

---

# Bewertung der Grundwassergeschüttheit anhand der Verweilzeit in der Grundwasserüberdeckung

Heiko Hennig [Greifswald] & Toralf Hilgert [Schwerin]

---

## Kurzfassung

Die Verweilzeitberechnung ist eine sehr anschauliche Methode zur Bewertung der Geschüttheit einer Wasserfassung oder eines Grundwasserleiters. Sie berücksichtigt alle relevanten Einflussfaktoren und ist aus Sicht der Autoren anderen Verfahren zur Geschüttheitsbewertung vorzuziehen. Es wird eine Methode vorgestellt, mit der die Geschüttheit der Wasserfassungen im Raum Pasewalk bewertet wurde und die auch landesweit anwendbar ist. Die methodischen Grundlagen von Verweilzeitberechnungen werden untersucht und spezifiziert und es erfolgt eine Diskussion der Interpolationsmöglichkeiten.

## Suchbegriffe

*Sickerwasser, Verweilzeit, Sickerstrecke, Grundwasserflurabstand, DIN 19732, Grundwasserneubildung, Grundwasserüberdeckung, Grundwassergeschüttheit, Verweilzeitberechnung*

## Einführung

Das Grundwasser ist die wichtigste Quelle der Trinkwasserversorgung in Mecklenburg-Vorpommern. Die genutzten Grundwasservorkommen sind in der Regel von einer guten chemischen Qualität, so dass außer einer Enteisung / Entmanganung keine weitere Aufbereitung erforderlich ist.

Anthropogene Stoffeinträge bilden die größte Gefahr für die Grundwasservorkommen. Die Empfindlichkeit gegenüber Stoffeinträgen ist umso größer, je höher die Durchlässigkeit und je geringer die Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung ist. Beide Parameter beeinflussen maßgeblich die Fließzeit des Sickerwassers und damit die Möglichkeit für eine Sorption oder einen Abbau eines potentiellen Schadstoffes. Zur Bewertung der Verschmutzungsempfindlichkeit sind in Mecklenburg-Vorpommern zwei Verfahren verbreitet:

- Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung nach HÖLTING et al. (1995)
- TGL 34 334 (Technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen der DDR)

Bei beiden Verfahren wird das vertikale Verlagerungspotential anhand der Schichtenverzeichnisse von Bohrungen bewertet; im Ergebnis werden Punkte vergeben bzw. es erfolgt eine Einstufung in fünf Grundwassergeschüttheitsklassen.

Eine direktere Methode der Geschüttheitsbewertung ist die Berechnung der Verweilzeit in der Grundwasserüberdeckung in Anlehnung an die DIN 19732. In einem Forschungsauftrag des Umweltbundesamtes, der von der BTU Cottbus unter Mitwirkung der FUGRO CONSULT GmbH bearbeitet wurde, ist die Anwendbarkeit der DIN für flächenhafte Aussagen erfolgreich getestet

worden (HEINKELE et al. 2002). Die Parametrisierung der Verweilzeitberechnung erfolgte anhand von geologischen und hydrogeologischen Karten, da bundesweit einheitliche Datengrundlagen verwendet werden sollten. Dabei wurde die Lithologie der obersten 2 m auf die gesamte Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung extrapoliert. Diese Vereinfachung ist jedoch für standortkonkrete Aussagen, z.B. die Geschütztheitsbewertung einer Wasserfassung, zu ungenau.

Nach Ansicht von WENDLAND et al. (2011) ist (zumindest für das Bundesland Hessen) eine flächendeckende Verweilzeitberechnung in der Grundwasserüberdeckung aufgrund fehlender Daten nicht möglich. Verweilzeiten wurden dort über das Verfahren nach HÖLTING et al. (1995) abgeschätzt.

In Mecklenburg-Vorpommern sind Bohrungsergebnisse nahezu flächendeckend digital erfasst. Die Datenbank wird vom Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG) gepflegt. Sie bildet eine hervorragende Datengrundlage für Verweilzeitberechnungen anhand von Schichtenverzeichnissen. Eine landesweite Berechnung der Verweilzeit unter Nutzung der Bohrungsdaten erfolgte im Jahr 2011. Der gewählte Berechnungsansatz ist im Internet veröffentlicht (<http://www.wrrl-mv.de>; ZEILFELDER et al. 2011).

Im vorliegenden Artikel wird untersucht, welche methodischen Vereinfachungen zulässig sind und was bei Verweilzeitberechnungen, insbesondere bei der Regionalisierung, zu beachten ist. Im Ergebnis wird ein effizienter Ansatz vorgestellt, mit dem die Geschütztheit der Wasserfassungen im Raum Pasewalk auf der Basis einer Verweilzeitberechnung bewertet wurde und der auch landesweit anwendbar ist.

## Die Grundwassernutzung im Raum Pasewalk

Im Raum Pasewalk befinden sich drei Grundwasserfassungen im Randbereich der Uecker. Die Wasserfassungen Ruhleben und Schmarsow liegen östlich der Uecker. Sie werden von den Stadtwerken Pasewalk betrieben und dienen der Trinkwasserversorgung der Stadt Pasewalk. Die westlich der Uecker gelegene Wasserfassung Papendorf wird vom Trink- und Abwasserzweckverband Uecker-Randow Süd-Ost betrieben und dient der Trinkwasserversorgung des Umlandes.

In der Abbildung 1 sind die Brunnen, die Grundwassergleichen des Hauptgrundwasserleiters sowie die unterirdischen Einzugsgebiete der Wasserfassungen dargestellt. Das Grundwasser strömt von den hydraulischen Hochlagen der Ueckerniederung zu, in der artesischen Verhältnisse vorliegen. Der hydrogeologische Schnitt in der Abbildung 2 verdeutlicht die eiszeitlich geprägten Verhältnisse im Untersuchungsgebiet. Das genutzte Grundwasserstockwerk ist teilweise in mehrere Grundwasserleiter aufgespalten. Die grundwasserleitenden Schichten sind überwiegend gespannt, im Speisungsgebiet sind lokal auch ungespannte Verhältnisse anzutreffen. In den drei Wasserfassungen werden sehr gut durchlässige Schmelzwassersande der Ueckerrinne genutzt ( $k_f \approx 1 \times 10^{-3}$  m/s), während die Durchlässigkeit im weiteren Einzugsgebiet aufgrund der geologischen Heterogenität eher gering ist ( $k_f \leq 1 \times 10^{-4}$  m/s).

Die Mächtigkeit und die lithologische Ausbildung der Deckschichten über dem genutzten Grundwasserleiter variieren stark, was pauschale Aussagen zur Grundwassergeschütztheit erschwert. Die Abbildung 3 veranschaulicht den Anteil der einzelnen Sedimente an der Grundwasserüberdeckung im Raum Pasewalk, der über die Auswertung der vorliegenden Bohrungen ermittelt wurde. Es dominieren bindige Schichten mit einem Gesamtanteil von 75 %.

## Berechnungsansatz und Parametrisierung

Die Berechnung der Verweilzeit erfolgt in Anlehnung an die DIN 19732. Dabei ergibt sich die Verlagerungsgeschwindigkeit des Sickerwassers als Quotient aus der Grundwasserneubildungsrate

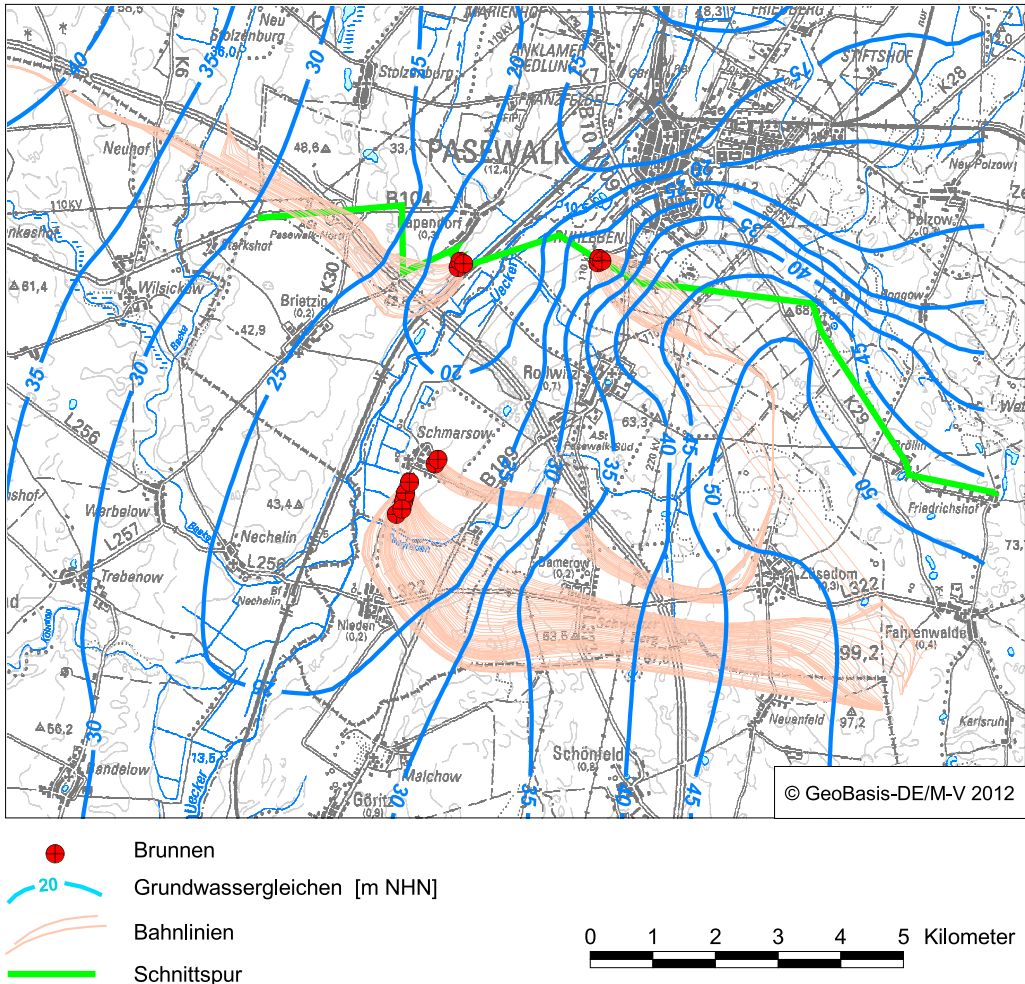


Abbildung 1: Übersichtskarte

und dem Volumenanteil an Wasser im Porenraum. Es wird allein die konvektive Bewegung eines idealen Tracers betrachtet, Dispersions-, Sorptions- und Abbauprozesse bleiben unberücksichtigt. Die so berechnete Verweilzeit ist als standortspezifisches Verlagerungspotential anzusehen. Es stellt für konservative, nicht sorbierbare Stoffe, wie z.B. Chlorid, eine gute Näherung dar und bildet darüber hinaus die Grundlage für stoffspezifische Transportbetrachtungen. So sind z.B. Denitrifikationsprozesse beim Nitrat oder Sorptionsprozesse bei Kationen zu berücksichtigen.

Da die Verweilzeit im Boden meist mehrere Jahre beträgt, ist es zulässig, der Berechnung mittlere Verhältnisse zugrunde zu legen. Entsprechend der DIN 19732 wird oberhalb des Grundwasserspiegels ein Wassergehalt bei Feldkapazität angesetzt (Wassergehalt, der vom Boden gegen die Schwerkraft gehalten werden kann). Damit kann die Verweilzeit in der ungesättigten Zone wie folgt berechnet werden:

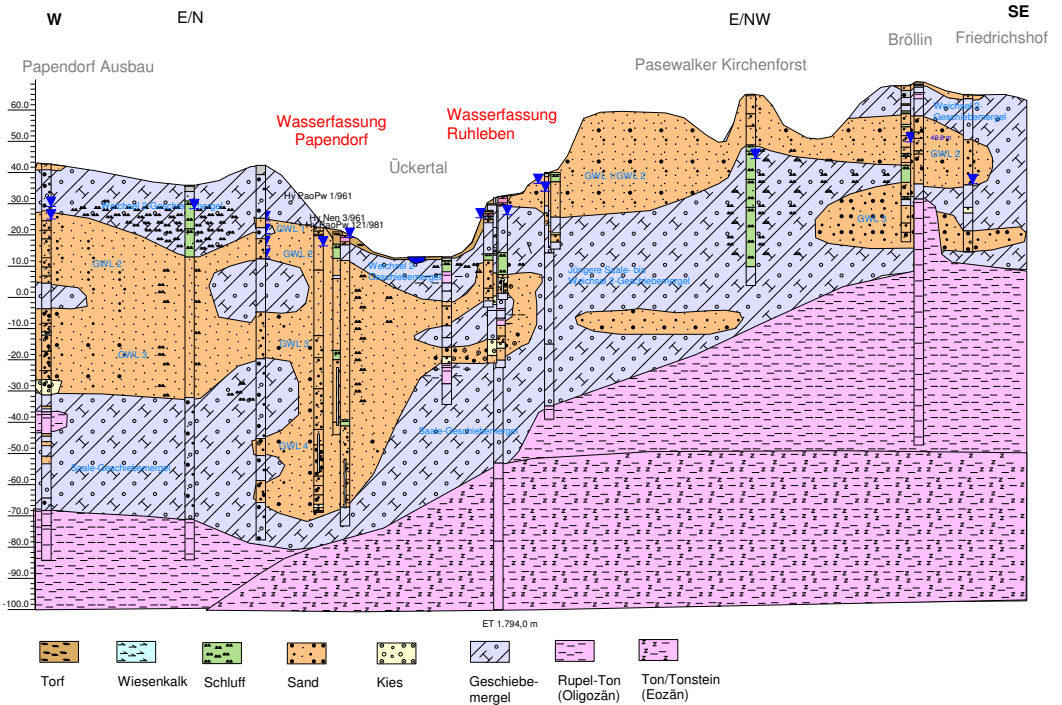


Abbildung 2: Hydrogeologischer Profilschnitt

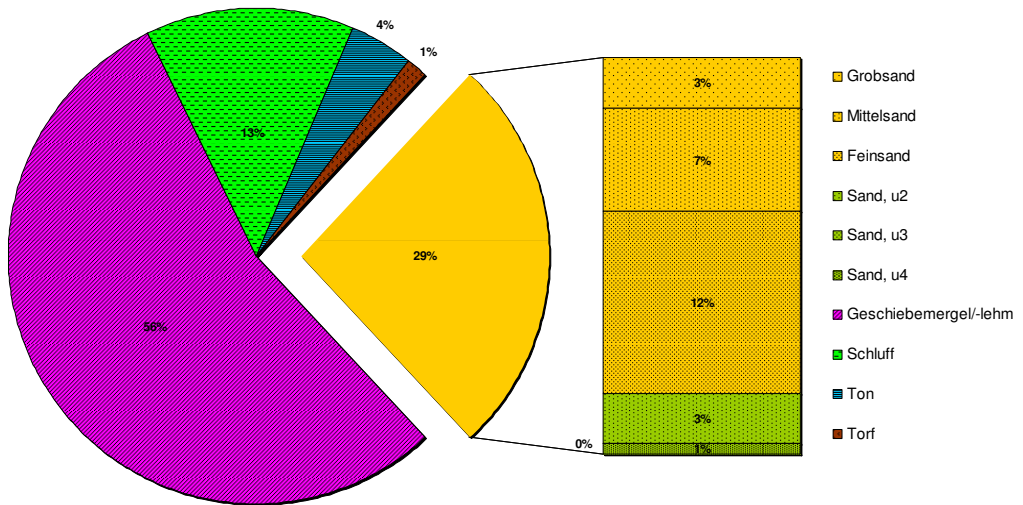


Abbildung 3: Sedimentanteil der Grundwasserüberdeckung

$$t_u = \frac{FK \cdot M_u}{GWN} \quad (1)$$

mit FK - Feldkapazität des Bodens  
 $M_u$  - Mächtigkeit der ungesättigten Bodenzone ( $\hat{=}$  Grundwasserflurabstand)  
 GWN - Grundwasserneubildung

Um die Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung (halb-)gespannter Grundwasserleiter beurteilen zu können, ist nicht nur die Verweilzeit im ungesättigten, sondern auch die Verweilzeit im gesättigten Bereich der Deckschicht von praktischer Bedeutung. Innerhalb der wassergesättigten Deckschichten ist der Gesamtporenraum statt der Feldkapazität anzusetzen.

$$t_g = \frac{n \cdot M_g}{GWN} \quad (2)$$

mit n - Gesamtporenraum des Bodens  
 $M_g$  - Mächtigkeit der gesättigten Sickerstrecke

Beide Verweilzeiten werden separat berechnet und anschließend addiert.

Im Folgenden wird die Parametrisierung der Berechnungsgleichungen anhand von Bohrungsdaten beschrieben.

### Sickerstrecke

Maßgebend für die Geschützteitsbewertung eines Grundwasservorkommens ist die Fließzeit bis zur Oberkante des Grundwasserraumes. Doch wo beginnt der Grundwasserraum? Bei einem ungespannten Grundwasserleiter ist die Frage leicht zu beantworten – der Grundwasserraum wird durch die freie Grundwasseroberfläche begrenzt, die Sickerstrecke entspricht dem Grundwasserflurabstand (Abbildung 4, linkes Profil). Im Fall eines gespannten und von einem undurchlässigen, nicht benutzbaren Hangendstauer bedeckten Grundwasserleiters ist ebenfalls eine eindeutige Aussage möglich – der Grundwasserraum beginnt an der Unterkante des Hangendstauers (Abbildung 4, rechtes Profil), eine Sickerwasserbildung findet nicht statt und eine Verweilzeitberechnung erübrigt sich.

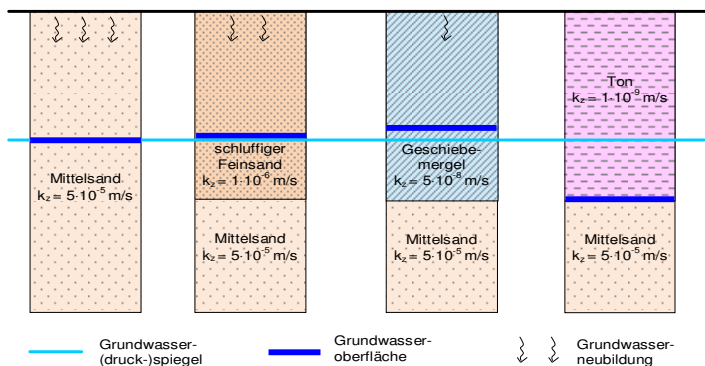


Abbildung 4: Lage der Grundwasseroberfläche bei positiver Grundwasserneubildung ( $k_z$  - vertikale Durchlässigkeitskoeffizienten)

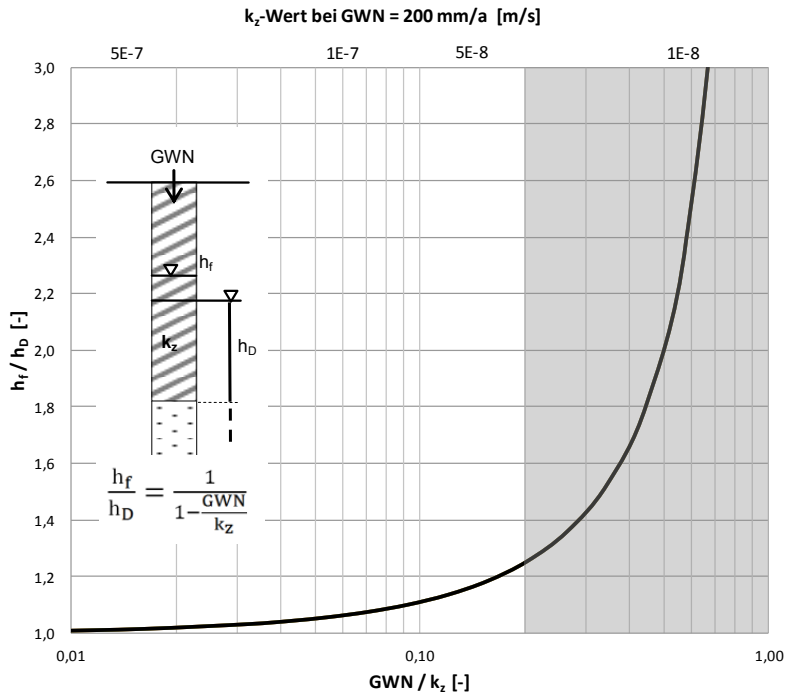


Abbildung 5: Unterschied zwischen der Grundwasseroberfläche ( $h_f$ ) und dem Druckspiegel im Grundwasserleiter ( $h_D$ ) in Abhängigkeit von der Grundwasserneubildung (GWN) und dem vertikalen Durchlässigkeitskoeffizienten ( $k_z$ )

In Mecklenburg-Vorpommern sind großflächig gespannte Grundwasserleiter verbreitet, wobei die hangenden Deckschichten grundwasserhemmend, aber nicht undurchlässig sind. Hier ist die Ermittlung der Grundwasseroberfläche ungleich schwieriger, da die Deckschicht im oberen Teil ungesättigt, im unteren Teil jedoch wassergesättigt ist. Innerhalb der Deckschicht bildet sich eine freie Grundwasseroberfläche heraus (freier Wasserspiegel im Piezometer). Wenn eine Grundwasserneubildung stattfindet, liegt die Grundwasseroberfläche über dem Druckpotential des Grundwasserleiters; die Druckdifferenz ist dabei umso größer, je schlechter die vertikale Durchlässigkeit  $k_z$  der Deckschicht und je höher die Grundwasserneubildung ist. Oberhalb des Grundwasserspiegels bildet sich ein geschlossener Kapillarsaum aus, der im schluffigen Sand wenige Zentimeter und im Geschiebemergel einige Dezimeter beträgt.

Der Unterschied zwischen dem Druckspiegel im Grundwasserleiter ( $h_D$ ) und der freien Oberfläche ( $h_f$ ) ergibt sich für homogene Verhältnisse und eine stationäre Strömung aus dem Darcy-Gesetz (Bezugsniveau ist die Unterkante der Deckschicht). Die Berechnung ist in der Abbildung 5 visualisiert. Wenn die Grundwasserneubildung gering ist im Vergleich zur Durchlässigkeit, nähern sich  $h_D$  und  $h_f$  an. Ein oberer Grenzwert wird hingegen erreicht, wenn die Grundwasserneubildung und der Durchlässigkeitskoeffizient gleich groß sind ( $GWN / k_f = 1$ ). Dann dürfte der Grundwasserleiter nicht unter Druck stehen ( $h_D \rightarrow 0$ ), damit das volle Gravitationspotential (=1) wirken kann. Dieser Fall ist jedoch nur theoretischer Natur, da sich sehr hohe Grundwasserneubildungsraten und sehr geringe Durchlässigkeiten ausschließen: Hohe  $GWN / k_z$ -Werte hätten zur Folge, dass in winterlichen Feuchtperioden die (potentielle) Grundwasserneubildung das Versickerungsvermögen überschreitet. Der sich dann einstellende Oberflächenabfluss würde die

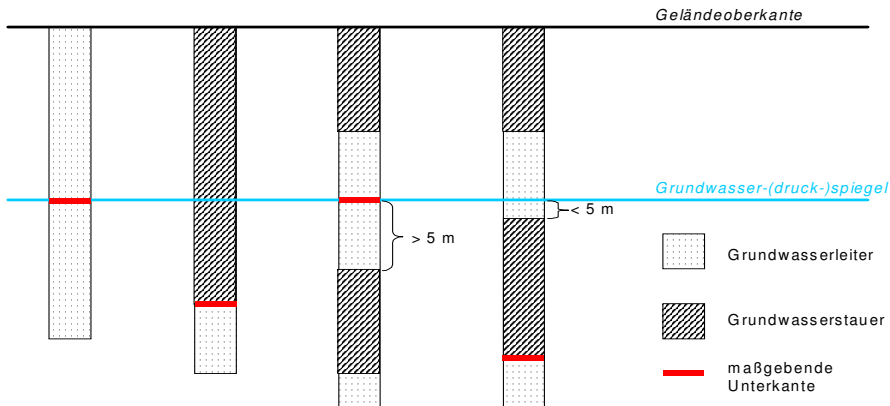


Abbildung 6: Prinzipskizze zur Ermittlung der maßgebenden Unterkante der Deckschichten

Grundwasserneubildung vermindern. Angesichts dieser negativen Rückkopplung ist für praktische Belange nur der Bereich  $GWN / k_f < 0,2$  relevant. So beträgt z.B. an einem Geschiebemergelstandort ( $k_f = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ) mit einer – für bindigen Boden sehr hohen – Grundwasserneubildung von  $200 \text{ mm/a}$  ( $GWN / k_f = 0,13$ ) der Unterschied zwischen dem Druckspiegel und der Grundwasseroberfläche ca. 15 % ( $h_f / h_D = 1,15$ ). Angesichts dieses relativ geringen Unterschiedes kann als Grenze zwischen ungesättigtem und gesättigtem Bereich näherungsweise der Grundwasserdruckspiegel angesetzt werden. Der daraus resultierende mögliche Fehler bei der Verweilzeitberechnung wird nachfolgend noch behandelt.

Im Untersuchungsraum Pasewalk waren für 273 Bohrungen die Mächtigkeiten der ungesättigten und der gesättigten Deckschicht zu bestimmen. Um diese Analyse effektiv zu gestalten, wurden zunächst alle Schichtdaten in die Kategorien Grundwasserleiter (Sande und Kiese) und Grundwasserhemmer (Geschiebemergel, Schluff, Ton) eingeteilt. Anschließend erfolgte ein Verschnitt mit den Grundwassergleichen des obersten zusammenhängenden Grundwasserleiters. Die maßgebende Unterkante der Deckschichten wurde automatisiert ermittelt. Dabei wurde definiert, dass der Grundwasserleiter erreicht ist, wenn die Summe grundwasserleitender Schichten unterhalb des Grundwasserspiegels größer als 5 m ist und das Schichtpaket nicht durch eine grundwasserhemmende Schicht  $\geq 1 \text{ m}$  unterbrochen wird. Das Prinzip ist anhand von Beispielen in der Abbildung 6 veranschaulicht.

### Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung wurde flächendifferenziert auf der Basis des BAGLUVA-Verfahrens (ATV-DVWK 2002) unter Beachtung dränungsbedingter Direktabflüsse (HENNIG & HILGERT 2007) berechnet und anhand von Abflussdaten der Uecker validiert.

### Durchflusswirksamer Porenraum

Die Fließgeschwindigkeit des Sickerwassers hängt vom wassererfüllten und damit durchflusswirksamen Porenvolumen ab. Je kleiner die zur Verfügung stehende Durchflussfläche ist, desto höher ist die Fließgeschwindigkeit. Unterstellt man, dass die ungesättigte Bodenzone im Jahresmittel gravitativ entwässert ist, kann hier entsprechend der DIN 19732 der Wassergehalt bei Feldkapazität als durchflusswirksamer Porenraum angesetzt werden. Unterhalb des Grundwasserspiegels ist

der Boden gesättigt, so dass der gesamte Porenraum durchflusswirksam wird, was eine geringere Fließgeschwindigkeit zur Folge hat.

Bodenspezifische Werte der Feldkapazität und des Gesamtporenraumes wurden der Bodenkundlichen Kartieranleitung (BGR 2005) entnommen und den Schichtdaten der Bohrungen bzw. – auf den oberen 2 m – den Angaben der Bodenkarte entsprechend der Tabelle 1 zugeordnet.

Tabelle 1: Zuordnung der Feldkapazität FK und der Gesamtporosität n zu den Schichtdaten der Bohrungen und den Klassen der Bodenkarte

Bodenart nach Bohrungen	Kürzel	Bodenkarte	FK	n
Grobsand	gS		8	41
Mittelsand	mS		10	42
Feinsand	fS	S	14	45
Sand, schwach schluffig	Su2	SL	23	44
Sand, schluffig	Su3	LS	29	43
Sand, stark schluffig	Su4		32	43
Geschiebemergel/-lehm	M	L	35	43
Schluff	U		38	45
Ton	T		40	45
Torf	H	O	60	80

In der Abbildung 7 sind die Wassergehalte unterschiedlicher Böden oberhalb der Grundwasseroberfläche dargestellt. Für die Verweilzeitberechnung wird vereinfachend ein sprungförmiger Übergang zwischen ungesättigtem und gesättigtem Bereich angenommen. Als Grenze kann in guter Näherung der leichter zu bestimmende Grundwasserdruckspiegel anstelle der Grundwasseroberfläche angesetzt werden. Der dadurch entstehende Fehler bei der Verweilzeitberechnung ist im Vergleich zu den Ungenauigkeiten, die aus den Datengrundlagen resultieren, vernachlässigbar gering. Die Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse einer entsprechenden Fehlerberechnung (durchgezogene Linie). Selbst bei flurnahen Grundwasserständen (ungesättigte Sickerstrecke geht gegen Null) und bindigen Böden ist der relative Fehler kleiner als 3 %.

Eine nennenswerte Unterschätzung der Verweilzeit ist nur bei sehr gering durchlässigem Untergrund ( $k_f < 5 \times 10^{-8}$  m/s als vertikaler Mittelwert) zu erwarten, der ohnehin durch sehr lange Verweilzeiten gekennzeichnet ist. Eine mögliche Korrektur nach Abbildung 5 wird nicht empfohlen, da der  $k_f$ -Wert aus Sicht der Autoren nicht hinreichend genau bekannt ist. Der Verzicht auf die Korrektur bewirkt eine etwas geringere Verweilzeit, so dass die Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung verhaltener beurteilt wird.

Würde man hingegen auf eine Unterscheidung zwischen ungesättigtem und gesättigtem Bereich ganz verzichten und mit der Feldkapazität bis zur Unterkante des Hangendstauers rechnen, hätte das bei flurnahen Druckspiegeln eine Unterschätzung der Verweilzeit um bis zu 20 % zur Folge (Abbildung 8, gestrichelte Linie).

Aus den beschriebenen Parametern kann die Verweilzeit berechnet werden. Die Vorgehensweise bei der Verweilzeitberechnung ist in der Abbildung 9 an einem Beispiel veranschaulicht.



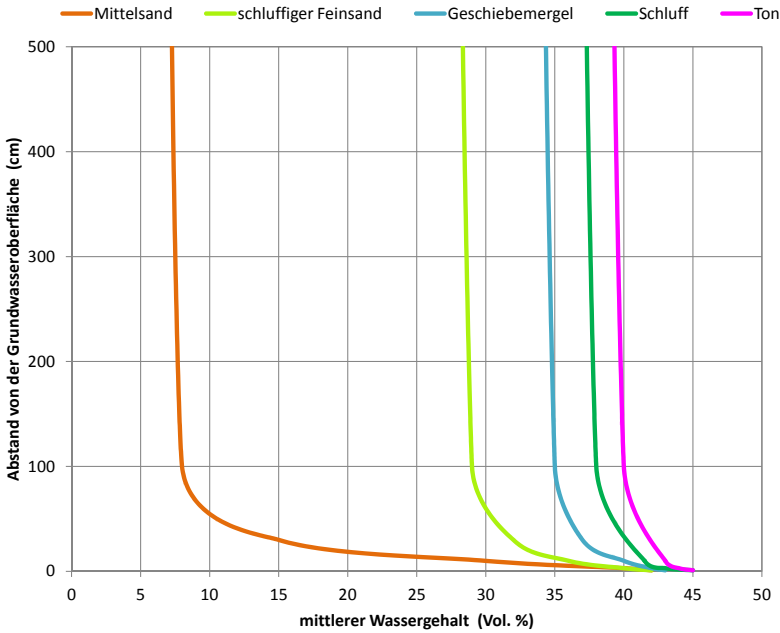


Abbildung 7: Wassergehalt oberhalb der Grundwasseroberfläche bei unterschiedlichen Böden

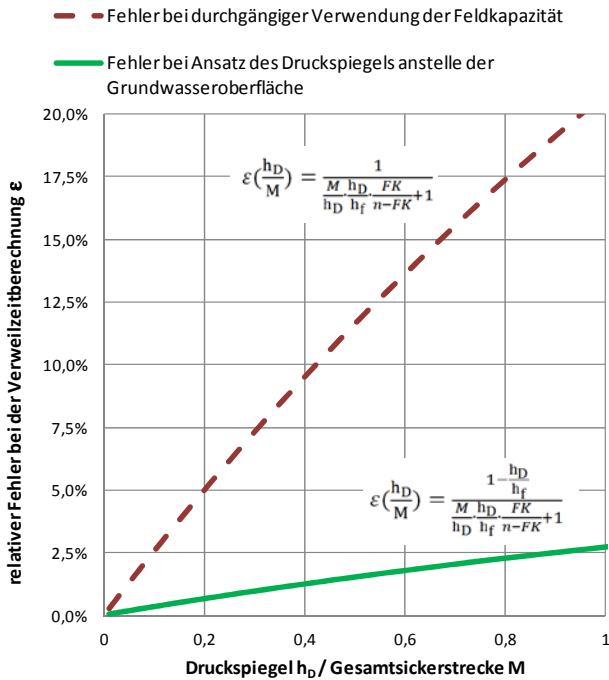


Abbildung 8: Relativer Fehler der Verweilzeitberechnung bei einer Geschiebemergelüberdeckung und teilweise gesättigten Verhältnissen ( $k_f = 5 \times 10^{-8}$  m/s, GWN = 200 mm/a  $\rightarrow h_f/h_D = 1,15$ )

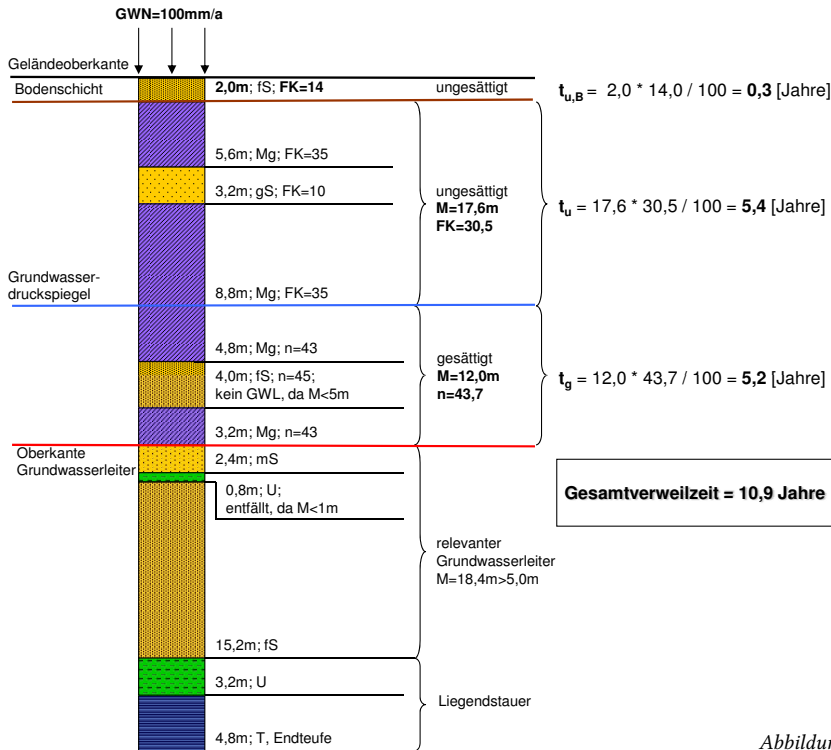


Abbildung 9: Berechnungsansatz

### Flächenhafte Berechnung

Die Verweilzeitberechnung für bekannte Bohraufschlüsse liefert nur Punktdaten. Um die Geschüttheit einer Wasserfassung beurteilen zu können, ist jedoch eine flächenhafte Auswertung erforderlich. Eine direkte Interpolation der Verweilzeiten ist keine geeignete Methode, da dann die relativ sicher bestimmbareren Informationen zur flächenhaften Verteilung der Grundwasserneubildung und der Sickerstrecke verloren gingen. Um eine maximale Ausschöpfung der zur Verfügung stehenden Informationen zu gewährleisten, müssen die multiplikativ verknüpften Parameter der Gleichungen (1) und (2) separat interpoliert und anschließend rasterbasiert verrechnet werden. Die Tabelle 2 enthält eine Zusammenstellung und Bewertung der Datengrundlagen.

Tabelle 2: Datengrundlage

	Datenverfügbarkeit	Zuverlässigkeit
Grundwasserneubildung	flächenhaft (hydrotoporientiert berechnet)	hoch
Sickerstrecke	Geländeoberkante flächenhaft (Vermessung)	sehr hoch
	Grundwasserspiegel flächenhaft (aus Modellierung)	hoch
	Unterkante bindiger Deckschichten punktförmig	mittel
durchflusswirksamer Porenraum	punktförmig, an der Bodenoberfläche flächenhaft (Bodenkarte)	gering

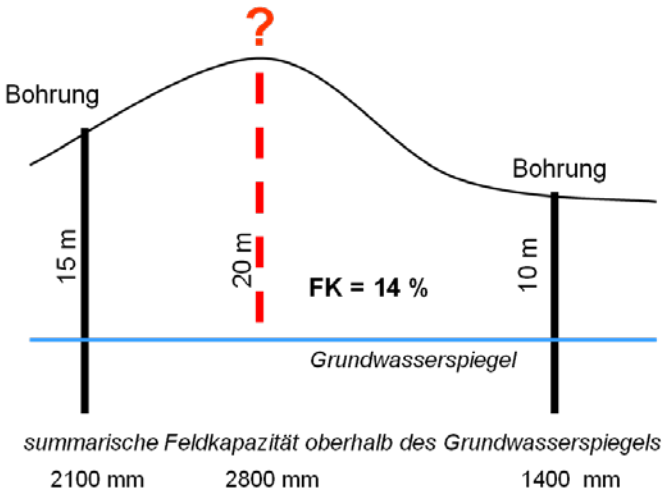


Abbildung 10: Prinzipskizze – Mittelung der Feldkapazität

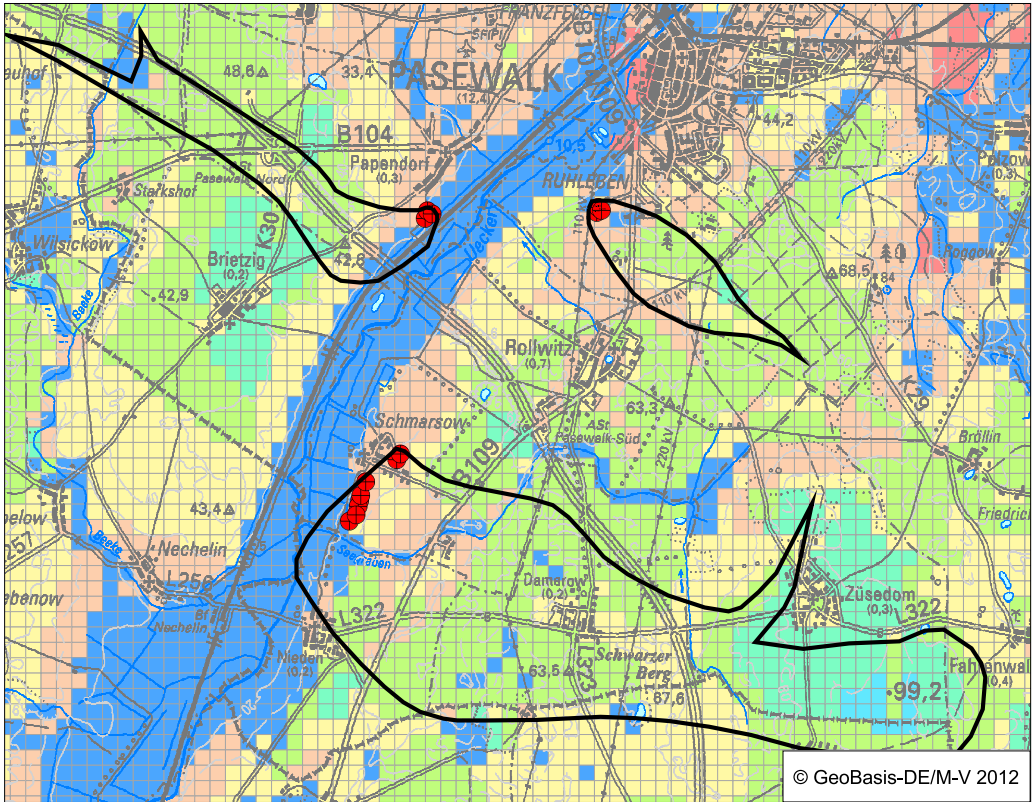
Die Bedeutung einer separaten Interpolation der Eingangsdaten wird auch deutlich am Beispiel der Feldkapazität, das in der Abbildung 10 dargestellt ist. Sie zeigt eine homogene ungesättigte Zone mit einer Feldkapazität von 14 %. Um zwischen den beiden Bohrungen zu interpolieren, sollte (bei einer zweidimensionalen, horizontal ebenen Betrachtung) die Feldkapazität in vertikaler Richtung gemittelt und anschließend interpoliert werden. Dadurch wird gewährleistet, dass die relativ sicher bestimmbareren Informationen zur Sickerstrecke erhalten bleiben. Die Interpolation der Feldkapazität (Vol.%) ergibt im Bereich der Hochlage das richtige Ergebnis:  $14\% \times 20\text{ m} = 2.800\text{ mm}$ . Würde man hingegen die summarische Feldkapazität (mm) mitteln, erhielte man im Bereich der Hochlage einen Wert von lediglich 1.750 mm und würde die Sickerzeit damit deutlich unterschätzen.

Die nur punktförmig an den Bohrungen vorliegenden Parameter wurden geostatistisch interpoliert (Kriging nach Variogrammanalyse):

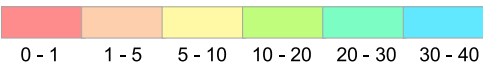
- Unterkante der bindigen Deckschichten
- Feldkapazität und Porosität unterhalb der Bodenzone (vertikale Mittelwerte entlang der ungesättigten bzw. der gesättigten Sickerstrecke)

Für die oberen 2 m war die Verteilung des durchflusswirksamen Porenraumes aus der Bodenkarte bekannt.

Anschließend wurden für ein Raster von  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  die Verweilzeiten entsprechend dem Schema der Abbildung 9 berechnet. In der Abbildung 11 ist die berechnete Gesamtverweilzeit dargestellt. Im nahen Umfeld der Wasserfassungen sind die Verweilzeiten kürzer als 5 Jahre, innerhalb der Einzugsgebiete beträgt die durchschnittliche Verweilzeit in der Grundwasserüberdeckung etwa 10 Jahre. Angesichts der langen Verweilzeiten in der Grundwasserüberdeckung sind die unterirdischen Einzugsgebiete der Pasewalker Wasserfassungen relativ gut gegen oberflächlich eingetragene Schadstoffe geschützt, so dass die Gefährdung durch Havarien (technischer Anlagen) gering ist. Gegen einen anhaltenden und flächenhaften Eintrag nicht abbaubarer und nicht sorbierbarer Stoffe (z.B. aus der Landwirtschaft) bietet die Grundwasserüberdeckung jedoch keinen dauerhaften Schutz.



Verweilzeit in der Grundwasserüberdeckung (a)



Grundwasserzehrung

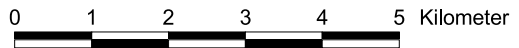


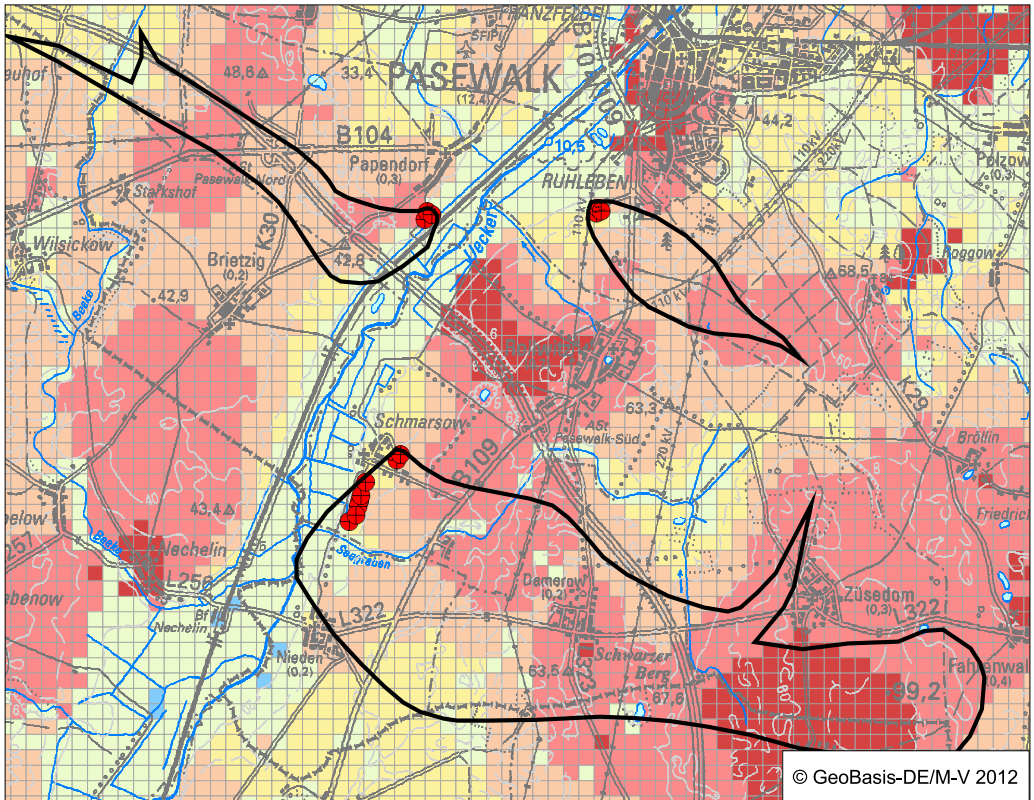
Abbildung 11: Gesamtverweilzeit in der Überdeckung des Grundwasserleiters

Ergänzend zeigt die Abbildung 12 den Anteil der Verweilzeit im ungesättigten Bereich an der Gesamtverweilzeit in der Grundwasserüberdeckung. Es wird deutlich, dass im Bereich der Speisungsgebiete die Verweilzeit im ungesättigten Bereich dominiert (große Grundwasserflurabstände). Mit Annäherung an die Entlastungsgebiete nimmt der Anteil der Verweilzeit im gesättigten Bereich der Grundwasserüberdeckung zu. Daran wird deutlich, dass für eine realistische Bewertung der Grundwassergeschützhtheit sowohl der ungesättigte als auch der gesättigte Bereich der Überdeckung beachtet werden müssen.

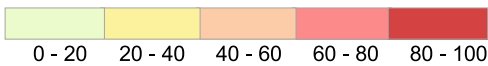
### Alternative 3D-Berechnung

Die Interpolation von dreidimensional verteilten Gesteinseigenschaften (Feldkapazität, Porosität) zwischen den Bohrungen kann auf zwei Wegen erfolgen:

- vertikale Mittelung und zweidimensionale Interpolation (wie oben beschrieben)
- dreidimensionale Interpolation.



Anteil der Verweilzeit im ungesättigten Bereich (%)



Grundwasserzehrung

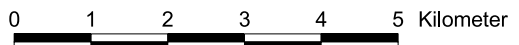


Abbildung 12: Anteil der Verweilzeit im ungesättigten Bereich an der Gesamtverweilzeit in der Grundwasserüberdeckung

Die zweidimensionale Interpolation hat den Vorteil, dass der Aufwand geringer und die Vorgehensweise leichter reproduzierbar ist. Nachteilig ist, dass für die vertikale Mittelung nur die Bohrungen verwendet werden dürfen, die auch den Grundwasserleiter erreicht haben, und dass die Informationen zur vertikalen Differenziertheit verloren gehen. Das kann unter Umständen zu einem etwas schlechteren Interpolationsergebnis in Bereichen geringer Aufschlussdichte führen.

Zu Vergleichszwecken wurden die Feldkapazität und die Porosität für den Raum Pasewalk auch dreidimensional interpoliert und anschließend die Verweilzeiten berechnet. Es kam die Inverse-Distance-Methode zur Anwendung (Anisotropieellipsoid 1:10). Bei der dreidimensionalen Interpolation konnten flachere Bohrungen und die Angaben der Bodenkarte (obere 2 m) als zusätzliche Informationen herangezogen werden. In der Abbildung 13 sind die Unterschiede gegenüber der 2D-Interpolation dargestellt. Größere Abweichungen treten vor allem in Bereichen morphologischer Hochlagen auf, die nicht durch tiefe Bohrungen belegt sind.

Eine Analyse der Ergebnisse zeigte, dass bei den gewählten Interpolationseinstellungen (Anisotropie- und Suchellipsoid) die Differenzen vor allem durch die zusätzlich herangezogenen Daten be-

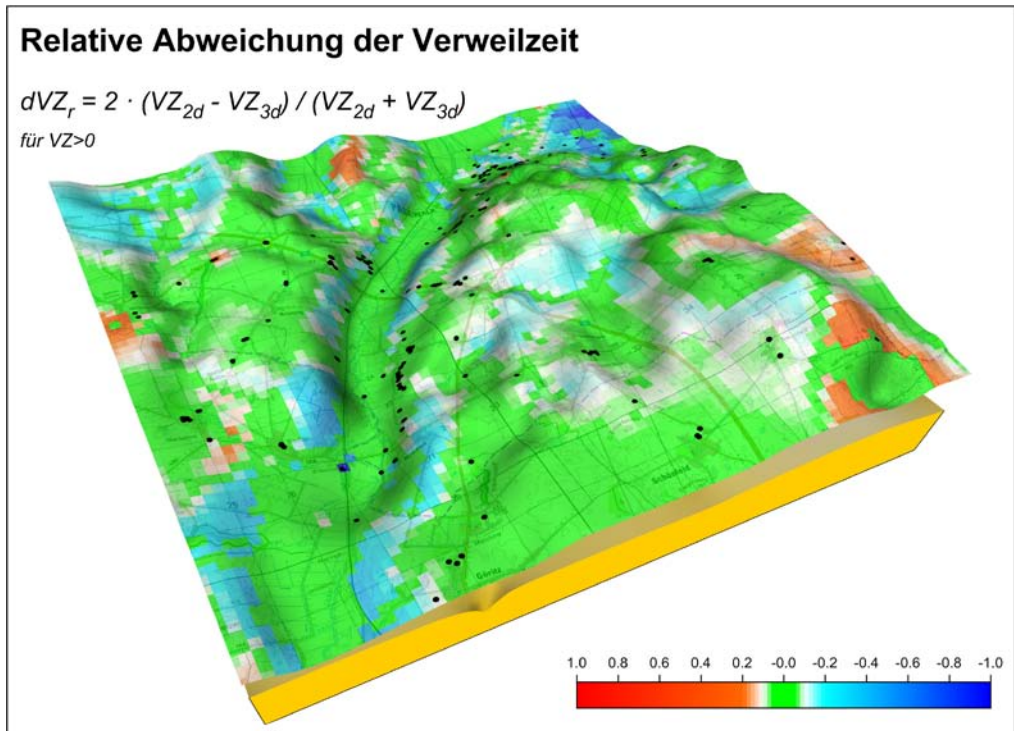


Abbildung 13: Relativer Unterschied zwischen der 2D- und der 3D-Interpolation

wirkt wurden und erst in zweiter Linie verfahrensbedingt sind. In Bereichen fehlender Aufschlüsse wurden die Bodeninformationen teilweise überinterpretiert. So sind z.B. die negativen Abweichungen am Rand des Ueckertales darauf zurückzuführen, dass die Lehmböden am Hang horizontal in das Gebirge hinein wirken, und es ist nicht eindeutig, welches das bessere, realitätsnähere Interpolationsergebnis ist. Dafür wären aufwendigere Tests zur Wahl der 3D-Interpolationseinstellungen erforderlich, die im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen nicht durchgeführt wurden.

Vielmehr präferieren die Autoren eine erweiterte 2D-Interpolation. So könnten z.B. Zusatzinformationen aus der Bodenkarte abgeleitet und als externe Drift beim Kriging berücksichtigt werden. Eine weitere Möglichkeit wäre, die kürzeren Bohrungen und die Bodeninformationen mit einer verminderten Wichtigkeit (entsprechend ihrem Anteil an der Grundwasserüberdeckung) zu belegen. Das würde eine adäquate Berücksichtigung dieser Informationen ermöglichen, ohne dass ein hoher Aufwand für die rechentechnische Umsetzung und für die Ermittlung sinnvoller Interpolationseinstellungen erforderlich wäre.

### Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Nach Ansicht der Autoren ist die Verweilzeitberechnung die eleganteste Methode zur Bewertung der Geschützhtheit einer Grundwasserfassung vor oberflächlich eingetragenen Stoffen. Die Verweilzeitberechnung berücksichtigt alle relevanten Parameter der Schutzfunktion (Mächtigkeit der Überdeckung, Lithologie, Grundwasserflurabstand) und liefert ein sehr anschauliches, allgemeinverständliches Ergebnis. Aufgrund der Analogie zur Fließzeitberechnung im Grundwasserleiter ist es auch möglich, Gesamtließzeiten von der Eintragsfläche bis zur Wasserfassung zu berechnen.

In Mecklenburg-Vorpommern sind die Eingangsdaten für eine qualifizierte Verweilzeitberechnung erfahrungsgemäß verfügbar. Der Aufwand für die Auswertung der Bohrungen ist etwas höher als bei anderen Methoden, er kann aber mit dem hier vorgestellten Verfahren leicht automatisiert werden.

Bei der Geschützhtheitsbewertung auf der Basis von Verweilzeitberechnungen sollten folgende Punkte Beachtung finden:

- Für eine realistische Geschützhtheitsbewertung eines Aquifers ist es bei gespannten Verhältnissen erforderlich, neben der Verweilzeit im ungesättigten auch die Verweilzeit im gesättigten Bereich der Deckschicht zu berücksichtigen. Das ist ein wesentlicher Unterschied zur Sickerwasserprognose entsprechend der Bundesbodenschutzverordnung, die bei einem konkreten Altlastenverdacht zur Anwendung kommt. Sie schreibt als Ort der Beurteilung den Übergangsbereich der ungesättigten zur gesättigten Bodenzone vor und gewährleistet so eine Trennung zwischen Bodenschutzrecht und Wasserrecht.
- Als Grenze zwischen der ungesättigten und der gesättigten Zone kann näherungsweise der Grundwasserdruckspiegel herangezogen werden. Oberhalb des Grundwasserspiegels wird der durchflusswirksame Porenraum durch die Feldkapazität repräsentiert, unterhalb des Grundwasserspiegels ist die Gesamtporosität anzusetzen.
- Um die verfügbaren Informationen maximal auszuschöpfen, müssen alle nur punktförmig bekannten Parameter (Feldkapazität, Porosität, Unterkante Deckschicht, Grundwasserstand) separat interpoliert und anschließend rasterbasiert verrechnet werden. Die Interpolation von Summenparametern (z.B. summarische Feldkapazität, Mächtigkeit der Überdeckung oder gar Verweilzeit) hätte Informationsverluste zur Folge und würde zu vermeidbaren Fehlern führen.
- Die zweidimensionale Interpolation der Parameter liefert in der Regel hinreichend genaue Ergebnisse. Dabei sollte angestrebt werden, auch die Informationen aus Bohrungen, die den Grundwasserleiter nicht erreicht haben, und die Angaben der Bodenkarte zu berücksichtigen.

Es ist vorgesehen, das Verfahren weiterzuentwickeln. Der Schwerpunkt der Untersuchungen wird dabei die Interpolation der Feldkapazität und der Porosität sein.

Das vorgestellte Verfahren ist auch großflächig anwendbar. Über die automatisierte Auswertung der Bohrungsdaten wäre es darüber hinaus möglich, ein landesweites hydrogeologisches Modell der Grundwasserdeckschichten zu erstellen und so das bisherige hydrogeologische Kartenwerk aus den 1980er Jahren (HK 50, Karte der Grundwassergefährdung) zu aktualisieren.

## Literatur

- ATV-DVWK (Hrsg.) (2002): *Merkblatt ATV-DVWK M 504 – Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden.* – 144 S.
- BGR (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5.* – 438 S.; Hannover (Schweizerbart).
- HEINKELE, T.; VOIGT, H.-J.; JAHNKE, C.; HANNAPPEL, S. & DONAT, E. (2002): *Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern.* – UBA Texte 19/2002: 126 S.; Dessau (UBA).
- HENNIG, H. & HILGERT, T. (2007): *Dränabflüsse – Der Schlüssel zur Wasserbilanzierung im nordostdeutschen Tiefland.* – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 51, 6: 248-257; Koblenz (BfG).
- HÖLTING, B.; HAERTLE, T.; HOHBERGER, K.-H.; NACHTIGALL, K.H.; VILLINGER, E.; WEINZIERL, W. & WENDLAND, F.; BERTHOLD, G.; FRITSCHKE, J.-G.; HERRMANN, F.; KUNKEL, R.; VOIGT, H.-J. &

- VERECKEN H. (2011): *Konzeptionelles hydrogeologisches Modell zur Analyse und Bewertung von Verweilzeiten in Hessen.* – Grundwasser, 16, 3: 163–176.
- WROBEL, J.-P. (1995): *Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung.* – Geol. Jb., C 63: 65 S.; Hannover (Schweizerbart).
- ZEILFELDER, S.; REJMAN-RASINSKA, E. & HANNAPPEL, S. (2011): *Ermittlung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung nach der DIN 19732 für Mecklenburg-Vorpommern.* – Gutachten der HYDOR GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern – 54 S.; Berlin.

### **Anschriften der Autoren**

HEIKO HENNIG, Lange Reihe 26, 17489 Greifswald, hh@umweltplan.de

TORALF HILGERT, Zum Steilufer 62, 19065 Görslow, t.hilgert@fugro.de