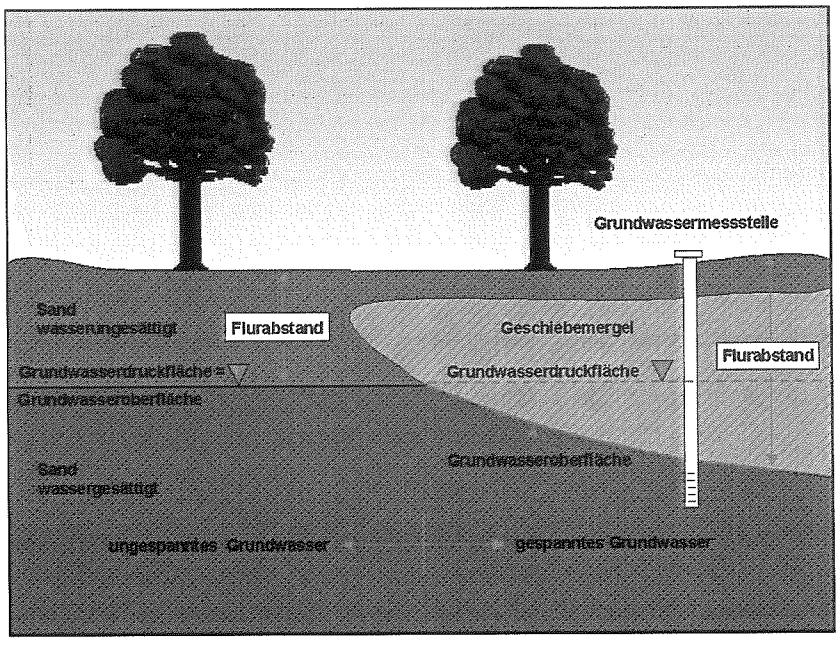
Hierin unterscheidet sich der Lösungsweg der DIN 19732 von der **Sickerwasserprognose** nach **Bundesbodenschutzverordnung** (BBodSchV 1999), da dort nicht die o. g. hydrogeologische Definition des Flurabstandes An- **21** Reg: Sickerwasserprognose Reg: Bundes-Bodenschutzverordnung

wendung findet. Vielmehr wird die ungesättigte Zone nach unten hin auch in gespannten Gebieten durch den Grundwasserdruckspiegel bzw. dessen Schwankungsbereich definiert. Bei geringdurchlässigen bindigen Bildungen, die in Form mächtiger Geschiebemergelbildungen in Norddeutschland im Untergrund weit verbreitet sind, treten dadurch bedingt große Unterschiede auf. Abb. 3 erläutert das Konzept in grafischer Form:

Abb. 3

Abb: 3 Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_3.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_3.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 3

22 **Abb. 3:** *Hydrogeologische Begriffe (aus: Hannappel & Limberg 2007)*



23 Die flächendeckende Kenntnis von Gebieten mit **gespanntem Grundwasser** ist also eine erste Voraussetzung zur Erarbeitung des Grundwasserflurabstandes. Auf Grundlage der HK 50 wurden 10.213 km^2 als „ungespannt" (etwa 44 % der Landesfläche) und 12.141 km^2 (etwa 56 % der Landesfläche), als „gespannt" ausgewiesen. Abb. 4 zeigt das Ergebnis in kartografischer Form.

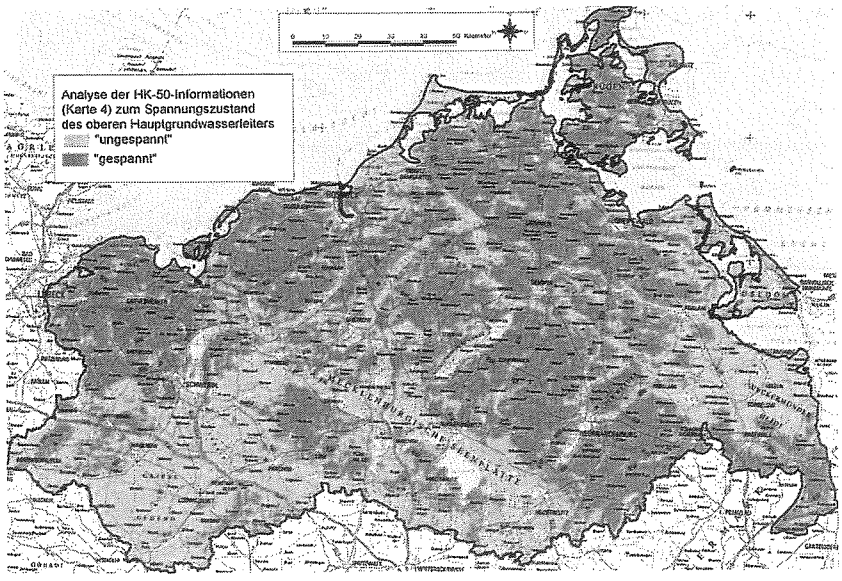
Reg: gespanntes Grundwasser

Abb. 4

Abb: 4

Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_4.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_4.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 4

Abb. 4: *Ergebnis der Ausweisung von Gebieten mit gespanntem Grundwasser auf Basis der HK 50 (Voigt 1987)* 24



Bei **ungespanntem Grundwasser** entspricht der Flurabstand der lotrechten Differenz zwischen der Gelände- und der Grundwasseroberfläche. Da diese Daten aktuell und landesweit zur Verfügung standen (HYDOR 2010), konnte der Flurabstand im GIS automatisiert errechnet werden. Sowohl die Druckflächen als auch die Flurabstände in den ungespannten Gebieten lagen als Rasterdaten in der Gitterweite und den Abmessungen des DGM 25 vor. 25 Reg: ungespanntes Grundwasser

In den gespannten Gebieten hingegen musste zur Ermittlung des Flurabstandes zunächst die Unterkante der – den Grundwasserleiter überlagernden – bindigen Deckschicht ermittelt werden. Dafür wurden insgesamt 22.139 Bohrungen mit 166.107 vertikal definierten Schichtdatensätzen bis 50 Meter Tiefe verwendet, die jeweils lithologische und genetische Informationen enthalten. Mit diesen Daten – und unter Hinzuziehung kartenbasierter Zusatzinformationen aus der HK 50 – wurde pro Bohrung der Flurabstand in Meter unter Gelände festgelegt. Unterschieden werden musste hierbei wiederum zwischen gespannten und ungespannten Grundwässern, da unter den glaziären Bedingungen des Landes auch ungespanntes Grundwasser unter einer bindigen Bedeckung vorkommen können. 26

Abb. 5

27 Abbildung 5 zeigt die Häufigkeitsverteilungen mit deutlich niedrigeren Werten von ungespannten Grundwässern, da hier die Mächtigkeit der bindigen Deckschichten im Hangenden geringer ist. Diese Daten wurden anschließend einer **Variogrammanalyse** (s. Abbildung 6) unterzogen und mit **Kriging** in das regelmäßige 100 × 100-Meter-Berechnungsraster überführt.

Reg: Variogrammanalyse
Reg: Kriging

Abb. 6

Abb: 5

28 **Abb. 5:** *Flurabstände von ungespannten (links) und gespannten (rechts) Grundwässern unter jeweils bindiger Grundwasserüberdeckung*

Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_5.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_5.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 5

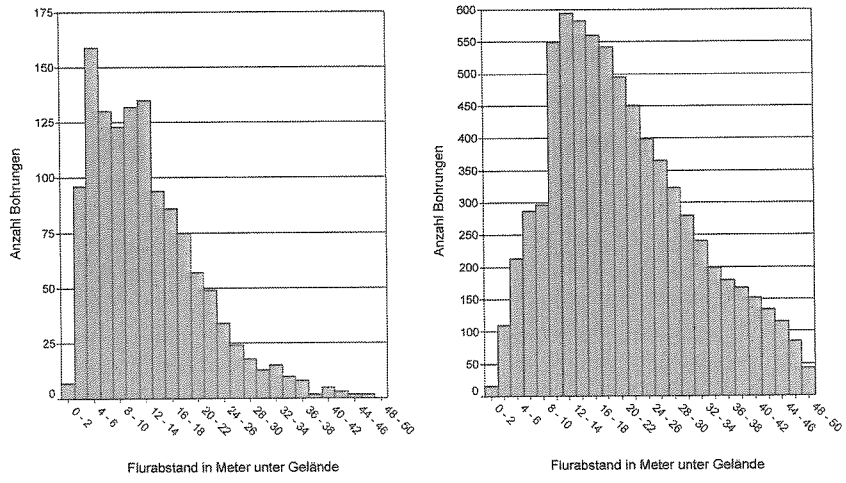


Abb: 6

Abb. 6: *Variogramm der Regionalisierung der bohrungsbezogen und mächtigkeitsgewichtet für die ungesättigte Zone unterhalb des Bodens aufsummierten Feldkapazitätswerte* 29

Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_6.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_6.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 6

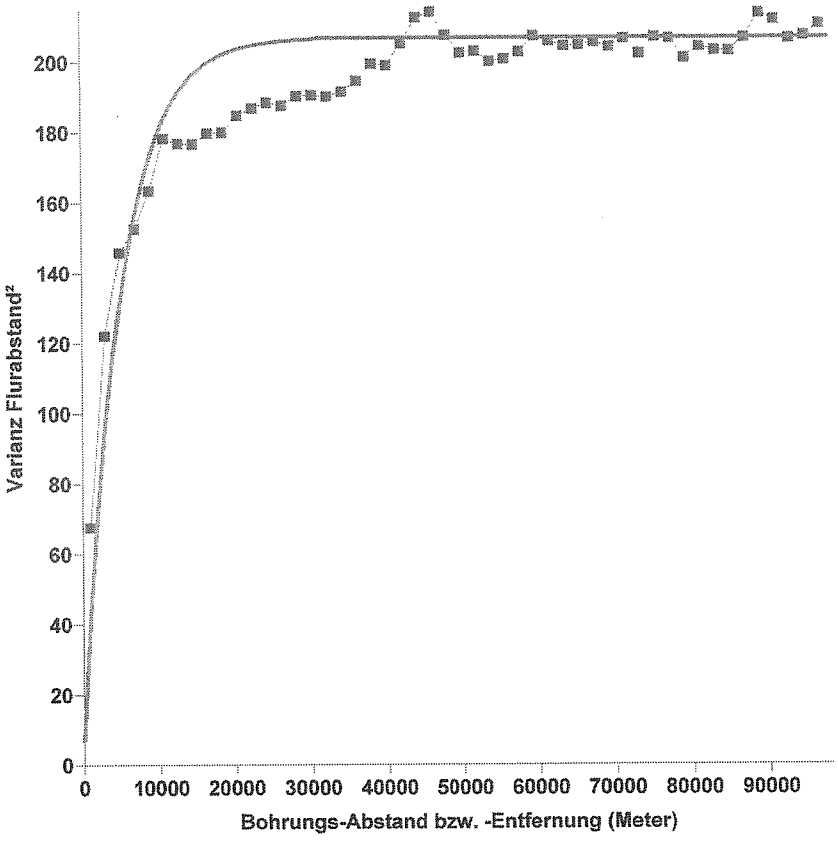


Abb. 7

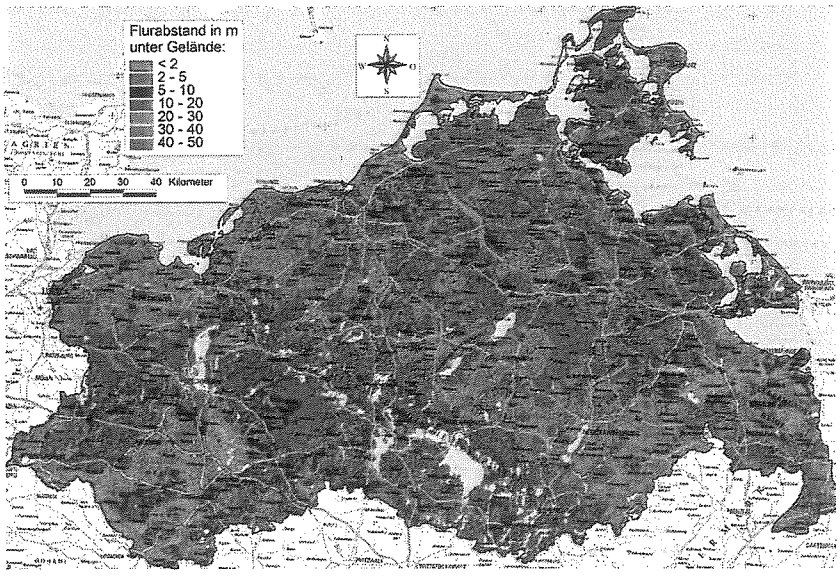
Zusammen mit den Flurabständen in den Gebieten mit ungespanntem Grundwasser sind diese Berechnungsergebnisse in Abbildung 7 dargestellt. Erkennbar sind die großräumigen hydrogeologischen Lagerungsverhältnisse des Landes mit den zusammenhängenden **Geschiebemergelhochflächen** (Flurabstände zumeist > 10 Meter) sowie die Niederungen mit den Entlastungsgebieten. Hier befindet sich das Grundwasser oberflächennah in weniger als 2 Meter Tiefe. 30

Reg: Geschiebemergelhochflächen

Abb: 7

31 **Abb. 7:** *Flurabstand des oberen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserleiters*

Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_7.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_7.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 7



Kap: Nummer/3.3

3.3 Ermittlung der Feldkapazitäten der Grundwasserüberdeckung

Reg: Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5

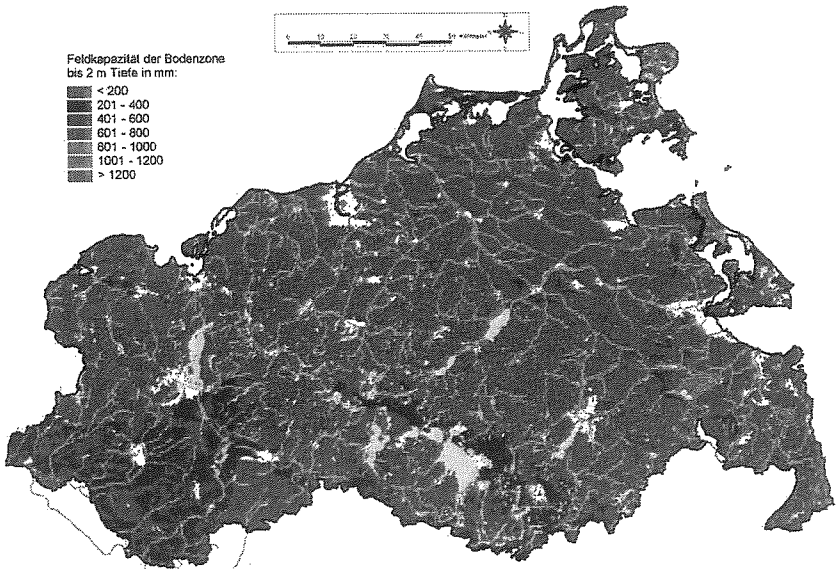
32 Die Feldkapazitäten wurden ebenfalls anhand der Schichtbeschreibungen der Bohrungsdaten und unter Verwendung von in der **Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5** (2005) aufgeführten tabellarischen Zuordnungen ermittelt. Für den Bereich des Bodens bis 2 Meter Tiefe wurden vom LUNG digitale Daten zu den summarischen Feldkapazitäten übermittelt, die anhand hoch aufgelöster bodenkundlicher Kartenwerke und ebenfalls unter Nutzung der KA 5 erstellt worden waren. Die Karte in Abb. 8 dokumentiert diese Daten.

Abb. 8

Abb: 8

Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_8.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_8.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 8

Abb. 8: *Summarische Feldkapazitäten der Bodenzone bis 20 dm (Daten vom LUNG übergeben; Herleitung nach der Verknüpfungsregel 1.11 der Methodendokumentation Bodenkunde)* 33



Die Ermittlung der Feldkapazitäten der ungesättigten Zone unterhalb der Bodenzone wurde anschließend mit Bohrungsdaten vorgenommen. Unterschieden wurde grundsätzlich wieder nach gespannten und ungespannten Gebieten. In ungespannten Gebieten wurden zunächst alle Einzelschichten derjenigen 39 781 Bohrungen aus der Datenbasis herausgefiltert, die sich oberhalb von 2 Meter Tiefe befinden und damit nicht in die weitere Bearbeitung einzugehen brauchen, da hier bereits die flurabstandbezogenen Feldkapazitäten für die Bodenzone ermittelt worden sind. Anschließend wurden Bohrungen mitsamt ihrer Schichtdaten ermittelt, deren Endteufe geringer lag als die Grundwasseroberfläche in Meter unter Gelände, da mit ihnen keine vollständige Ermittlung der Feldkapazitäten in der ungesättigten Zone möglich war. 34

Der nunmehr noch 31 330 Bohrungen umfassende Datensatz wurde in einem weiteren Bearbeitungsschritt um diejenigen Bohrungen reduziert, die in Entlastungsgebieten mit Flurabständen von weniger als 2 Meter liegen. Da hier die Informationen zur Feldkapazität bereits mit den Daten aus der Bodenzone ermittelt worden sind, liefern die schichtbezogenen Daten die- 35

ser Bohrungen keine weiteren verwertbaren Informationen. Es handelt sich 9210 Bohrungen, so dass nunmehr 22 120 Bohrungen für die weitere Bearbeitung verblieben. Bei diesen Bohrungen wurden alle Schichten eliminiert, die sich unterhalb der Grundwasseroberfläche befinden. Damit verbleiben 54 407 Schichtdatensätze. Die Unterkanten dieser Schichten wurden an der Grundwasseroberfläche „abgeschnitten", um ihre Mächtigkeiten exakt von 2 Meter unter Gelände bis zur Grundwasseroberfläche ermitteln zu können.

36 Die Zuordnung von Feldkapazitäten (FK) zu diesen Schichten geschah auf Grundlage der lithologischen und genetischen Angaben. Dafür wurden alle 54 407 Einzelschichten in Abhängigkeit von ihrer Beschreibung analysiert und FK-Werten in Anlehnung an die Werte aus der Tab. 70 für mittlere Trockenrohdichten und Poren $< 50\,\mu m$ (pF > 1.8) zugeordnet. In Tab. 1 sind diese Werte rot umrahmt. Insbesondere die in den letzten drei Zeilen aufgeführten Werte konnten hierfür verwendet werden, da es sich dabei um Bodenarten handelt, die auch in den Schichtbeschreibungen der Bohrungen enthalten sind.

Tab. 1

Berechnung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone nach der DIN 19732 zur Standortbewertung im Hinblick auf die Grundwassergefährdung **4403**

Abb: 8a

Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_8a.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_8a.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 8a

Tab. 1: *Feldkapazitäten in Abhängigkeit von der Bodenart nach Tab. 70 der KA 5 (2005); rot umrahmt: verwendete Werte für die Zuordnung der Bohrungsdaten* 37

Bodenart	Luftkapazität Poren > 50 µm (pF < 1,8)[1]			nutzbare Feldkapazität Poren 0,2 bis 50 µm (pF 4,2 bis 1,8)[1]			Feldkapazität Poren ≤ 50 µm (pF ≥ 1,8)[1]		
Kurzzeichen	pt1+2	pt3	pt4+5	pt1+2	pt3	pt4+5	pt1+2	pt3	pt4+5
Ss[1]	36	32	27	9	7	7	14	11	10
Sl2	23	18	13	20	18	17	28	25	23
Sl3	18	15	10	22	18	17	34	27	25
Sl4	18	12	8	22	18	15	36	30	26
Slu	14	10	7	23	21	19	38	33	30
St2	24	20	15	18	16	13	26	22	18
St3	18	14	9	18	15	12	35	30	26
Su2	24	21	15	20	18	17	26	23	21
Su3	17	14	10	25	21	20	35	29	26
Su4	14	11	8	27	23	21	39	32	28
Ls2	13	9	6	21	16	14	40	34	31
Ls3	15	9	6	21	16	14	39	33	30
Ls4	15	11	7	20	16	13	39	32	28
Lt2	11	7	5	18	14	11	42	36	32
Lt3	8	5	3	17	12	10	45	39	35
Lts	10	6	5	17	14	11	44	37	31
Lu	12	7	4	21	17	15	41	36	33
Uu	10	7	3	30	26	23	43	38	35
Uls	13	8	5	24	22	21	39	35	33
Us	11	9	4	28	25	22	41	35	32
Ut2	10	6	3	28	26	23	40	37	35
Ut3	11	6	3	26	25	23	39	37	35
Ut4	12	7	3	23	21	19	39	37	35
Tt	4	3	2	15	13	12	51	43	35
Tl	5	4	3	15	13	11	48	41	35
Tu2	5	4	3	16	12	10	47	42	36
Tu3	8	6	3	17	13	10	45	38	35
Tu4	10	6	3	19	17	16	41	37	35
Ts2	5	4	3	16	13	12	47	39	34
Ts3	7	6	5	16	13	11	45	37	32
Ts4	13	10	6	17	14	11	43	32	30
Sande[1]									
fS, fSms, fSgs	34	31	23	10	9	8	16	14	12
mS, mSfs, mSgs	36	32	26	9	6	5	14	10	8
gS	38	33	29	8	5	4	12	8	6

Die übrigen in der Tabelle 1 aufgeführten Bodenarten wurden petrografischen Schichtbeschreibungen zugeordnet. Verwendet wurden hierfür ausschließlich die Einträge vor dem Semikolon in der Schichtbeschreibung, um eine Vereinfachung der z. T. sehr unübersichtlichen und detaillierten Beschreibungen zu erreichen. Bei 279 Bohrungen traten Schichtbeschreibun- 38

gen auf, die keinem FK-Wert zugeordnet werden konnten, zumeist sind das Schichten ohne oder mit nicht interpretierbaren Texten. Um keine Verzerrung der Werte zu generieren, wurden diese Bohrungen komplett aus dem Datensatz herausgenommen.

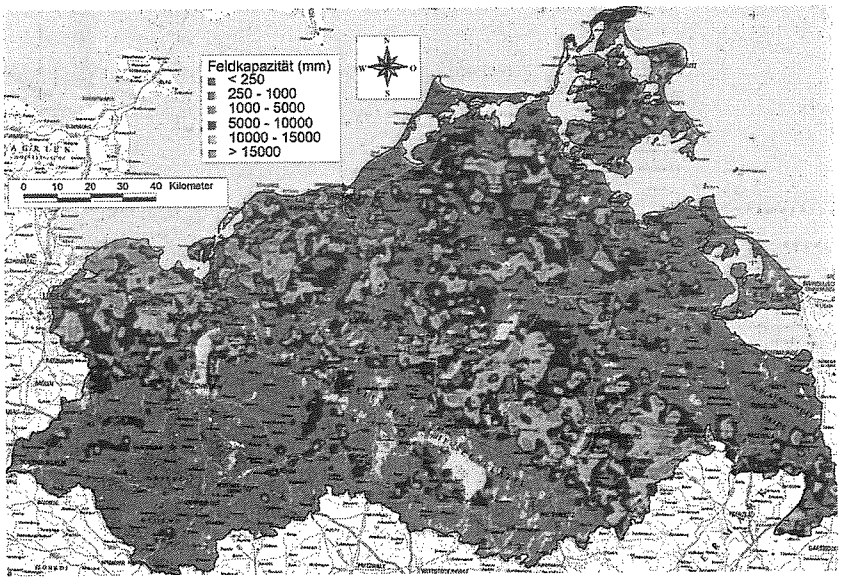
Abb. 9

39 Abbildung 9 zeigt die resultierenden Werte für die gesamte ungesättigte Zone. Deutlich erkennbar sind vergleichbare Strukturen wie bei den Flurabständen, da in den Grund- und Endmoränengebieten des Landes zugleich hohe Flurabstände und hohe Feldkapazitäten aufgrund der überwiegend bindigen Struktur der Sedimente vorliegen.

Abb: 9

40 **Abb. 9:** *Summarische Feldkapazitäten der gesamten Grundwasserüberdeckung von der Geländeoberfläche bis zur Grundwasseroberfläche inklusive des Bodens*

Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_9.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_9.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 9



Kap: Nummer/3.4

3.4 Flächendifferenzierte Grundwasserneubildungsraten

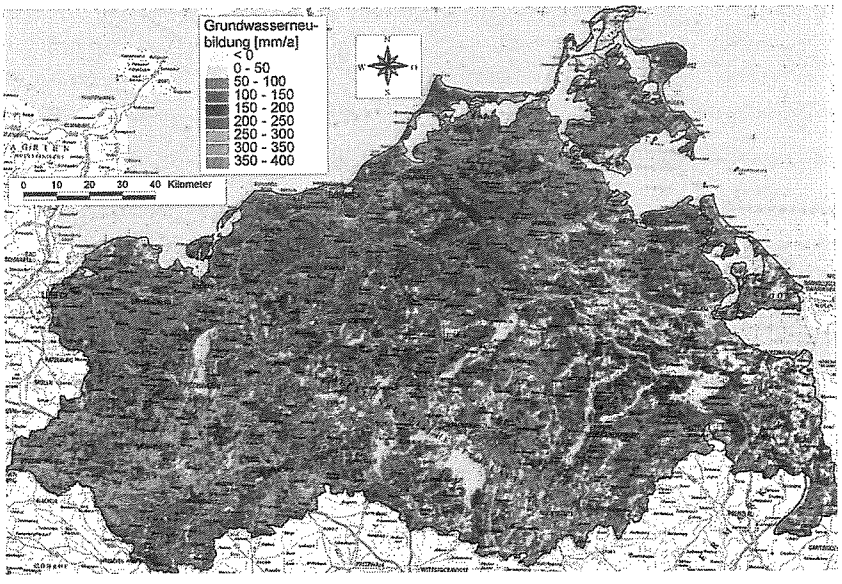
41 Als Datengrundlage zur Berücksichtigung der Grundwasserneubildungsraten bei der Ermittlung der Verweilzeiten wurden vom LUNG flächendifferenzierte Daten zur Versickerung übergeben, die aktuell in mehreren Arbeitsetappen auf Grundlage des ATV-Merkblattes M 504 erstellt und ausführlich dokumentiert wurden (HGN 2008).

Abb. 10 Abb. 10 zeigt die hieraus resultierende Übersichtskarte zu den Versickerungsraten unter Berücksichtigung des Direktabflusses, die für die hier durchzuführenden Berechnungen zur Ermittlung der Verweilzeiten den Grundwasserneubildungsraten gleichgesetzt wurden.

Der arithmetische Mittelwert der 371 945 Datensätze liegt bei 123 mm/a 42 Reg: Direktabfluss
(Maximum 419 mm/a), der Mittelwert ohne Berücksichtigung des **Direktabflusses** liegt bei 154 mm/a. Sehr hohe Raten (> 250 mm/a) sind im Südwesten, sehr niedrige (< 50 mm/a) bzw. negative Werte (Grundwasserzehrung) im Osten erkennbar. Hier zeigt sich sehr deutlich der Einfluss des Klimas (Parameter Niederschlag). Der Aufbau des Untergrundes (Parameter Direktabfluss) ist ebenfalls erkennbar, in Nordwestmecklenburg z. B. mit zwar hohen Niederschlägen aber ebenfalls hohen Direktabflussspenden (s.
Abb. 10 Abb. 10) liegen die Grundwasserneubildungsraten klar niedriger.

Abb: 10 **Abb. 10:** *Mittlere langjährige Grundwasserneubildungsraten in Mecklenburg-Vorpommern* 43

Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_10.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_10.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 10



Kap: Nummer/3.5

3.5 Verknüpfung der Teilinformationen zu den Verweilzeiten und regionale Übersicht

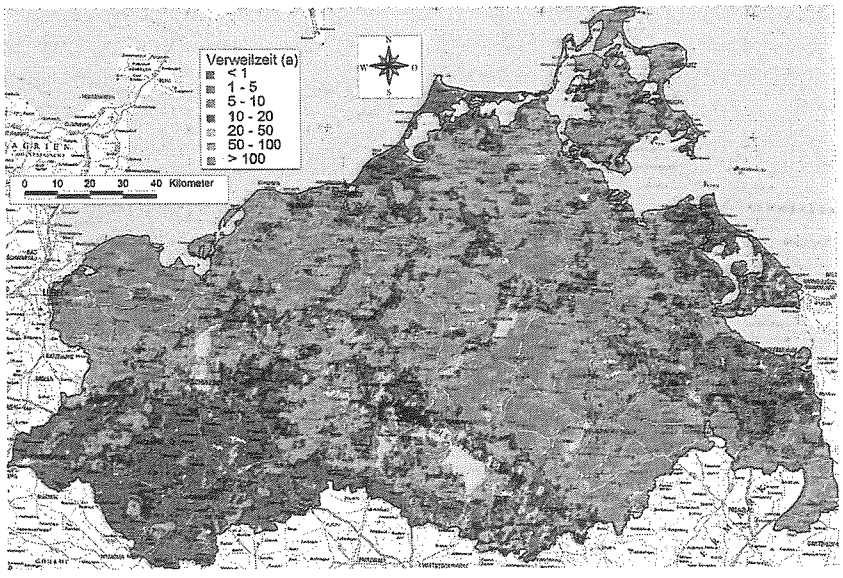
Abb. 11

44 Abschließend wurden die Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung berechnet. Abbildung 11 zeigt sie flächenhaft in einer siebenfach gewählten Intervallskalierung. Die Daten sind als GIS-lesbares Grid digital abgelegt und können in beliebiger Skalierung dargestellt werden. Die Karte zeigt sehr große Unterschiede der Verweilzeiten des Sickerwassers. In den Niederungen betragen sie oft nur wenige Jahre, manchmal auch nur wenige Wochen bis Monate. Hiervon betroffen ist z. B. der Südwesten des Landes mit überwiegend sandigen Substraten und entsprechend niedrigen Feldkapazitäten, hohen Neubildungsraten sowie geringen Flurabständen. In Entlastungsgebieten mit primär anmoorigen Auflagen hingegen können die Verweilzeiten trotz niedriger Flurabstände aufgrund der dort höheren Feldkapazitäten auch höher liegen, das betrifft z. B. die Ueckermünder Heide im Osten des Landes an der Grenze zu Polen, wo auch die Niederschläge und daher die Neubildungsraten des Grundwassers entsprechend gering sind. Im deutlichen Gegensatz dazu stehen die sich von Nordwest nach Südost – entsprechend der Vereisungsvorstöße bzw. Endmoränenlagen – erstreckenden Hochflächengebiete mit zumeist lehmigen Substraten und hohen Flurabständen. Hier liegen die Verweilzeiten des Sickerwassers in großen Landesteilen bei bis zu 100 Jahren und mehr, z. B. südöstlich von Neubrandenburg im Südosten des Landes im Bereich der Feldberger Seenlandschaft an der Landesgrenze zu Brandenburg.

Abb: 11

Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_11.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_11.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 11

Abb. 11: *Verweilzeiten des Sickerwassers in der gesamten Grundwasserüberdekkung* 45



Kap: Nummer/3.6

3.6 Analyse der Berechnungsfaktoren der Verweilzeiten

Tab. 2

Für die drei Eingangsvariablen sowie die Berechnungsvariable „Verweilzeit" sind in Tab. 2 die sich ergebenden statistischen Maßzahlen für den landesweiten Datensatz dokumentiert. 46

Tab. 2: *Statistische Maßzahlen der Verteilung der Faktoren an allen berechneten Gitterpunkten im Ergebnis der geostatistischen Regionalisierung* 47

Statistische Maßzahl	Flurabstand (m)	summarische Feldkapazität (mm)	Grundwasserneubildung (mm/a)	Verweilzeit (a)
Minimum	< 0	0	0,1	0
5 %-Perzentil	0,2	17	32,7	0,6
10 %-Perzentil	0,8	218	47,7	1,8
25 %-Perzentil	3,3	920	79,4	8,1

Statistische Maßzahl	Flurabstand (m)	summarische Feldkapazität (mm)	Grundwasserneubildung (mm/a)	Verweilzeit (a)
Median	**13,8**	**3.254**	**104**	**29,7**
75 %-Perzentil	26,4	71.61	197	76,1
90 %-Perzentil	37,4	10.835	255	135,5
95 %-Perzentil	42,6	12.743	272	185,4
Maximum	92,6	19.477	418,7	105.250*
arithm. Mittelwert	16,3	4.475	131,5	68,1
Standardabweichung	13,9	4.124	76,8	693,1*
Interquartilbereich	23,1	6.241	117,7	67,94

* diese Angaben sind nicht interpretierbar, da sie durch minimale Grundwasserneubildungsraten (z. B. 0.1 mm/a) numerisch zu stark beeinflusst sind

48 Der Medianwert ist jeweils hervorgehoben, da diesen Werten bei der sehr großen Anzahl der Rasterzellen eine sehr gute Erklärungskraft zukommt. Beim Flurabstand z. B. liegt der Wert 2.5 Meter niedriger als der arithmetische Mittelwert, bei der Feldkapazität hingegen ist die Abweichung aufgrund vereinzelter sehr hoher Feldkapazitäten etwas deutlicher. Der Interquartilbereich – also die mittlere Hälfte aller Werte – liegt beim Flurabstand bei 23,1 Meter und bei der Verweilzeit bereits bei 68 Jahren. Diese starke Spreizung wird durch den Faktor Grundwasserneubildung verursacht, dessen regionale Variabilität sehr unterschiedlich lange Verweilzeiten des Sickerwassers bewirkt.

Tab. 3 Zur besseren Nachvollziehbarkeit der berechneten Verweilzeiten sind in Tab. 3 in Form einer Matrix charakteristische Perzentilwerte der summarischen Feldkapazität denjenigen der Neubildungsrate gegenübergestellt sowie die sich nach der Formel der DIN 19732 berechneten Verweilzeiten in Jahren farblich unterschiedlich nach der Länge der Jahre dokumentiert.

Tab. 3: *Matrix von Eingangsdaten: gerundete Perzentile der summarischen Feldkapazität (sFK) und der Neubildungsraten (NB) sowie berechnete Verweilzeiten (t) in Jahren (a) nach der Formel der DIN 19732: t = FK/GWNB* 49

	Perzentil	5 %-P.	10 %-P.	25 %-P.	50 %-P.	75 %-P.	95 %-P.	95 %-P.
Perzentil	NB ↓ sFK→	17 mm	218 mm	920 mm	3254 mm	7161 mm	10835 mm	12743 mm
5 %-P.	33 mm/a	0,5 a	6.6 a	27.9 a	98.6 a	217.0 a	328.3 a	386.2 a
10 %-P.	48 mm/a	0,4 a	4.5 a	19.2 a	67.8 a	149.2 a	225.7 a	265.5 a
25 %-P.	79 mm/a	0,2 a	2.8 a	11.6 a	41.2 a	90.6a	137.2 a	161.3 a
50 %-P.	104 mm/a	0,2 a	2.1 a	8.8 a	29.7 a	68.9a	104.2 a	122.5 a
75 %-P.	197 mm/a	0,1 a	1.1 a	4.7 a	16.5 a	36.4a	55.0 a	64.7 a
90 %-P.	255 mm/a	0,1 a	0.9 a	3.6 a	12.8 a	28.1a	42.5 a	50.0 a
95 %-P.	272 mm/a	0,1 a	0.8a	3.4a	12.0 a	26.3a	39.8 a	46.8 a

Geringe Verweilzeiten von weniger als 5 Jahren (rot markiert in Tab. 3) ergeben sich vor allem bei sehr niedrigen summarischen Feldkapazitäten, das sind ganz überwiegend die Entlastungsgebiete mit einem Flurabstand von weniger als 20 dm. Bei summarischen Feldkapazitäten von 920 mm, also z. B. einem Feinsand mit einer Feldkapazität von 14 mm/dm und einem Flurabstand von 66 dm, liegen die Verweilzeiten bereits bei Neubildungsraten von weniger als 197 mm bei mehr als 5 Jahren. Regional bedeutsam treten diese geringen Zeiten vor allem im Südwesten des Landes, auf der Halbinsel Darß/Zingst, im Bereich der Ueckermünder Heide sowie in den großen Niederungen bzw. Flusstälern mit den hier assoziierten Entlastungsgebieten auf, z. B. in der Umgebung des Trebelkanals bei Tribsees, zwischen dem Malchiner und dem Kummerower See oder beim Kleinen Landgraben östlich von Altentreptow. 50

Sehr hohe Verweilzeiten von mehr als 100 Jahren (grün markiert) treten dagegen erst bei summarischen Feldkapazitäten von mehr als 7161 mm bzw. bei Neubildungsraten von weniger als etwa 110 mm/a auf, das sind zumeist die Hochflächengebiete mit bindigen Substraten. Verweilzeiten zwischen 5 und 100 Jahren (blau in Tab. 3) können bei nahezu allen Variationen der Eingangsparameter vorkommen, hier heben sich die Effekte z. T. auf. 51

52 Wie in Tab. 2 anhand des Medians dokumentiert, wurden nur für die Hälfte aller Rasterzellen Verweilzeiten von weniger als 29 Jahren berechnet. Das ist ein geringer Anteil, der durch die hydrogeologischen Lagerungspositionen der Grundwasserleiter des Landes verursacht wird. Erkennbar ist dies in der Karte in Abb. 11 sehr deutlich anhand der hohen Werte (> 50, z. T. > 100 Jahre) in den Hochflächengebieten mit bindiger Überdeckung in der Versickerungszone. Da die Geschiebemergel oftmals weit aushaltend und zusammenhängend verbreitet sind, ergeben sich für die betroffenen Grundwasserkörper sehr große Anteile für diese Verweilzeitklassen.

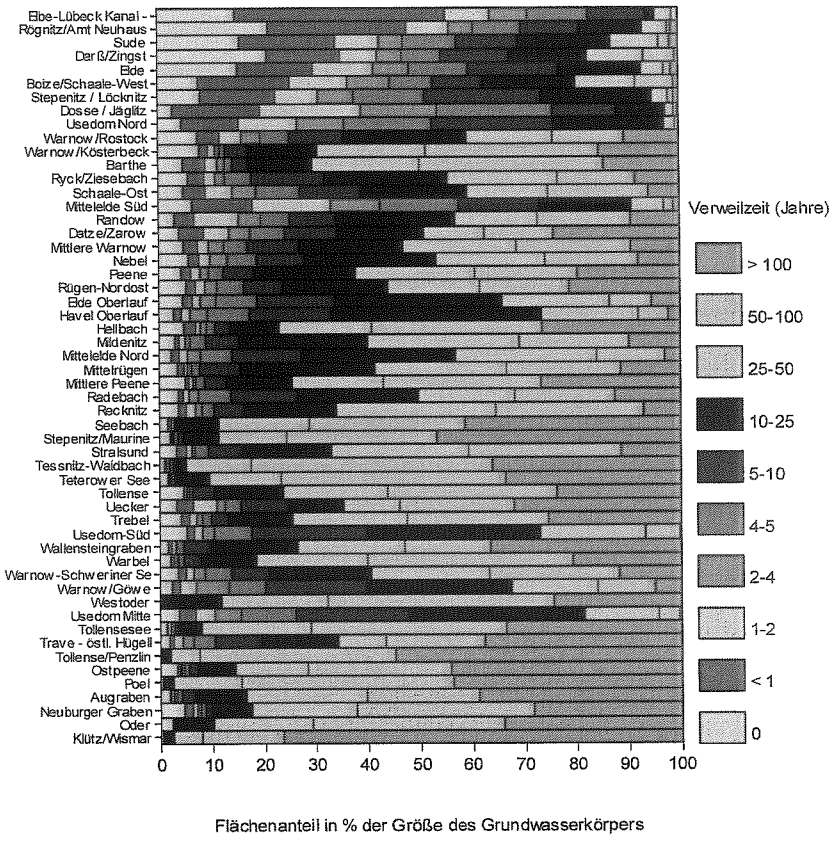
Abb. 12

53 Abb. 12 zeigt die durch den Verschnitt mit den Polygonen von 56 der 61 Grundwasserkörper (außer Vilm, Greifswalder Oie, Hiddensee, Rhin und Ummanz, GWK Darß/Zingst einheitlich für beide Teile ermittelt) berechneten Flächenanteile (ohne Gewässer) der Verweilzeitklassen.

Abb: 12

Grafik: 2012-05-01=Aufsatz_04403=Abb_12.tifS: 2012-01=ufsatz_04403=bb_12.tif V: 2012-05-01 T1: Abbildung 12

Abb. 12: *Flächenanteile der Verweilzeit-Klassen in Jahren pro Grundwasserkörper (GWK)* 54



Die Klasse „0" beinhaltet jeweils alle Flächen mit Grundwasser an der Erdoberfläche. Gebiete mit negativen Neubildungsraten sind ebenso wie Seeflächen nicht berücksichtigt. Sortiert sind die Grundwasserkörper in der Grafik in Annäherung an ihre mittlere Verweilzeit. Erkennbar sind wie auch in Abb. 11 große Unterschiede: bei etwa einigen GWK (z. B. Tollense/Penzlin" oder „Klütz/Wismar) betragen die Verweilzeiten auf mehr als der Hälfte der Fläche bei > 100 Jahren, während es im bei etwa zehn GWK (z. B. „Sude") weniger als 5 % sind. 55

Kap: Nummer/4

4 Ausblick

56 Mit vorhandenen digitalen Daten des LUNG MV wurden die Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone ermittelt, damit diese für zukünftige Nachnutzungen im Kontext mit aktuellen Problemen des Wasserhaushaltes der nordostdeutschen Region (Kaiser et al. 2010) bzw. der Stoffeinträge in die oberirdischen Gewässer (UBA 2010) herangezogen werden können.

57 Sowohl die für die Berechnung notwendigen Grundlagendaten (Flurabstand, Feldkapazität und Grundwasserneubildungsraten) als auch die nach der DIN 19732 ermittelten Verweilzeiten zeigten die erwarteten hohen Variabilitäten. Bei den Verweilzeiten z. B. betrug der Interquartilabstand etwa 77 Jahre, bei der Hälfte der dadurch betroffenen Landesflächen sind also die Unterschiede zwischen den zu erwartenden Reaktionszeiten stofflicher Veränderungen im Ergebnis des Eindringens des Wassertropfens in den Untergrund bis zu seinem Erreichen der Grundwasseroberfläche gleich oder länger als ein Menschenleben. Hierin noch nicht berücksichtigt sind stoffliche Wechselwirkungen des Lösungsinhaltes des Sickerwassers mit der Feststoffmatrix in der ungesättigten Zone, da die Berechnungsformel der DIN 19732 nur für idealisierte Tracer (z. B. Chlorid) gilt. Verursacht wird dies primär durch die in vielen Landesteilen sehr hohen Flurabstände unter mächtigen bindigen Geschiebemergel-Komplexen mit resultierenden sehr hohen summarischen Feldkapazitäten in Verbindung mit niedrigen klimatisch bedingten Neubildungsraten des Grundwassers aufgrund geringer Niederschläge und hoher Verdunstungsraten, z. B. im Grundwasserkörper Tollensesee mit resultierenden Verweilzeiten von über 50 Jahren auf nahezu 2/3 der Fläche.

58 Bezugsgegenstand war der „obere, großräumig zusammenhängende" Grundwasserleiter, der zumeist auch der wasserwirtschaftlich nutzbare ist, das ist wichtig zum Verständnis der ermittelten Daten. In darüber liegenden nicht ständig Grundwasser führenden Schichten kann ein Stoffeintrag von oben durchaus bereits in kürzeren Zeiträumen eintreten. Diese sind jedoch aufgrund fehlender konsistenter Daten allenfalls lokal ermittelbar.

59 Pauschale Aussagen zur Flächenauflösung bzw. Genauigkeit der ermittelten Informationen können nicht getroffen werden. Die meisten der als Flächenpolygone eingegangenen Grundlagendaten (Feldkapazitäten der Bodenzone, Grundwasserneubildung) entstammen Kartenwerken im Maßstab 1: 25.000 (z. B. Konzeptbodenkarte). Die Informationsdichte zur geostatistischen Ermittlung der Flurabstände und der Feldkapazitäten war sowohl in

gespannten (Bohrungen) wie auch in ungespannten Gebieten (Wasserstände) mit jeweils weit mehr als 1 Stützpunkt pro qkm^2 zwar sehr hoch, dennoch verbleiben im Ergebnis der Anwendung der Variogramm-Modelle resultierende Unsicherheiten (Varianzen) in schlecht belegten Gebieten von z. T. mehreren Metern bei den Flurabständen. Daher wurde empfohlen, für zukünftige Nachnutzungen mit lokalen Fragestellungen stets die Daten im Zusammenhang mit den Grundlagen (Stützpunkten) zu verwenden. Für überregionale (Maßstäbe < 1: 50 000) bzw. landesweite Verwendungen, wie z. B. einer Aggregierung auf der Ebene der Grundwasserkörper mit Flächengrößen von mehr als 100 km^2 müssen diese Einschränkungen nicht beachtet werden.

Empfehlenswert erschien die Gegenüberstellung der festgestellten stofflichen Belastungen bei der bisherigen Bewertung der Grundwasserkörper sowohl mit den berechneten Verweilzeiten als auch den Stoffüberschussdaten (z. B. den INVEKOS-Daten oder Hoftorbilanzen) zur Optimierung des geplanten Einsatzes von landwirtschaftlichen Anpassungsstrategien. Dabei ist ein sehr differenziertes Bild zu erwarten, da in Gebieten mit sehr langen Verweilzeiten des Sickerwassers bis zum Erreichen des bedeckten Hauptgrundwasserleiters auch hydrochemische Daten aus oberen Horizonten in die Bewertung der Grundwasserkörper eingeflossen sein können. Diese Zusammenhänge können nur durch einen Datenvergleich im Detail identifiziert werden. **60**

Vor allem aber in Gebieten mit sehr kurzen Reaktionszeiten (z. B. < 5 Jahre) kann mit entsprechend kurzen Zeiträumen zwischen durchgeführten Maßnahmen zur Verbesserung der Grundwasserqualität und den erhofften Wirkungen in hydrochemischer Hinsicht, also z. B. einer Reduzierung der Nährstofffracht, gerechnet werden. Am intensivsten wird dieser Effekt in den Entlastungsgebieten des Grundwassers entlang der oberirdischen Gewässer sein. Dort hat er zugleich auch seine größten Auswirkungen auf die Gewässer selber, die hier als Vorflut des Grundwassers fungieren. **61**

Im Vergleich mit der SGD-Methode nach Hölting et al. (1995) wurde in vergleichbaren Untersuchungen in Niedersachsen und Berlin (Heinkele et al. 2002, BTU 2003) festgestellt, dass die Methode der DIN 19732 deutlich differenziertere Ergebnisse liefert, und zwar vor allem bei kurzen und mittleren Verweilzeiten. Sehr deutlich wird dies anhand der Zuweisung von gesteinsspezifischen Punktzahlen im Lockergestein bei der SGD-Methode, die mit der Kationenaustauschkapazität korreliert. Dieser Parameter hat jedoch primär nichts mit dem Hohlraumsystem des Bodens und der Grundwasser- **62**

überdeckung zu tun, sondern mit adsorptiv wirksamen Bestandteilen (vor allem Tonminerale und organische Substanz). Es ist aber das Hohlraumsystem, das die Geschwindigkeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone bestimmt. Die Zuweisung von Punktzahlen aufgrund der Kationenaustauschkapazität führt z. B. zu einer systematischen Unterschätzung der Schutzfunktion von Schluffen und schluffigen Sanden. Diese erhalten nach der SGD-Methode vergleichsweise geringe Punktzahlen, sie weisen aber mit Blick auf die Verlangsamung der Sickergeschwindigkeit ein günstiges Porensystem mit hohen Gehalten an feinen Grob- und an Mittelporen auf. Damit sind die in der SGD-Methode abgeleiteten Verweilzeiten, die in nicht nachvollziehbarer Form aus den Punkten abgeleitet sind, nicht nachvollzogen werden.

63 In **Festgesteinsgebieten** mit der Grundwasserführung in Kluftsystemen ist die Anwendung der DIN 19732 im Gegensatz zum Lockergestein problematisch. So sind z. B. oft de Flurabstände nicht bekannt, da eine zu geringe Anzahl von Bohrungen und Grundwassermessstellen deren Ausweisung nicht ermöglicht. Zudem sind lithologische Gesteinseigenschaften aus den vorhandenen Kartenunterlagen nur ungenau abzuleiten. Auch die Zuordnung von Feldkapazitäten, die zur Verweilzeitberechnung nach der DIN 19732 notwendig ist, erscheint schwierig. Bei Standorten im Festgesteinsbereich besteht daher in Bezug auf die Ermittlung der Verweilzeiten des Sickerwassers Forschungsbedarf. Reg: Festgesteinsgebiete

Kap: Nummer/5

5 Literaturverzeichnis

BBodSchV (1999): Bundesbodenschutzverordnung: BGBl I, S. 1554, Bundesgesetzblatt.

BTU (2003): Erstellung von Karten zur Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung auf der Basis der Verweilzeit des Sickerwassers für das Land Berlin. – Gutachten der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus in Zusammenarbeit mit der HYDOR Consult GmbH und der Heinkele Bodenconsult im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, Cottbus (unveröff.).

DIN 19732 (1997): Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nichtsorbierbaren Stoffen. – Normenausschuss Wasserwesen im Dt. Institut für Normung, Juni 1997, Beuth Verlag, Berlin.

EG (2000): Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen

der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. – 2000/60/EG, Abl. L 327 vom 22.12.2000.

EG (2006): Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung. – 2006/118/EG, (ABl. L 372 vom 27.12.2006, S. 19, L 53 vom 22.2.2007, S. 30, L 139 vom 31.5.2007, S. 39).

GrwV (2010): Verordnung zum Schutz des Grundwassers. – Bundesgesetzblatt, Teil I, G 5702, Nr. 56 vom 15.11.2010, 1513-1530, Bonn.

Hannappel, S. & H.-J. Voigt (1999): Vulnerability maps as bricks for groundwater protection – experiences in East Germany. – Proceedings of the XXIX IAH Congress, 59 – 65, Bratislava.

Hannappel, S. & A. Limberg (2007): Ermittlung des Flurabstandes des oberen Grundwasserleiters in Berlin im Mai 2006. – Brandenburger Geowissenschaftliche Beiträge, H. 1, S. 65 – 74, Kleinmachnow.

Heinkele, T., Hannappel, S., Jahnke, C., Voigt, H.-J. & E. Donat (2001): Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern. – Hrsg.: Umweltbundesamt, FB 299 22 278, 118 S., Berlin.

Hölting, B. , Haertle, T., Hohberger, K.-H., Nachtigall, K. H., Villinger, E., Weinzierl, W., Wrobel, J.-P. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. Geologisches Jahrbuch. Reihe C. Band 63, 5–24 HGN (2008): Ergebnisbericht Ermittlung der Grundwasserneubildung Mecklenburg-Vorpommerns, Stand 2007. – Gutachten der HGN Hydrogeologie GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin, 23.01.2008 (unveröff).

Hölting, B. & W. G. Coldewey (2009): Hydrogeologie. – 7. Auflage, Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg.

HYDOR (2010): Ermittlung grundwasserbeeinflusster oberirdischer Gewässer in Mecklenburg-Vorpommern. – Gutachten der HYDOR Consult GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Berlin (unveröff).

HYDOR (2011): Ermittlung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung nach der DIN 19732 für Mecklenburg-Vorpommern. – Gutachten der HYDOR Consult GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Berlin (unveröff).

KA 5 (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. – Hrsg.: AD-HOC-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 5. Auflage, 438 S., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O. & R. F. Hüttl (2010): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland -Trends, Ursachen, Lösungen Scientific Technical Report STR 10/10 des Geofor-schungszentrums Potsdam (http://dx.doi.org/10.2312/GFZ.b103-10106).

Keppner, L. (2011): Die neue Grundwasserverordnung. – Grundwasser, Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (2011) 16:145–153, DOI 10.1007/s00767-011-0170-0 LUNG (2010): Feldkapazität der ersten 20 dm (*fk_200_KBK25*). – Meta-Geodatenblatt der Abteilung Geologie des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow (unveröff.) UBA (2010): Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONE-RIS – Nährstoffe, Schwermetalle und Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. – UBA-Texte, 45/10, FuE-Bericht Förderkennzeichen 204 24 218 und 205 24 204 UBA-FB 001410 im Auftrag des Umweltbundesamtes, ISSN 1862-4804, Dessau.

Voigt, H.-J. (1987): Hydrogeologisches Kartenwerk der Deutschen Demokratischen Republik, Nutzerrichtlinie für die Hydrogeologische Grundkarte und die Karte der hydrogeologischen Kennwerte. – Hrsg.: Zentrales Geologisches Institut, 42 S., Berlin (unveröff.).

Voigt, H.-J., Jahnke, Heinkele, T. & R. Wolter (2003): Characterisation of groundwater vulnerability – a methodological suggestion to fulfill the requirements of the Water Framework Directive of the European Union, Geofisica international.

Wendland, F., Behrendt, H., Hirt, U., Kreins, P., Kuhn, U., Kuhr, P., Kunkel, R. & B. Tetzlaff (2010): Analyse von Agrar- und Umweltmaßnahmen zur Reduktion der Stickstoffbelastung von Grundwasser und Oberflächengewässer in der Flussgebietseinheit Weser. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 4, 54. Jg, 231–244, Koblenz.

Wittenberg, H. (2011): Grundwasserneubildung als schnelle Antwortfunktion auf Starkniederschläge. – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 30.11, ISBN: 978-3-941897-79-3, Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, Hennef.