



Förderprogramm der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)

Abschlussbericht

Arbeitshilfe zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie. Ermittlung von Verweilzeiten und Denitrifikation in der ungesättigten und gesättigten Zone

Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten

Förderprogramm und Förderkennzeichen des Mittelgebers

Länderfinanzierungsprojekt
Wasser-Boden-Abfall
2016, 2017: G 1.16, G 1.17

Projektlaufzeit:

01.01.2016 – 31.05.2018

Projektnummer

52920 (CONSULAQUA Hamburg)

Projektbeteiligte Institutionen



Ansprechpartner

Dr. Carsten Hansen (CAH)
Tel: 040 7888 89 530
Email: carsten.hansen@consulaqua.de

Dr. Christine Kübeck (IWW)
Tel: 0208 4030 3611
Email: c.kuebeck@iww-online.de

Dr. Ralf Kunkel (FZJ)
Tel: 02461 61 3262
Email: r.kunkel@fz-juelich.de

Prof. Dr. Frank Wendland (FZJ)
Tel: 02461 61 3165
Email: f.wendland@fz-juelich.de



Inhalt

1	Hintergrund und Zielstellung	5
1.1	Ausgangssituation / Veranlassung	5
1.2	Hydrogeologische Raumgliederung	6
1.3	Raumbezug von Verweil- und Fließzeiten.....	8
1.4	Zielstellung und Arbeitsschritte.....	9
1.5	Überprüfung der Anwendbarkeit der Verfahren für exemplarische GWK.....	9
1.6	Nutzung, Limitationen und mögliche Risiken der Verweil- und Fließzeitenermittlung	11
2	Grundlegende Verfahrensübersicht	13
2.1	Überblick und Kernbegriffe	13
2.2	Prinzipieller Verfahrensgang	14
2.3	Datengrundlagen und Anforderungen	16
3	Ermittlung von Verweilzeiten in der ungesättigten Zone	17
3.1	Grundlagen	17
3.2	Ermittlung der Verweilzeiten im Boden	19
3.2.1	Verfahrensgang.....	20
3.2.2	Datenanforderung	20
3.2.3	Exemplarische Bestimmung der Verweilzeiten im Boden für die drei Test-GWKs.....	21
3.3	Ermittlung der Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten	23
3.3.1	Verweilzeit in Grundwasserdeckschichten - Lockergestein.....	23
3.3.2	Verweilzeit in Grundwasserdeckschichten - Festgestein.....	24
3.3.3	Verweilzeit in von Lockergestein überlagerten Deckschichten aus Festgestein.....	27
3.3.4	Datengrundlagen zur Verweilzeitenermittlung in Grundwasserdeckschichten	27
3.3.5	Exemplarische Bestimmung der Verweilzeiten in der Grundwasserüberdeckung für drei Test-GWKs.....	28
3.4	Zusammengefasste Verweilzeiten in der ungesättigten Zone	30
3.4.1	Flächenhafter Ansatz – Bezugsmaßstab Grundwasserkörper	30
3.4.2	Quellen und Brunnen – Bezugsmaßstab Einzugsgebiete	31
3.4.3	Punktbezogene Ansätze – Bezugsmaßstab Grundwassermessstellen.....	32
3.5	Anwendbarkeit und Grenzen der Verfahren zur Verweilzeitenermittlung	32
4	Flächenhafte Ermittlung von Grundwasserfließzeiten	34
4.1	Vorbemerkungen	34
4.2	Geohydraulische Grundlagen.....	34
4.3	Verfahrensgang WEKU-Modell	36
4.3.1	Grundlagen	36
4.3.2	Datengrundlagen zur Ermittlung der Fließzeiten im Grundwasser	39
4.3.3	Exemplarische Bestimmung der Fließzeiten im Grundwasser der drei Test-GWKs.....	40
4.4	Anwendbarkeit und Grenzen des WEKU-Verfahrens	43



5	Punktbezogene Verfahren zur Ermittlung der Fließzeit.....	45
5.1	Vorbemerkungen	45
5.2	Verfahrensgang Teufe-Neubildungsverfahren	45
5.2.1	Grundlagen	45
5.2.2	Berechnungshilfe in MS-Excel	48
5.2.3	Datengrundlage.....	48
5.2.4	Anwendbarkeit des Verfahrens	49
5.2.5	Exemplarische Anwendung durch die Projektpartner.....	53
5.2.5.1	Test-GWK 1 (Örtze-Lockergestein links).....	53
5.2.5.2	Test-GWK 2 (SA-014)	56
5.2.5.3	Test-GWK 3 (Hessisches Ried).....	60
5.2.6	Exemplarische Anwendung durch Mitglieder der LAWA-Kleingruppe „Verweilzeiten“	63
5.3	Ermittlung der mittleren Aufenthaltszeit im gesättigten Grundwasserleiter für Brunnen und Quellen.....	65
5.3.1	Grundlagen	65
5.3.2	Berechnungshilfe in MS-Excel	65
5.3.3	Datenanforderung	65
5.3.4	Exemplarische Anwendung – Test GWK 3 (SA-014)	66
5.4	Grundwasserströmungsmodellierung.....	68
5.4.1	Grundlagen	68
5.4.2	Datengrundlagen.....	70
5.4.3	Exemplarische Anwendung GWK 1	71
5.4.4	Exemplarische Anwendung GWK 3	72
5.5	Tracermethoden	73
5.5.1	Datengrundlagen.....	75
6	Aggregation Verweil- und Fließzeiten	76
6.1	Aggregierte Verweil- und Fließzeiten für flächenhafte Betrachtungen.....	76
6.2	Punktbezogener Ansatz – Bezugsmaßstab Grundwassermessstellen	77
6.2.1	Exemplarische Anwendung GWK 1 „Örtze Lockergestein“	78
6.2.2	Exemplarische Anwendung GWK 2 „SA-14“	79
6.2.3	Exemplarische Anwendung GWK 3 „Hessisches Ried“	80
7	Zusammenfassung und Ausblick	81
8	Anhang	85
8.1	Literatur und Regelwerke	85
8.2	Glossar	87

Anlage: Kurzanleitung



Verwendete Abkürzungen

CAH	Consulaqua mbH
EZG	Einzugsgebiet
FOK	Filteroberkante [m unter GOK],
FUK	Filterunterkante [m u GOK]
FZJ	Forschungszentrum Jülich
GOK	Geländeoberkante [m NHN];
GWK	Grundwasserkörper
GWO	Grundwasseroberfläche [m NHN]
IWW	IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH – IWW Zentrum Wasser
GWM	Grundwassermessstelle



1 Hintergrund und Zielstellung

1.1 Ausgangssituation / Veranlassung

Auf landwirtschaftlich intensiv genutzten Flächen werden seit Jahrzehnten Stickstoffdünger zur Ertragssteigerung ausgebracht, die in vielen Regionen zu einer hohen Nitratbelastung des Grundwassers geführt haben. Zu hohe Nitratreinträge ins Grundwasser sind die Hauptursache, dass Grundwasserkörper (GWK) gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL, 2000) und der EU-Grundwasserrichtlinie (EU-GWRL, 2006) wegen einer Überschreitung des Nitratgrenzwertes von 50 mg/l nicht in einem guten chemischen Zustand sind.

Entsprechend den Anforderungen der EU-WRRL (2000) und EU-GWRL (2006) wurden für die betreffenden Grundwasserkörper (GWK), Maßnahmenprogramme entwickelt. Diese haben das Ziel, über eine Minderung der Stickstoff-Einträge ins Grundwasser zu einem Rückgang der Nitratkonzentrationen im Grundwasser zu gelangen. Trotz der umgesetzten Grundwasserschutzmaßnahmen wurde der gute chemische Zustand des Grundwassers bis 2015 für 267 von insgesamt 990 GWK aufgrund der Nitratbelastung verfehlt. Abb. 1-1 zeigt die Lage der GWK und Betrachtungsräume in Deutschland, die wegen zu hoher Nitratgehalte nicht im guten Zustand waren (Stand 2012).

Lange Verweilzeiten in der ungesättigten Zone und lange Fließzeiten im Grundwasser können dazu führen, dass umgesetzte Grundwasserschutzmaßnahmen nicht in allen Grundwasserkörpern bislang den gewünschten Effekt hatten. Für die betreffenden Grundwasserkörper wurden von den Bundesländern daher häufig Ausnahmeregelungen (Fristverlängerungen bis zur Erreichung des guten Zustandes) in Anspruch genommen. Im nächsten Bewirtschaftungszeitraum (2016–2021) der EU-Wasserrahmenrichtlinie sind die Mitgliedstaaten der EU aufgefordert, den guten Zustand zu erreichen.

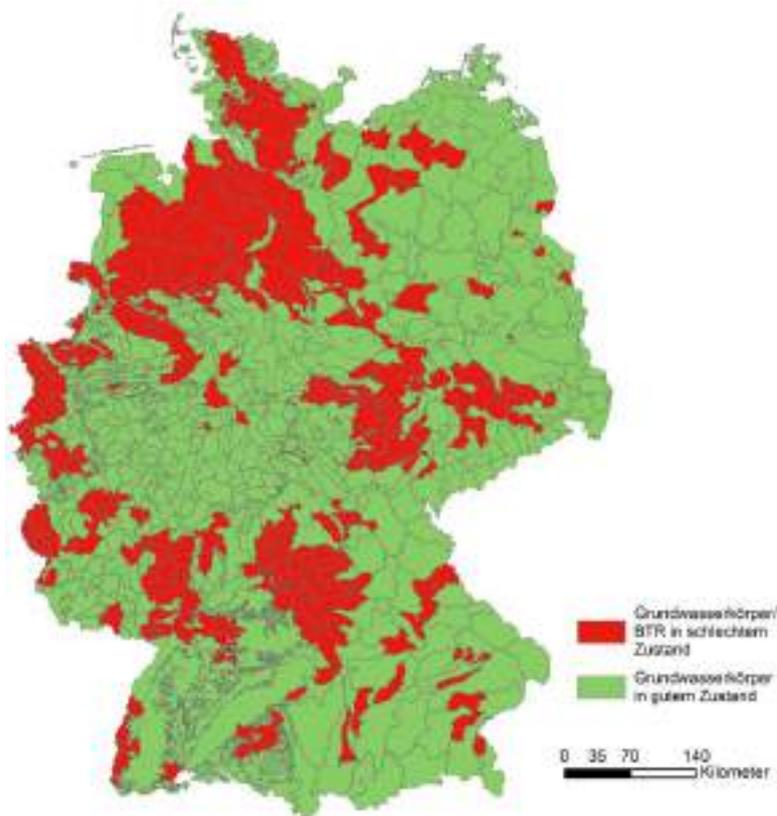


Abb. 1-1:
Lage der Grundwasserkörper in Deutschland, die wegen zu hoher Nitratgehalte 2012 nicht im guten Zustand waren (BMU, 2014).



Wenn Deutschland erneut Fristverlängerungen in Anspruch nehmen will, wird die EU-Kommission vor einer Bewilligung den Zustand des Grundwassers im Hinblick auf die Entwicklung der Nitratbelastung bzw. die eingeleiteten Maßnahmen kritisch prüfen. Es ist damit zu rechnen, dass insbesondere die Gründe für die „Zielverfehlung“ aufzuzeigen sind, d.h. warum die bisher umgesetzten Programme nicht zu einer Verbesserung des Grundwasserzustandes geführt haben. Die Frage nach den Verweil- und Fließzeiten bis die Wirkung von Maßnahmen einsetzt, stellt sich Deutschland deshalb primär für die GWK, die im schlechten Zustand wegen Nitrat sind.

Eine der Kernfragen ist, ob und bis wann der gute Zustand erreicht werden kann. Aus der Praxis ist seit langem bekannt, dass sich der gewünschte Erfolg, d.h. eine Senkung der Nitratkonzentration im Grundwasser auf Werte unterhalb des EU-Grenzwertes von 50 mg/l nicht unmittelbar nach Einleitung der Maßnahmen einstellt. Aufgrund der langen Verweilzeiten in der ungesättigten Zone und der Fließzeiten im Grundwasser ist zu erwarten, dass sich ein Rückgang der Nitratkonzentrationen im Grundwasser in manchen GWK erst mit einer deutlichen zeitlichen Verzögerung bemerkbar machen wird. Es ist also möglich, dass die Ziele der EU-WRRL trotz der umgesetzten Maßnahmenprogramme auch bis 2021 nicht erreicht werden können.

Bevor weitergehende oder alternative Grundwasserschutzmaßnahmen eingeleitet werden, sollte daher zunächst überprüft werden, ob die Verfehlung des Grundwasserschutzziels ggf. auf lange Verweil- und Fließzeiten zurückzuführen ist. Denn in diesem Fall ist die Nicht-Erreichung des guten Zustandes keine Folgeerscheinung unzureichender bzw. räumlich unpassender N-Reduktionsmaßnahmen, sondern über eine natürliche Standortbedingung erklärbar, so dass auf die Einleitung weitergehender oder alternativer Schutzmaßnahmen (zunächst noch) verzichtet werden kann.

1.2 Hydrogeologische Raumgliederung

Die Verweil- und Fließzeit in einem Grundwasserkörper wird neben den hydrologischen Eigenschaften des Bodens und der Grundwasserdeckschichten von den hydrogeologischen Standortbedingungen beeinflusst. Ein wichtiges Kriterium ist der Grundwasserleitertyp, der durch die Größe und die Form der vom Grundwasser durchströmbaren Hohlräume bestimmt wird und auch eine wesentliche Grundlage für die Lage und Abgrenzung/Abgrenzbarkeit von Grundwasserkörpern darstellt.

Grundsätzlich wird zwischen Poren- und Kluftgrundwasserleitern unterschieden. Während sich das Grundwasser in Porengrundwasserleitern überwiegend in den Zwischenräumen von Sand und Kies bewegt, fließt es in Kluftgrundwasserleitern in Trennflächen wie Klüften, Störungen, Verwerfungen oder Schichtgrenzen. In wenigen Kluftgrundwasserleitern kann es auch zu einem Grundwassertransport im Festgestein selbst kommen (intergranulare Porosität). Eine Sonderform der Kluftgrundwasserleiter stellen Karstgrundwasserleiter dar, in denen sich die Trennflächen durch chemische Lösungsprozesse gebildet bzw. mit der Zeit vergrößert haben.

Die hydrogeologische Raumgliederung (BGR, 2015) bezieht die Grundwassertypen als wichtiges Differenzierungskriterium mit ein. Insgesamt wurden für Deutschland 10 Großräume mit ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften und ähnlichen Grundwasserverhältnissen ausgewiesen, die auf derselben geologischen Entstehungsgeschichte und einem einheitlichen tektonischen Baumuster beruhen.

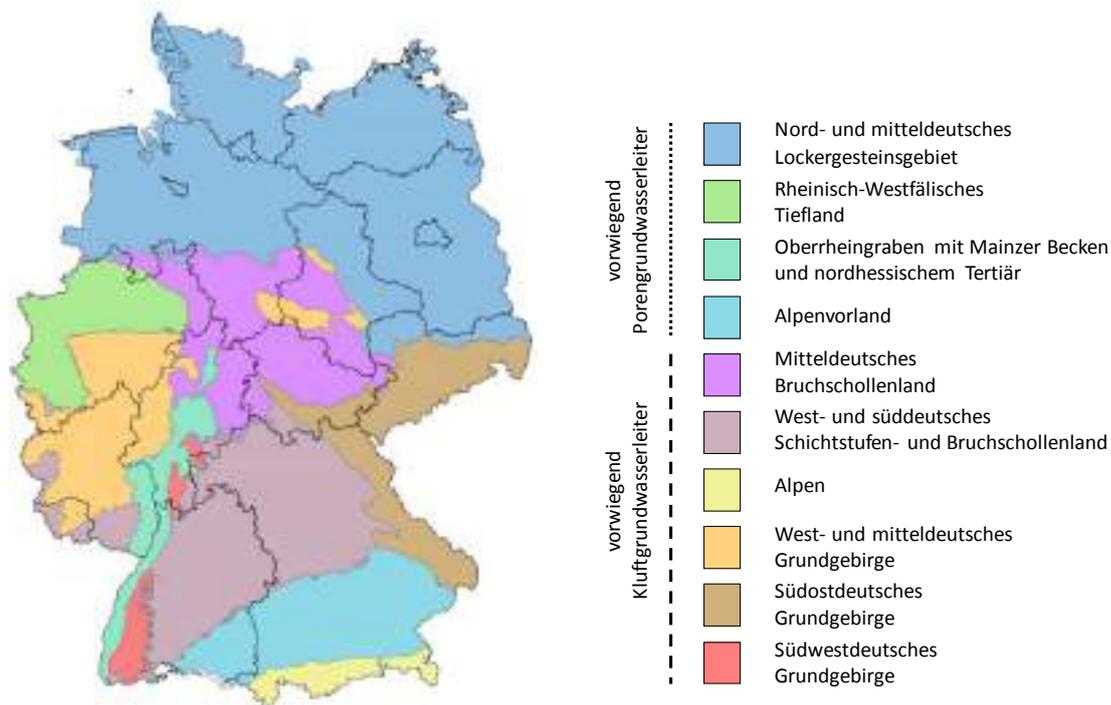


Abb. 1-2: Hydrogeologische Großräume in Deutschland, (verändert nach BGR & SGD, 2015).

Die ergiebigsten Grundwasserleiter befinden sich in den aus quartären Sanden und Kiesen aufgebauten Porengrundwasserleitern der Lockergesteinsregionen Deutschlands, z.B. im Norddeutschen Flachland, dem Oberrheingraben und im Alpenvorland. Deutschlandübergreifend gehören fast 50 % der Grundwasserleiter in diese Kategorie.

Die Grundwasserführung der Kluffgrundwasserleiter in den Mittelgebirgsregionen Deutschlands kann anhand ihrer Petrografie und der tektonischen Überprägung unterschieden werden. Die Sandsteine und Kalksteine der flach gelagerten und schwach diagenetisch veränderten mesozoischen Gesteine des süddeutschen Schichtstufenlandes und der mitteldeutschen Bruchschollenlandschaften können ausgedehnte und ergiebige Grundwasserleiter bilden. Die Grundwasserführung in den Mittelgebirgen, die aus paläozoischen Gesteinen bestehen, ist dagegen generell gering und auf Störungszonen begrenzt. Hierzu gehören Regionen mit diagenetisch stark beanspruchten (verfalteten) Sedimentgesteinen (z.B. Rheinisches Schiefergebirge) sowie Regionen, die aus kristallinen Gesteinen aufgebaut sind (z.B. Schwarzwald, Bayerischer Wald und Fichtelgebirge-Erzgebirge).

GWK im schlechten Zustand wegen Nitrat (Abb. 1-1) treten gehäuft in vier hydrogeologischen Großräumen (Abb. 1-2) auf: dem Nord- und Mitteldeutschen Lockergesteinsgebiet, dem Rheinisch-Westfälischen Tiefland, dem Mitteldeutsches Bruchschollenland und dem West- und süddeutsches Schichtstufen- und Bruchschollenland. In diesen Großräumen dominiert die landwirtschaftliche Bodennutzung. In anderen Großräumen sind GWK im schlechten Zustand eher die Ausnahme, z.B. im West- und mitteldeutsches Grundgebirge, im Südostdeutschen Grundgebirge und im Südwestdeutschen Grundgebirge.



1.3 Raumbezug von Verweil- und Fließzeiten

Für die GWK im schlechten Zustand stellt sich die Frage nach den Verweil- und Fließzeiten im behördlichen Vollzug häufig in Zusammenhang mit Zielerreichungsprognosen, d.h. der Abschätzung der Reaktionszeit, bis sich der Einfluss von Grundwasserschutzmaßnahmen auf abnehmende Nitratkonzentrationen bemerkbar macht.

In diesem Zusammenhang kommt der Fragestellung und dem Raumbezug, auf den sich die Verweil- und Fließzeiten beziehen, eine große Bedeutung zu. So kann einerseits die Verweil- und Fließzeit in Bezug auf punktuelle Bezugsorte, wie z.B. Grundwassermessstellen, in einem GWK im Vordergrund stehen. Andererseits kann auch die flächenhafte Verweil- und Fließzeit des Grundwassers bis zum Vorflutereintritt betrachtet werden (vgl. Abb. 1-3).

In der Praxis wird die Verweil- und Fließzeitermittlung für beide Fragestellungen häufig parallel vorgenommen, wobei, bedingt durch den unterschiedlichen Betrachtungsmaßstab bzw. Raumbezug, verschiedene Ansätze zur Anwendung kommen:

- **Punktbezogene Ansätze** für die Abschätzung der Verweil- und Fließzeit für Grundwasserbeobachtungsmessstellen und Monitoringmessnetzen, Entnahmebrunnen und Quellen sowie
- **Flächenhafte Ansätze** für die Abschätzung der Verweilzeiten in der ungesättigten Zone- und Fließzeiten des Grundwassers bis zum Vorflutereintritt.

Im Unterschied zu Grundwasser-Messstellen sind Angaben zu Verweil- und Fließzeiten für Brunnen und Quellen nur im weiteren Sinn als punktbezogen anzusehen, da diese immer ein Einzugsgebiet aufweisen und innerhalb des Einzugsgebietes unterschiedliche Verweilzeiten und – je nach Entfernung zum Brunnen – auch unterschiedliche Fließzeiten auftreten (Abb. 1-3).

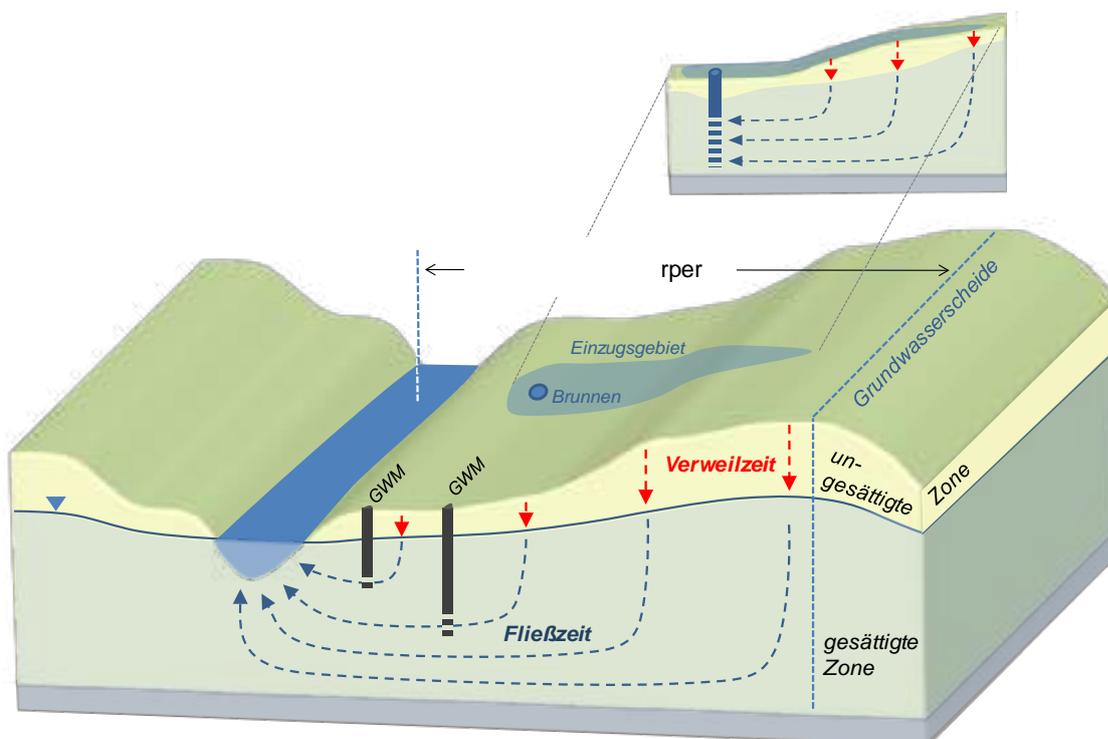


Abb. 1-3: Räumlicher Bezug für die Verweil- und Fließzeitermittlung auf GWK-Ebene - punktuelle Bezugsorte (Grundwassermessstellen (i.e.S.), Brunnen (i.w.S.)) sowie flächenhafte Bezugsorte (Vorfluter)



1.4 Zielstellung und Arbeitsschritte

Trotz der großen Bedeutung der Verweil- und Fließzeiten fehlte es bislang an einer in sich konsistenten Methodik / Vorgehensweise zur Verweil- und Fließzeitenermittlung für die verschiedenen Anwendungsfelder des behördlichen Vollzugs.

Vor diesem Hintergrund soll im LAWA-Forschungsvorhaben eine Bearbeitungshilfe zur Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten erstellt werden, in welcher die unterschiedlichen Ansätze für punktbezogene und flächenhafte Betrachtungen in integrierter Form dargestellt werden. Hierbei sollen vor allem Verfahren berücksichtigt werden, mit denen die Verweil- und Fließzeiten mit vergleichsweise geringem Aufwand abgeleitet werden können. Weiterhin sollen in der Bearbeitungshilfe die Verfahren im Vordergrund stehen, die auf (allgemeinhin) verfügbaren Datengrundlagen aufsetzen, so dass eine Anwendbarkeit ohne aufwendige Datenerhebung gewährleistet ist. Um die Praxistauglichkeit der Handlungsanleitung nachzuweisen, sollen die hierbei ausgewählten Verfahren zudem sowohl von den Auftragnehmern, wie auch von Landesbehörden an Grundwasserkörpern exemplarisch angewendet werden.

Ausgehend von diesen Zielen ergaben sich die folgenden Arbeitsschritte:

- a) Zusammenstellung und Aufbereitung der Methoden zur punktbezogenen und flächenhaften Verweil- und Fließzeitenermittlung
- b) Erstellung einer Bearbeitungshilfe (Leitfaden) für die konsistente und zielgerichtete Ermittlung von punktbezogenen bzw. flächenhaften Verweil- und Fließzeiten unter Nutzung ausgewählter Verfahren
- c) Umsetzung der ausgewählten Verfahren zur punktbezogenen und flächenhaften Verweil- und Fließzeitenermittlung für drei GWK durch die Projektnehmer
- e) Exemplarische Umsetzung des Leitfadens für die Anwendung des punktbezogenen Verfahrens durch die Fachbehörden in den Bundesländern
- f) Abschließende Abstimmung über die im Leitfaden aufzunehmenden Arbeitsschritte zur punktbezogenen und flächenhaften Verweil- und Fließzeitenermittlung

Verweil- und Fließzeiten beziehen sich immer auf die Verlagerung des Wassers im unterirdischen Raum. Für gelöste Stoffe können diese Zeitangaben näherungsweise verwendet werden, sofern sie nicht in Wechselwirkung mit dem Grundwasserleiter stehen. Dies gilt für einen praktisch nicht sorbierenden Stoff wie Nitrat, sofern kein Abbau erfolgt. Je stärker ein Stoff, wie beispielsweise Ammonium, sorbiert wird, desto retardierter erfolgt seine Ortsverlagerung gegenüber der Bewegung des Wassers.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Verweil- und Fließzeiten allein noch keine Aussagen zum Stofftransport erlauben. Hierzu müssen zusätzlich hydrogeochemische Prozesse im Reaktionskontakt mit dem Grundwasserleiter berücksichtigt werden. So ist zur Betrachtung insbesondere der Nitratkonzentrationen im Grundwasser die Denitrifikationsleistung im Sediment des Grundwasserleiters zu beachten.

1.5 Überprüfung der Anwendbarkeit der Verfahren für exemplarische GWK

Die Anwendbarkeit des flächenhaften sowie des punktbezogenen Verfahrens wurde für drei exemplarische Grundwasserkörper überprüft. Bei der Auswahl der GWK wurde darauf geachtet, dass verschiedene, für Deutschland repräsentative Grundwasserleitertypen (Poren- und Kluftgrundwasserleiter) sowie verschiedene hydrologische und bodenkundliche Standortbedingungen abgedeckt sind. Ein weiteres Auswahlkriterium war die kostenfreie und problemlose Verfügbarkeit der für die Modellierung benötigten Datengrundlagen. Die endgültige Festlegung der GWK erfolgte in enger Abstimmung mit dem LAWA-Begleitarbeitskreis: Abb. 1-4 zeigt die Lage der GWK in Deutschland.



GWK 1: Örtze Links:

Hierbei handelt es sich um einen typischen Lockergesteinsgrundwasserleiter im glazial geprägten hydrogeologischen Großraum des Nord- und mitteldeutschen Lockergesteinsgebietes. Der hydrogeologische Teilraum 01522/23 Lüneburger Heide „West“/ „Ost“, in dem sich der GWK „Örtze links“ befindet, weist einen teilweise komplexen Stockwerksbau auf. Generell werden dort tertiäre Braunkohlensande von glaziofluviatilen Sanden und Kiesen überlagert, lokal sind tiefe Rinnenstrukturen eingeschnitten. Der oberste Grundwasserleiter ist aus drenthezeitlichen Schmelzwassersanden aufgebaut.

GWK 2: SAL GW 014 Mansfeld – Querfurt – Naumburger Triasmulden und –platten

Dieser GWK ist für das mitteldeutsche Trockengebiet typisch und repräsentiert mehrheitlich einen Kluftwasserleiter in dem aus mesozoischen Festgesteinen aufgebauten hydrogeologischen Großraum „Sandsteifolgen des Buntsandstein und Kalksteifolgen des Muschelkalks“.

GWK 3: 2396_3101 (Hessisches Ried):

Hierbei handelt es sich um einen Lockergesteinsgrundwasserleiter im glaziofluvial geprägten hydrogeologischen Großraum des nördlichen Oberrheingrabens. Der hydrogeologische Teilraum „Hessisches Ried“, in dem sich der GWK „2396_3101“ befindet besteht aus sandig-kiesige Terrassensedimente des Rheins und Altneckars, welche überwiegend feinkörnige tertiäre Lockersedimente überlagern. Die tertiären und quartären Lockersedimente erreichen eine Mächtigkeit von bis zu 3.500 m.

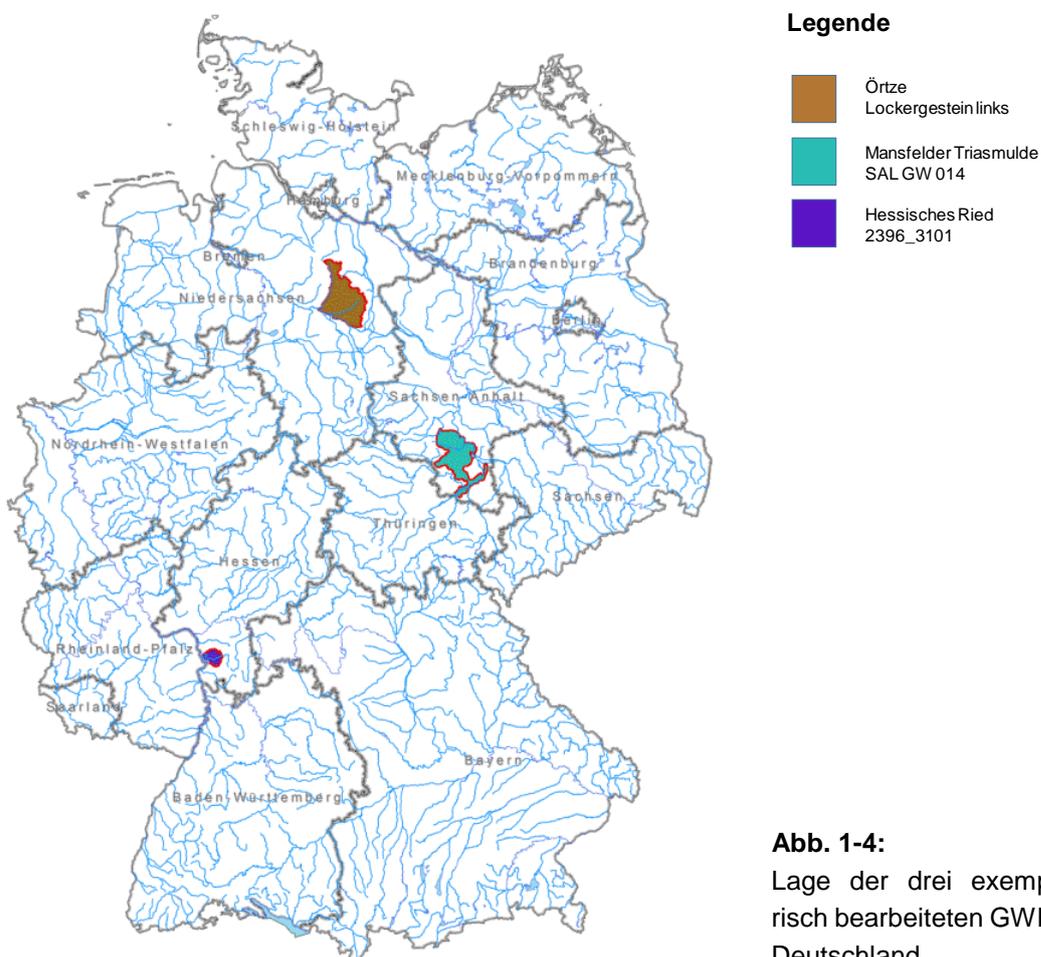


Abb. 1-4:
Lage der drei exemplarisch bearbeiteten GWK in Deutschland



1.6 Nutzung, Limitationen und mögliche Risiken der Verweil- und Fließzeitermittlung

In Abhängigkeit vom Betrachtungsmaßstab und der dahinterstehenden Fragestellung erlauben die in der Bearbeitungshilfe beschriebenen Verfahren zum einen die Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten, die auf einen Punkt bezogen sind (Beobachtungsmessstellen, Entnahmebrunnen, Quellen). Zum anderen enthält die Bearbeitungshilfe Verfahren zur flächenhaften, auf einen Vorfluter bezogenen Ermittlung der Reaktionszeiten eines GWK. An dieser Stelle soll auf Limitationen und mögliche Risiken hingewiesen werden, die bei der Interpretation und Verwendung der Ergebnisse der Verweilzeiten- und Fließzeitenmodellierung, z.B. in Zusammenhang mit Zielerreichungsprognosen für einen GWK, unbedingt beachtet werden müssen:

Nutzung, Limitationen und mögliche Risiken bei der Interpretation und Verwendung von Modellergebnissen des **flächenhaften Verfahrens**

Die Modellergebnisse des flächenhaft anwendbaren Verfahrens können generell für Zielerreichungsprognosen von Oberflächengewässern von Relevanz sein, jedoch setzt sich die in einem Vorfluter zum Abfluss kommende Wassermenge immer aus unterschiedlichen Abflusskomponenten zusammen. Der grundwasserbürtige Abfluss ist immer nur eine Komponente der in einem Vorfluter abfließenden Wassermenge. Andere relevante Abflusskomponenten sind der natürlicher Zwischenabfluss und der Abfluss aus Dränagen. Der Anteil der einzelnen Abflusskomponenten ist von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet unterschiedlich. Dementsprechend variabel sind beispielsweise die über die Abflusskomponenten in die Oberflächengewässer gelangenden Stickstoff (N) - Frachten und die Auswirkung von Minderungsmaßnahmen auf die N-Befrachtung von Oberflächengewässern.

Durch den hohen Anteil an dränierten Flächen ist im Norddeutschen Flachland beispielsweise der Abfluss aus Dränagen in vielen Flusseinzugsgebieten die dominierende Abflusskomponente bzw. der Haupteintragspfad für N-Einträge in die Vorfluter (Kunkel et al., 2016). In vielen Mittelgebirgsregionen ist der natürliche Zwischenabfluss die dominierende Abflusskomponente, durch den der Anteil des Grundwasserabflusses am Gesamtabfluss vermindert wird. Bei beiden Standortbedingungen sind über eine Verweil- und Fließzeitermittlung der grundwasserbürtigen Abflusskomponenten alleine daher keine Zielerreichungsprognosen für Oberflächengewässer ableitbar.

Zu beachten ist auch, dass es in vielen Oberflächengewässersystemen aufgrund schwankender Grundwasserstände zu einem Wechsel zwischen infiltrierenden und exfiltrierenden Bedingungen (oft jahreszeitlich) kommt. Der Grundwasserabfluss in die Oberflächengewässer kann damit zeitlich begrenzt sein.

Lediglich in GWK in Grundwasserneubildungsgebieten, d.h. dort, wo der größte Teil des versickernden Niederschlags den Grundwasserleiter erreicht und die Wasserführung eines Vorfluters über den Grundwasserabfluss gesteuert ist, entspricht die flächenhaft für den GWK ermittelte Verweil- und Fließzeit weitestgehend dem Reaktionszeitraum bis zu dem sich im Oberflächengewässer die Wirkung von Minderungsmaßnahmen bemerkbar macht. Nur in solchen GWK können die Verweil- und Fließzeiten der grundwasserbürtigen Abflusskomponenten für Zielerreichungsprognosen für Oberflächengewässer verwendet werden. Um die Bedeutung des grundwasserbürtigen Abflusses für die Wasserführung eines Oberflächengewässers richtig einzuschätzen und Fehlinterpretationen zu vermeiden, sollte die flächenhafte Verweil- und Fließzeitermittlung in einem GWK daher immer in Kombination mit einer Wasserhaushaltsmodellierung erfolgen.



Nutzung, Limitationen und mögliche Risiken bei der Interpretation und Verwendung von Model-
lgergebnissen des **punktbezogenen Verfahrens**:

Mit dem punktbezogenen Verfahren lässt sich einerseits die Reaktionszeit von Grundwas-
serentnahmebrunnen und Quellen abschätzen. In Trinkwassergewinnungsgebieten erfolgt
in der Praxis eine sehr gezielte und räumlich begrenzte Umsetzung von Grundwasserschutz-
maßnahmen, z.B. für das Einzugsgebiet eines Brunnens. Über die punktscharf ermittelten
Verweil- und Fließzeiten kann in diesem Zusammenhang eine Reaktionszeit des Brunnens
auf aktuell eingeleitete Maßnahmen im definierten Einzugsgebiet abgeschätzt werden. Die
sachgemäße Zuordnung des Einzugsgebiets wird hierbei vorausgesetzt. Es ist zu erwähnen,
dass insbesondere für Quellen im Festgestein dies nicht immer eindeutig gewährleistet wer-
den kann. Darüber hinaus müssen in diese Betrachtung Schwankungen der Förderleistung
bzw. Schüttung einbezogen werden, da sich diese im direkten Zusammenhang mit dem zu
definierenden Einzugsgebiet stehen. So kann insbesondere mit der Förderleistung die Aus-
dehnung des Einzugsgebiets maßgeblich beeinflusst werden.

Mit dem punktbezogenen Verfahren lässt sich andererseits die Reaktionszeit von Grund-
wasserbeobachtungsmessstellen (Grundwassermessstellen / Grundwasserbeobachtungs-
brunnen) als Teil des Monitoringmessnetzes abschätzen. Grundwassermessstellen werden
eingerrichtet, um die Grundwasserqualität in einem GWK zu überwachen. Im Rahmen der
Umsetzung der WRRL dienen Grundwassermessstellen u. a. dazu, die Wirksamkeit von
Maßnahmenprogrammen, z.B. zur Reduktion des Nitrateintrags ins Grundwasser, zu über-
prüfen. In der Praxis werden Grundwassermessstellen in einem GWK dort installiert, wo im
Hinblick auf die hydrogeologische Standortsituation sowie die festgestellten Belastungen
eine große Repräsentativität vorliegt. Abnehmende Konzentrationen (Trends) an repräsen-
tativen Grundwassermessstellen können nach entsprechender Verweil- und Fließzeit eine
erfolgreiche und zielführende Umsetzung von Maßnahmenprogrammen an der betreffenden
Grundwassermessstelle belegen. Dazu wird auch der Bereich abgeschätzt, aus dem das
neugebildete Grundwasser zu der entsprechenden Grundwassermessstelle strömt. Ledig-
lich bei Messstellen, die an der Grundwasseroberfläche verfiltert sind, entspricht i.d.R. das
Zustromgebiet dem Ort der Messstelle.

Die Repräsentativität einer Grundwassermessstelle ist aber weder ein Beleg für die konsis-
tente und flächendeckende Umsetzung von Maßnahmen im gesamten GWK, noch ist aus
der Reaktionszeit der Messstelle ein Rückschluss auf die Reaktionszeit des GWK möglich.
In diesem Zusammenhang besteht die Gefahr, dass kleinräumig und ausschließlich im Zu-
strom einer Messstelle umgesetzte Grundwasserschutzmaßnahmen, die einer manipulati-
ven „Messstellensanierung“ gleichkommen, in Kombination mit den Verweil- und Fließzei-
tenergebnissen aus der Anwendung des punktbezogenen Verfahrens unzulässigerweise für
Zielerreichungsprognosen für einen GWK verwendet werden.

Mit dem punktbezogenen Verfahren kann aber nicht nur die Reaktionszeit von Einzelmessstel-
len in Bezug auf Eintragsänderungen durch Schutzmaßnahmen abgeleitet bzw. prognostiziert
werden. Die Anwendung des Verfahrens kann auch für alle Grundwassermessstellen eines in
einem GWK installierten Monitoringmessnetzes erfolgen. Durch Aggregation der Ergebnisse
kann damit die Reaktionszeit des Messnetzes bestimmt werden. Aber auch die Reaktionszeit
des Messnetzes ist keineswegs einer repräsentativen Fließzeit in einem Grundwasserkörper
gleichzusetzen. Die Anwendung des punktbezogenen Verfahrens für diesen Zweck ist nicht
zulässig.



2 Grundlegende Verfahrensübersicht

2.1 Überblick und Kernbegriffe

Im folgenden Kapitel werden die Kernbegriffe sowie die wesentlichen Arbeitsschritte für die Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten erläutert. Hierbei wird vor allem auf die punktbezogenen Methoden Bezug genommen, da die flächenhaften Verfahren komplexe GIS-Berechnungen erfordern und damit eher für eine GWK-übergreifende Bearbeitung auf bundeslandlandesebene geeignet sein. Ein kurzer Überblick zur Vorgehensweise kann auch der in Anlage 1 enthaltenen Kurzanleitung entnommen werden. Zusammen mit einer Excel-Datei, in der die Berechnungsverfahren hinterlegt sind, stellt die Kurzanleitung eine einfache Bearbeitungshilfe zur Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten dar. Grundlagen und formelle Ableitungen zu den einzelnen Verfahren werden für die Ermittlung der Verweilzeiten in Kapitel 3 und für die Fließzeiten in Kapitel 4 beschrieben.

In Abb. 2-1 sind die Kernbegriffe sowie die generalisierte geohydraulische Situation zur Beschreibung von Verweil- und Fließzeiten skizziert. Kernbegriffe:

Verweilzeit	Dauer der Durchsickerung der ungesättigten Zone, differenziert nach Boden und Grundwasserdeckschichten
Fließzeit	Fließzeit im Grundwasser vom Ort der Neubildung bis zur Filterstrecke der Grundwassermessstelle
Mittlere Aufenthaltszeit	Zeit zwischen Neubildung und Förderung in der Grundwassermessstelle, dem Förderbrunnen bzw. Quellaustritt für ein Einzugsgebiet

Unter natürlichen Abstromverhältnissen strömt das neugebildete Grundwasser flächenhaft in Richtung auf die Vorfluter ab. Grundwassermessstellen erfassen – je nach Filtertiefe – einzelne Bahnlinien des Grundwasserabstroms. Mit zunehmender Filtertiefe werden üblicherweise ältere Grundwässer mit entsprechend längeren Fließzeiten erfasst, deren Neubildungsgebiet weiter von der Messstelle entfernt liegt. Demgegenüber würde eine im Bereich der Grundwasseroberfläche verfilterte Messstelle nur das neugebildete Grundwasser, aus dem Nahbereich der Messstelle erfassen, so dass sich sehr geringe Fließzeiten ergeben.

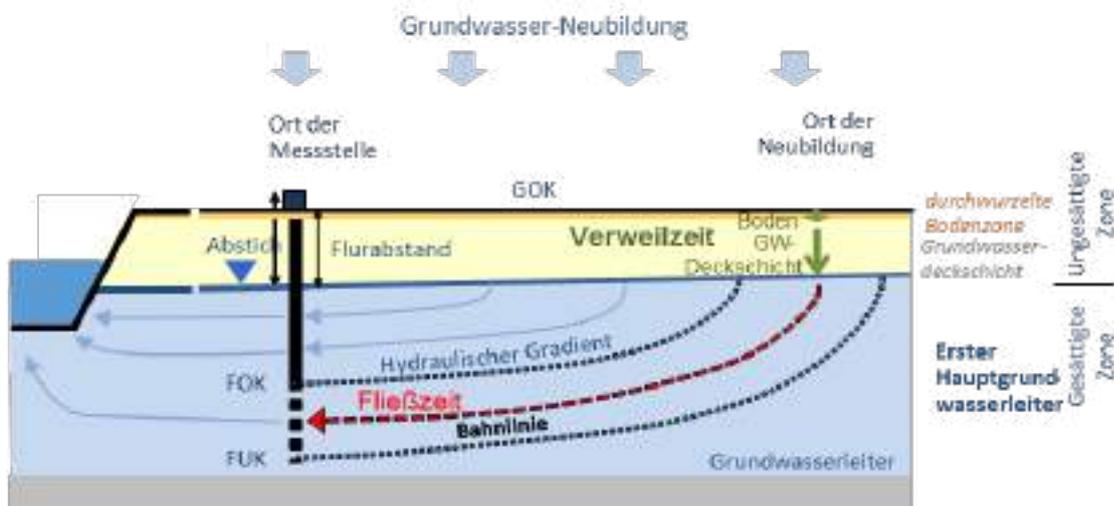


Abb. 2-1: Idealisiertes Profil eines GWK (FOK: Filteroberkante, FUK: Filterunterkante)



Je länger die Filterstrecke einer Messstelle ist, desto größere Unterschiede ergeben sich im Hinblick auf die Fließzeiten der erfassten Grundwasserbahnlinien und auf die jeweiligen Orte, wo diese Grundwässer neu gebildet worden sind.

Während eine Grundwassermessstelle nur Grundwasser aus einem sehr schmalen Stromstreifen im natürlichen Grundwasserströmungsfeld erfasst, weisen Brunnen ein von der Entnahmerate abhängiges Einzugsgebiet auf (vgl. Abb. 1-3). Auch weisen sie üblicherweise weitaus längere Filterstrecken auf. Bei den geförderten Wässern handelt es sich somit immer um Mischwässer mit einer breiten Streuung in den jeweiligen Fließzeiten. Dies gilt prinzipiell auch für natürliche Grundwasseraustritte (Quellen).

Abschließend soll hier darauf hingewiesen werden, dass die Grundwasserströmung immer ein dynamisches System darstellt, dass sich kontinuierlich auf veränderliche Randbedingungen einstellt. Hierzu gehören saisonale und langfristige Änderungen in den Grundwasserneubildungsraten aber auch Grundwasserentnahmen und veränderte Wasserstände in Oberflächengewässern. Für eine generalisierende Betrachtung bezüglich der Verweil- und Fließzeiten werden die dynamischen Aspekte im Folgenden außer Acht gelassen. Alle Verfahren und Angaben beziehen sich immer auf mittlere langjährige Verhältnisse.

2.2 Prinzipieller Verfahrensgang

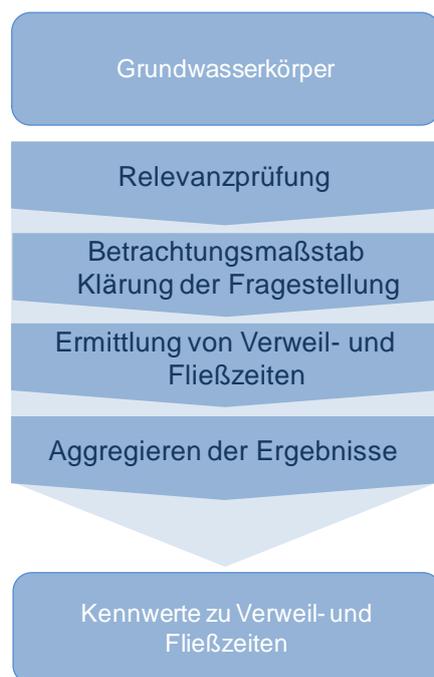


Abb. 2-2: *Prinzipieller Verfahrensgang zur Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten*

einen GWK eine Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten überhaupt erforderlich ist. In der Regel werden hierbei die GWK im schlechten chemischen Zustand bzw. die als gefährdet eingeschätzten GWK identifiziert. Eine Betrachtung der Verweil- und Fließzeiten ist jedoch auch unabhängig vom chemischen Zustand des GWK möglich.

Die Ermittlung von Kennwerten zu Verweil- und Fließzeiten erfolgt in vier aufeinander aufbauenden Arbeitsschritten, die in Abb. 2-2 stichpunktartig zusammengefasst sind.

Vorlaufend einer Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten sollten die Relevanz und die zu beantwortende Fragestellung bzw. der Betrachtungsmaßstab (punkt- oder flächenbezogene Verfahren) geprüft werden. Anschließend werden Verweil- und Fließzeiten ermittelt. Abschließend können die Ergebnisse aggregiert und – in Abhängigkeit von der Fragestellung bzw. dem gewählten Raumbezug – zu Kennwerten zusammengefasst werden.

Häufig stellt sich im behördlichen Vollzug die Frage nach Verweil- und Fließzeiten vor allem für GWK im schlechten Zustand im Zusammenhang mit Zielerreichungsprognosen, d.h. bis wann sich der Einfluss von Grundwasserschutzmaßnahmen hinsichtlich abnehmender Nitratkonzentrationen bemerkbar macht.

Im ersten Arbeitsschritt erfolgt die Relevanzprüfung (Abb. 2-3), bei der festgestellt wird, ob für

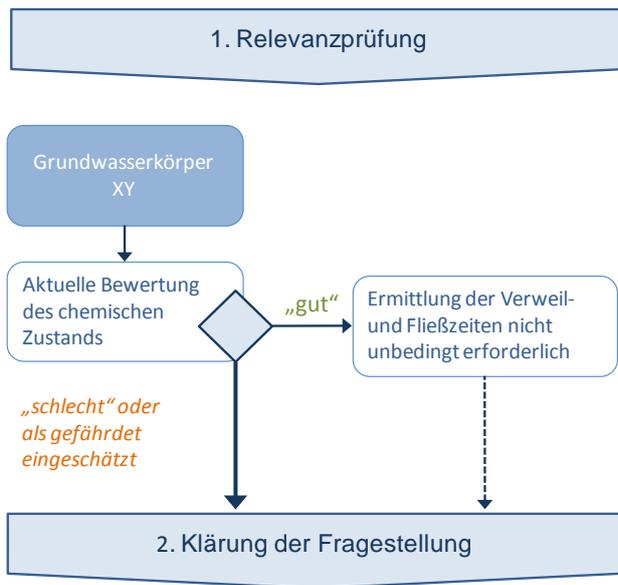


Abb. 2-3:
Verfahrensgang bei der Relevanzprüfung

Anschließend sind der Betrachtungsmaßstab und die dahinter stehende Fragestellung zu klären (siehe Abb. 2-4). Grundsätzlich ist zwischen einer punktbezogenen Betrachtung und einer flächenbezogenen Betrachtung zu unterscheiden. Über die punktbezogene Verweil- und Fließzeitenanalyse wird die Reaktionszeit von Grundwassermessstellen (aggregiert als Reaktionszeit des Monitoringmessnetzes), Entnahmebrunnen und Quellen ermittelt. Flächenhafte Verfahren geben die großräumige Verteilung von Verweilzeiten an. Die flächenhafte Ermittlung von Fließzeiten im Grundwasser ist hier i.d.R. auf den Vorfluter bezogen.

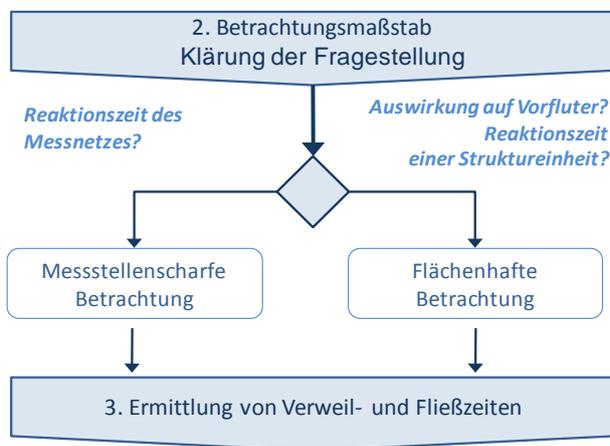


Abb. 2-4:
Verfahrensgang zur Klärung der Fragestellung und des anzuwendenden Verfahrens

Anhand definierter Verfahren werden im dritten Schritt die Verweilzeiten im Boden und in den Grundwasserdeckschichten sowie die Fließzeiten im Grundwasser ermittelt. Grundsätzlich wird bei der Ermittlung der Verweilzeiten in der ungesättigten Zone zwischen Locker- und Festgesteinen unterschieden. Während für Lockergesteine die Bestimmung der Verweilzeiten in Anlehnung an die DIN 19732 erfolgt, basiert die Ableitung für Festgesteine nach einem von Hölting et al. (1995) vorgeschlagenen Punktwertverfahren. Die Beschreibung der zugrundeliegenden Verfahren erfolgt in den Kap. 3 und 4. In einem letzten Schritt werden die Ergebnisse aggregiert. Hierbei gibt es je nach Fragestellung eine Reihe von Optionen, die von der separaten oder summarischen Aggregation von Verweil- und Fließzeiten für Einzelmessstellen bis zu Aggregation auf GWK-Ebene reichen. Diesbezügliche Auswertungen finden sich in Kapitel 0.

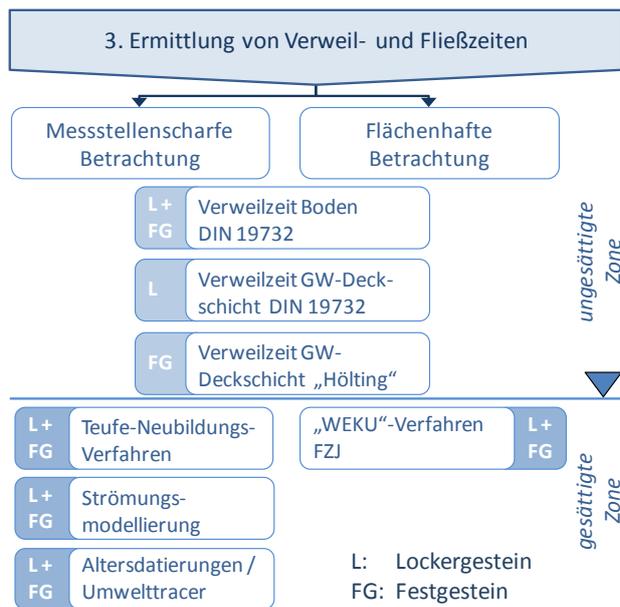


Abb. 2-5:
Verfahrensgang zur Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten

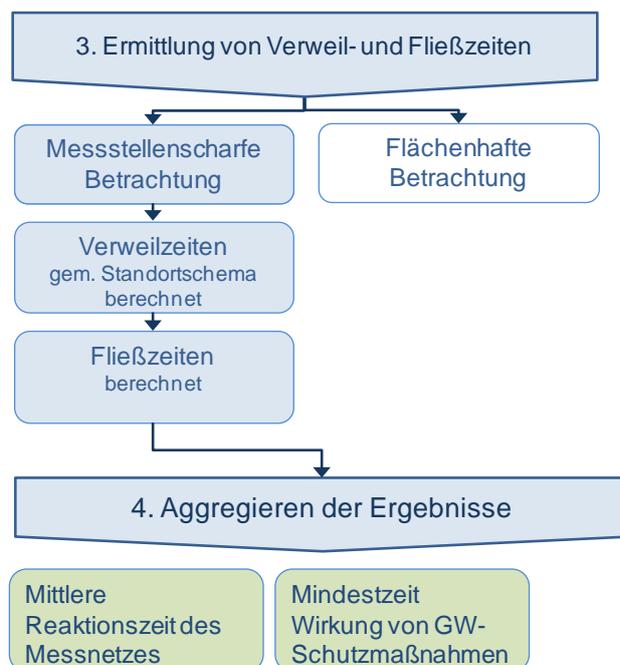


Abb. 2-6:
Verfahrensgang zur Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten

2.3 Datengrundlagen und Anforderungen

Für die Verweil- und Fließzeitenmodellierung werden generell hydrologische, pedologische und hydrogeologische Datengrundlagen benötigt. Schon bei der Methodenauswahl wurde darauf geachtet, dass die Datengrundlagen aus bestehenden digitalen thematischen Datenbeständen entnommen werden können und dass die Datengrundlagen im Allgemeinen bundesweit verfügbar sind.

Je nach Fragestellung und anzuwendendem Verfahren kommen hierbei jedoch unterschiedliche Datengrundlagen zum Einsatz. Konkrete Übersichten zu den Datenanforderungen werden deshalb tabellarisch oder in einer schematischen Übersicht, in den jeweiligen Kapiteln vorgestellt.



3 Ermittlung von Verweilzeiten in der ungesättigten Zone

In Kap. 3-1 werden allgemeine Grundlagen, Begriffe und Annahmen zur Verweilzeitenermittlung erläutert. Die eigentlichen Verfahren zur Verweilzeitenermittlung sowie die jeweils benötigten Datengrundlagen, sind in Kapitel 3.2.1 und 3.2.2 ausführlich beschrieben.

3.1 Grundlagen

Generell erfolgt die Ermittlung von Verweilzeiten für die ungesättigte Zone, d.h. für den gesamten nicht vollständig mit Wasser gefüllten Bereich von der Bodenoberfläche bis zur Grundwasseroberfläche, unterhalb der die gesättigte Zone beginnt [DIN-4049-3].

Die ungesättigte Zone lässt sich in den Boden und den Bereich der Grundwasserdeckschichten untergliedern (Abb. 3-1). Der Boden ist das mit Wasser, Luft und Lebewesen durchsetzte, unter dem Einfluss der Umweltfaktoren an der Erdoberfläche entstandene und im Laufe der Zeit sich weiterentwickelnde Umwandlungsprodukt mineralischer und organischer Substanzen (BGR, 2005). Die Grundwasserdeckschichten bezeichnen Gesteinskörper zwischen der Unterkante des Bodens und dem wassererfüllten Grundwasserleiter.

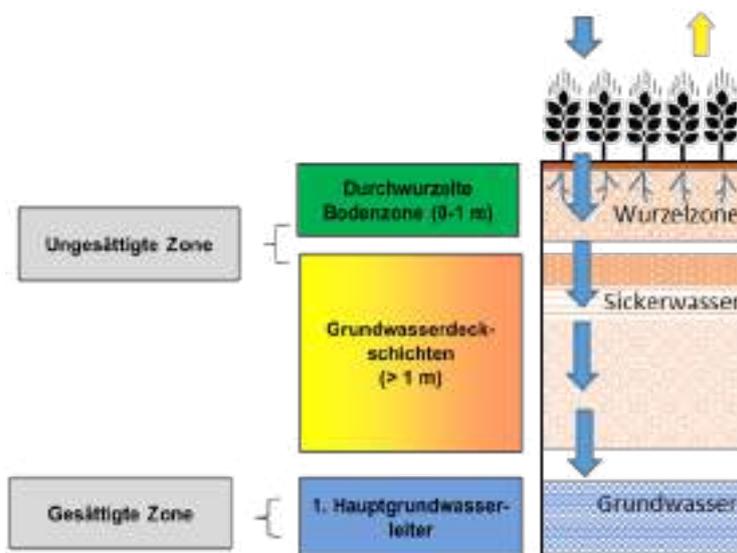


Abb. 3-1:
Schaubild zur Verdeutlichung der ungesättigten Zone und der gesättigten Zone

Die Wassermenge, die die ungesättigte Zone durchfließt, hat einen wichtigen Einfluss auf die Verweilzeit. Je höher die Wassermenge, die den Boden und die Grundwasserdeckschichten durchströmt, desto geringer ist ansonsten bei gleichen hydraulischen Eigenschaften des Bodens die Verweilzeit. Die entscheidenden Wasserhaushaltsgrößen in diesem Zusammenhang sind die Sickerwasserhöhe und die Grundwasserneubildungshöhe (Abb. 3-2).

Die Sickerwasserhöhe ist als die Wassermenge definiert, die den Boden unter Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs abwärts verlässt. Das dabei gebildete Sickerwasser füllt den Grundwasserspeicher auf und/oder verlässt die Sickerzone als Direktabfluss (Dränageabfluss oder natürlicher Zwischenabfluss) (BLA-GEO, 2004). Während die Sickerwasserrate sich auf die Untergrenze des durchwurzelten Bodenraumes bezieht, bezeichnet der Begriff der Grundwasserneubildung nach DIN 4049-3 den Zugang von in den Boden infiltriertem Wasser durch den Sickerraum zum Grundwasser. Die eigentliche Grundwasserneubildung, d.h. der Sickerwasseranteil, der den Grundwasserleiter erreicht, findet an der Grundwasseroberfläche des obersten Grundwasserstockwerks statt.

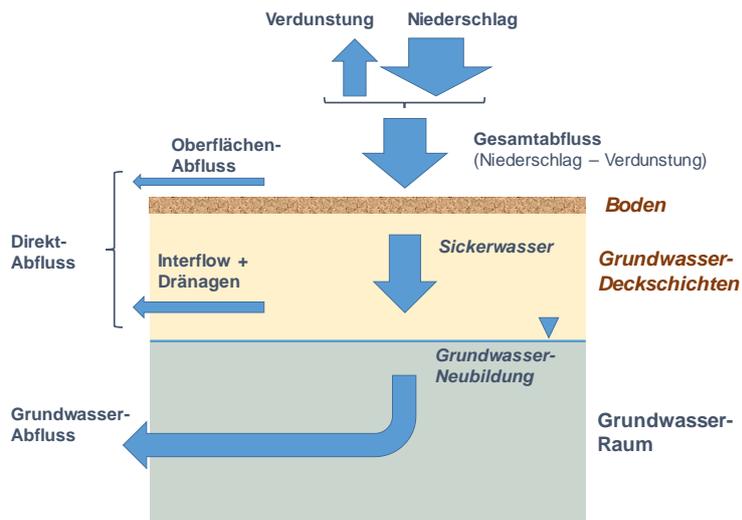


Abb. 3-2:
Vereinfachtes Schema
der Wasserhaushalts-
komponenten unter be-
sonderer Berücksichti-
gung der Komponenten
des Abflusses.

Die Sickerwasserhöhe entspricht also bei vielen Standorten nicht der Grundwasserneubildung, was bei der Berechnung von Verweilzeiten für die ungesättigte Zone zu berücksichtigen ist. Entscheidend für die Verweilzeitenermittlung ist in diesem Zusammenhang, in welchem Tiefenbereich der ungesättigten Zone die Abtrennung der Direktabflusskomponenten erfolgt.

Dränagesysteme wurden generell an Standorten installiert, wo Böden oberflächennah durch Grundwasser oder Stauwasser beeinflusst waren, so dass die landwirtschaftliche Produktivität herabgesetzt oder eine landwirtschaftliche Nutzung von vornherein ausgeschlossen war. Vor allem in den GWK des Nord- und mitteldeutschen Lockergesteinsgebiets haben Dränagesysteme daher einen großen Einfluss auf den Landschaftswasserhaushalt. Drainagen wurden je nach Bodentyp in einem Bereich zwischen ca. 0,8 m und 1,20 m unter GOK verbaut (Tetzlaff et al., 2011). Liegt in dieser Tiefenlage die Grundwasseroberfläche, so beginnt nach Definition der Grundwasserleiter. Dementsprechend ist die Ermittlung der Verweilzeit in den Grundwasserdeckschichten für dränierete Standorte überflüssig. Für die oberhalb der durch Dränagesysteme künstlich abgesenkten Grundwasseroberfläche liegende Bodenzone ist bei dräniereten Standorten zur Verweilzeitenermittlung generell die Sickerwasserhöhe anzusetzen. Wird durch die Dränage Stauwasser abgeführt, ist die Sickerwasserhöhe zu reduzieren (ca. 40-60%).

Der Interflow ist vor allem in Mittelgebirgsregionen eine bedeutsame Abflusskomponente, die sich generell auf nicht künstlich entwässerten Standorten bilden kann, und zwar dort, wo vertikal versickerndes Wasser in der ungesättigten Zone auf eine wasserundurchlässigere Schicht stößt, so dass es gezwungen wird, oberhalb der wasserstauenden Schicht lateral abzufließen. Für viele GWK im west- und mitteldeutschen Grundgebirge sowie im südostdeutschen und südwestdeutschen Grundgebirge werden häufig mehr als 85 % der Sickerwasserhöhe (Bogena et al., 2003) über den Interflow abgeführt.

Der Tiefenbereich, in dem sich der natürliche Zwischenabfluss (Interflow) abtrennt, ist –anders als beim Drainageabfluss- nicht eindeutig lokalisierbar. Vereinfachend wird angenommen, dass die Abtrennung des Interflows unmittelbar an der Obergrenze des Aquifers erfolgt.

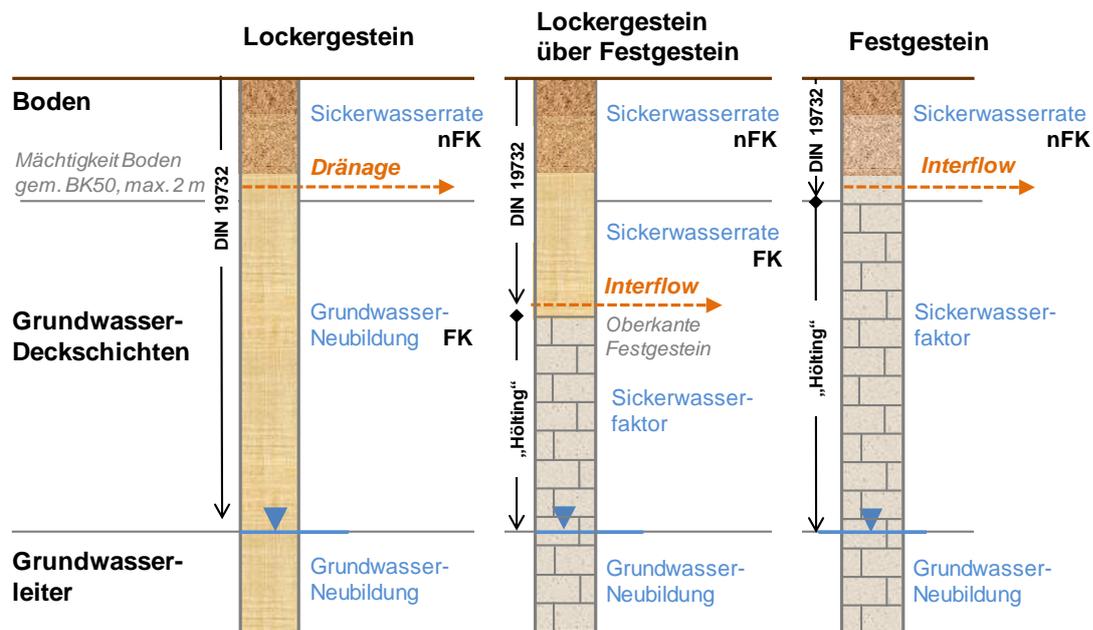


Abb. 3-3: Schaubild zur Verdeutlichung der Verweilzeitenermittlung entsprechend des lithologischen Untergrundaufbaus

Flächendeckende Informationen zur Sickerwasserhöhe sind daher eine Grundvoraussetzung für die Abschätzung der Verweilzeit im Boden und in den Grundwasserdeckschichten. Für die Ermittlung der Verweilzeiten in der ungesättigten Zone sind entsprechend des lithologischen Untergrundaufbaus verschiedene Standortsituationen (Fälle) zu unterscheiden (siehe Abb. 3-3), je nachdem ob die Grundwasserdeckschichten unterhalb des Bodens aus Lockergesteinen, aus Festgesteinen oder aus Locker- und Festgesteinen aufgebaut ist.

- Fall 1: Die Grundwasserüberdeckung unterhalb des Bodens besteht ausschließlich aus Lockergestein.
- Fall 2: Die Grundwasserüberdeckung unterhalb des Bodens besteht ausschließlich aus Festgestein.
- Fall 3: Der obere Teil der Grundwasserdeckschichten unterhalb des Bodens besteht aus Lockergestein, der untere Teil der Grundwasserdeckschichten aus Festgestein

Der Hauptgrund für diese Differenzierung ist die unterschiedliche Datenverfügbarkeit für die Grundwasserdeckschichten. Generell liegen für Deckschichten aus Lockergestein bessere und flächendeckendere Daten vor als für Deckschichten aus Festgestein. Dies hat zur Konsequenz, dass für die Ermittlung der Verweilzeiten im Lockergesteinsbereich ein detailliertes Verfahren wie die Modellierung eingesetzt werden kann, während für die Verweilzeitenermittlung in der Festgesteinsregion lediglich ein Schätzverfahren zum Einsatz kommen kann. Im folgenden Kapitel werden die Verfahren zur Verweilzeitenermittlung in der ungesättigten Zone beschrieben.

3.2 Ermittlung der Verweilzeiten im Boden

Im Boden verläuft die Verlagerung des Sickerwassers über die Poren des Substrats. Auf der einen Seite kann bei einer hohen nutzbaren Feldkapazität eine große Wassermenge gegen die Schwerkraft im Boden gehalten werden, so dass dort vergleichsweise hohe Verweilzeiten auftreten, wogegen bei einem geringen Wasserspeichervermögen relativ geringe Verweilzeiten



vorherrschen. Auf der anderen Seite sinkt die Verweilzeit bei steigenden Sickerwasserraten aufgrund des erhöhten Wasserdurchsatzes durch den Boden.

3.2.1 Verfahrensgang

Die Verweilzeit im Boden (t_{Bo}) wird in Anlehnung an DIN 19732 aus dem Wasserspeichervermögen der Böden und der Sickerwasserrate (Q_{SW}) abgeleitet (siehe Gl. 3-1). Für die Bodenzone ist das Wasserspeichervermögen durch die nutzbare Feldkapazität (nFK) charakterisiert, die im Wesentlichen auf der Basis von Angaben zur Bodenart abgeleitet wird und den Teil der Feldkapazität (FK) darstellt, der von den Pflanzen durch die Wurzel aufgenommen werden kann. Der Index (i) in Gl. 3-1 läuft dabei über alle unterscheidbaren Schichten innerhalb des Bodens, die in ihrer jeweiligen Schichtmächtigkeit (d) berücksichtigt werden.

$$t_{Bo} = \frac{1}{Q_{SW}} \sum_i nFK_i \cdot d_i \quad \text{Gl. 3-1}$$

mit:

t_{Bo} Verweilzeit Boden [a] Q_{SW} Sickerwasserrate [mm/a]
 nFK_i nutzbare Feldkapazität [mm/dm] d_i Schichtmächtigkeit [dm]

Unabhängig davon, ob es sich um punktbezogene oder flächenhafte Fragestellungen handelt, erfolgt die Ermittlung der Verweilzeiten im Boden für die drei Standortsituationen gemäß Abb. 3-3 mit diesem Verfahren. Berechnet wird die Verweilzeit im Boden bis zum Ende der Bodenzone bzw. bei drainierten Standorten bis zur Grundwasseroberfläche.

3.2.2 Datenanforderung

Lediglich bzgl. der eingesetzten Datengrundlagen kann es Unterschiede geben. Während für die flächenhafte Anwendung des Verfahrens in der Regel Daten aus überregional (z.B. auf Bundeslandebene) verfügbaren Kartenwerken zur Verfügung stehen, sollten für punktbezogene Anwendungen – sofern vorhanden – Daten aus lokalen Datenerhebungen bzw. Lokalstudien übernommen werden (vgl. Tabelle 3-1). Für den Fall, dass Werte aus Lokalstudien nicht vorhanden sind, können die Datengrundlagen für die flächenhafte Berechnung aus den entsprechenden Datenquellen (z.B. Karten) für den Bezugsort übernommen werden.

Tabelle 3-1: Datengrundlagen für die Berechnung der Verweilzeiten im Boden (beispielhaft)

Parameter	Datenquelle flächenhafte Berechnung	Datenquelle punktbezogene Berechnung
Mächtigkeit der Bodenschichten	Bodenkarte BK 50	Vorzugsweise lokale Schichtprofile
nutzbare Feldkapazität der Bodenschichten		
Grundwasser-Flurabstand	BK 50; Modellergebnis Landesbehörden	Vorzugsweise lokale GW-Stände
Bodenbedeckungskategorien	Verschneidung aus DLM und CORINE	Vorzugsweise Verschneidung aus DLM und CORINE
Sickerwasserraten	Modellergebnis Landesebene	Vorzugsweise vor Ort Untersuchungen oder lokale Modellergebnisse



3.2.3 Exemplarische Bestimmung der Verweilzeiten im Boden für die drei Test-GWKs

In der folgenden Abb. 3-4 sind alle für die Verweilzeitenermittlung im Boden der drei Test-GWK benötigten Datengrundlagen zusammenfassend dargestellt. Deutlich erkennbar werden die unterschiedlichen Standortbedingungen der Test-GWK. Hinsichtlich der nutzbaren Feldkapazität (Abb. 3-4 oben links) zeigen sich im GWK 1 mit 10-20 mm/dm flächendeckend die geringsten nFK-Werte, während in der Westhälfte von GWK 3 mit nFK-Werten > 40 mm/dm die Böden mit dem größten Wasserspeichervermögen auftreten. Der GWK 2 liegt mit verbreitet auftretenden nFK-Werten 20-30 mm/dm dazwischen.

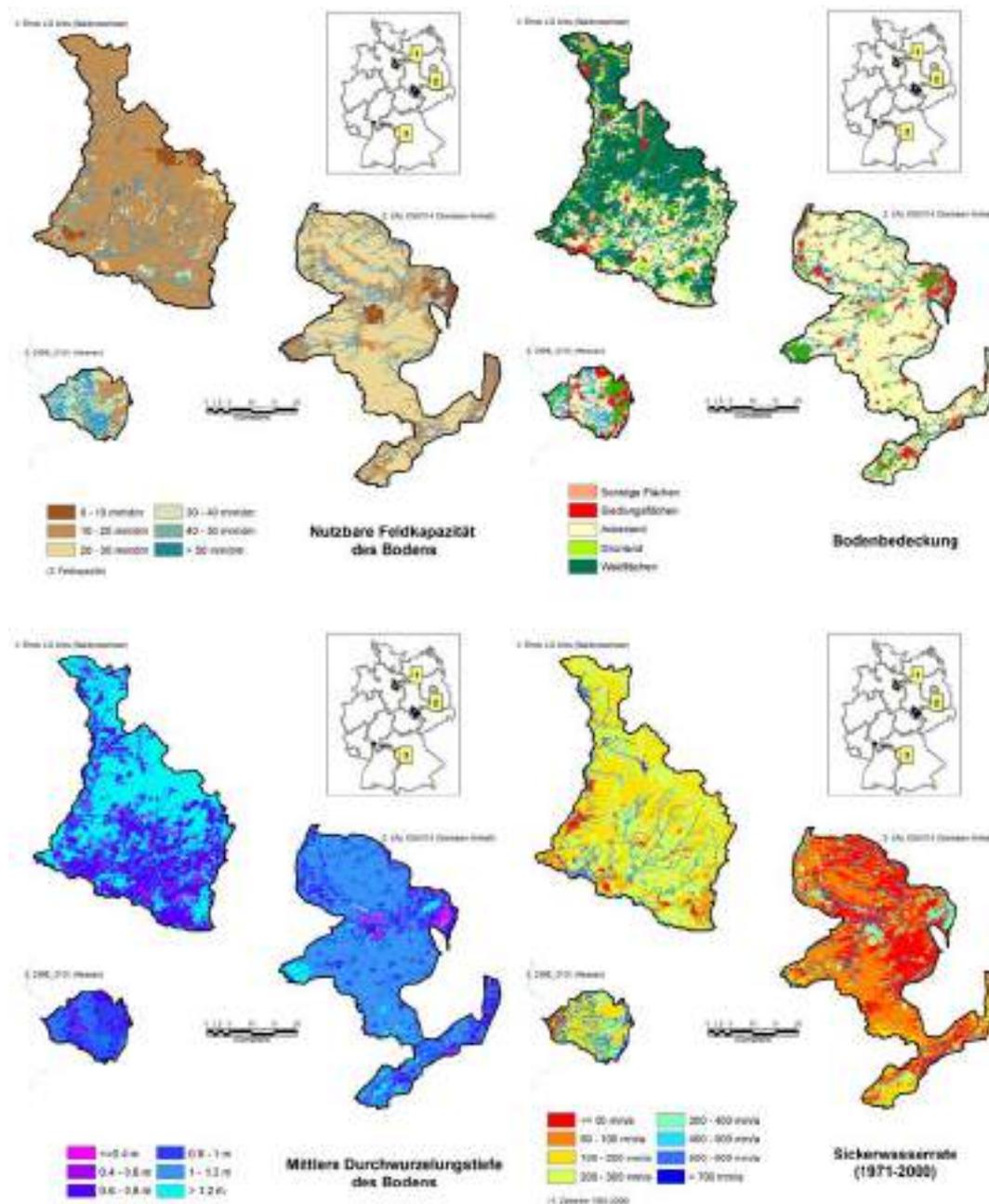


Abb. 3-4: Datengrundlagen für die Verweilzeitenermittlung im Boden der drei Test-GW: – nutzbare Feldkapazität (oben links), Bodenbedeckung (oben rechts), Durchwurzelungstiefe des Bodens (unten links), Sickerwasserrate (unten rechts)



Bei der Landnutzung (Abb. 3-4 oben rechts) fallen der hohe Waldanteil in GWK 1 sowie der hohe Anteil an Ackerflächen in GWK 2 auf. Hinsichtlich des Flurabstandes (Abb. 3-4 links unten) sind in Zusammenhang mit der Verweilzeitenermittlung im Boden nur die Regionen von Interesse, bei denen der Flurabstand im Bereich der Bodenzone, d.h. im Tiefenbereich von ca. 1m – 1.2m, liegt. In diesem Fall erfolgt die Verweilzeitenermittlung nur bis zur Tiefenlage der Grundwasser Oberfläche. Nur GWK 1 zeigt diesbezüglich größere Niederungsbereiche mit Flurabständen von weniger als 1 m. In GWK 2 und GWK 3 treten geringe Flurabstände nur sehr kleinräumig auf, vor allem im Bereich von Flussniederungen.

Mit Sickerwasserraten (Abb. 3-4 unten rechts) zwischen ca. 100 und 300 mm/a zeigen GWK 1 und GWK 3 vergleichbare hydrologische Standortbedingungen, während GWK 2 mit Werten von flächendeckend < 100 mm/a deutlich trockenere Standortbedingungen aufweist.

Abb. 3-5 zeigt die räumliche Verteilung der sich ergebenden Verweilzeiten im Boden, die sich aus dem Zusammenspiel der in Abb. 3-4 dargestellten Parameter ergeben. Abb. 3-6 zeigt die prozentuale Verteilung der Verweilzeiten im Boden in den Einzelerastern der GWK. Im GWK 1 führen die die hohen Sickerwasserraten und die geringe Wasserspeicherfähigkeit der Böden zu geringen Verweilzeiten im Boden. In etwa 92 % der Rasterzellen liegen die Verweilzeiten dort bei weniger als 2,5 Jahren. Bedingt durch die bindigeren Böden weisen im GWK 3 nur ca. 45% der Rasterzellen Verweilzeiten im Boden von weniger als 2,5 Jahren auf. Bei fast 40 % der Rasterzellen liegen die Verweilzeiten in GWK 3 in der Klasse zwischen 2,5 und 5 Jahren. Im GWK 2 treten bei fast 95 % der Rasterzellen Verweilzeiten von 1 Jahr und mehr auf. Mehr als 50 % der Rasterzellen weisen Verweilzeiten von 2.5 Jahren und mehr auf. Ursache hierfür sind die meist geringen Sickerwasserraten.

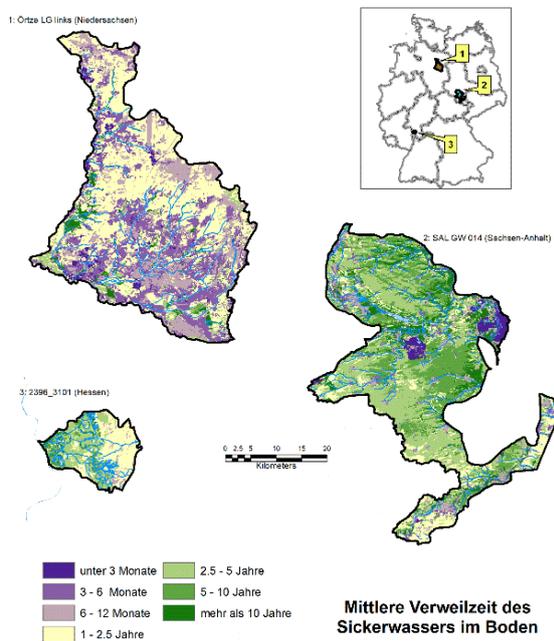


Abb. 3-5: Räumliche Verteilung der Verweilzeiten im Boden der drei Test-GWK

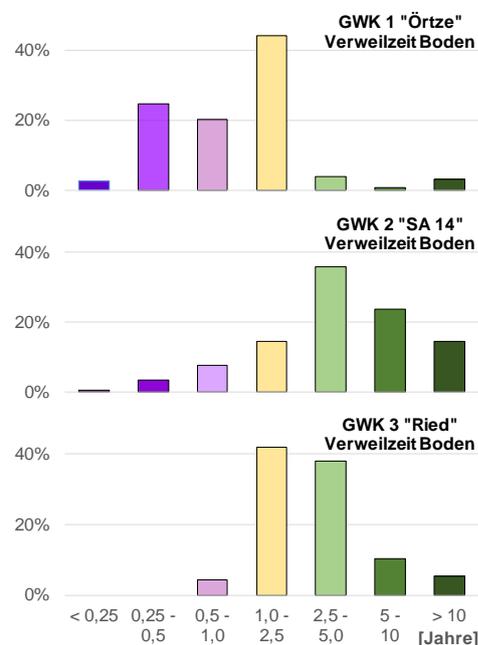


Abb. 3-6: Prozentuale Verteilung der Verweilzeiten im Boden für Verweilzeitenklassen



3.3 Ermittlung der Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten

Für Festgesteinsregionen sind für die Grundwasserdeckschichten häufig nur sehr allgemeine Datengrundlagen verfügbar, die keine sinnvolle Anwendung des in Kap. 3-2 beschriebenen Verfahrens nach DIN 19732 ermöglichen. Für Lockergesteinsregionen ist die Datenlage für den Bereich der Grundwasserdeckschichten insofern besser, als dass die Parameter für die Anwendung des Verfahrens nach DIN 19732 aus petrographischen Schichtenbeschreibungen abgeleitet werden können. Um sicherzustellen, dass die bestverfügbare Datengrundlage in die Ermittlung der Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten eingeht, kommen je nach Standort-situation und Datenlage unterschiedliche Verfahren zum Einsatz

3.3.1 Verweilzeit in Grundwasserdeckschichten - Lockergestein

Die Verweilzeit in Grundwasserdeckschichten von Lockergesteinsregionen wird ausschließlich für nicht drainierte Standorte berechnet, da die Grundwasseroberfläche bei drainierten Standorten schon nach Durchsickerung des Bodens erreicht wird. Da laterale Verlagerungen in den Deckschichten wegen fehlender Datengrundlagen im Allgemeinen nicht abbildbar sind, wird unterstellt, dass die Deckschichten bis zur Erreichung der Grundwasseroberfläche ausschließlich vertikal durchströmt werden.

Wie im Boden verläuft die Verlagerung des Sickerwassers über die Poren des Substrats, so dass die Verweilzeit dort in Anlehnung an DIN 19732 ebenfalls über das Wasserspeichervermögen abgeleitet werden kann. Da der Einfluss von Pflanzenwurzeln jedoch fehlt, wird das Wasserspeichervermögen in den Grundwasserdeckschichten über die Feldkapazität (FK) besser beschrieben, als über die nutzbare Feldkapazität. Hierfür kann in erster Näherung die gesamte Sickerwasserrate (Q_{SW}) eingesetzt werden. Der Index (i) läuft dabei über alle unterscheidbaren Schichten der Grundwasserdeckschichten, die in ihrer jeweiligen Schichtmächtigkeit (d) berücksichtigt werden:

$$t_{GWD} = \frac{1}{Q_{SW}} \sum_i FK_i \cdot d_i \quad \text{Gl. 3-2}$$

mit:

t_{GWD}	Verweilzeit Deckschichten [a]	Q_{SW}	Sickerwasserrate [mm/a]
FK_i	Feldkapazität [mm/dm]	d_i	Schichtmächtigkeit [dm]

Zur Feldkapazität stehen für die Grundwasserdeckschichten zwar keine Datengrundlagen in einem Auflösungsgrad wie für den Boden zur Verfügung, jedoch kann die Feldkapazität der Grundwasserdeckschichten im Lockergesteinsbereich aus petrographischen Schichtenbeschreibungen abgeleitet werden. Grundlage hierfür kann die hydrogeologische Übersichtskarte 1:200.000 (HÜK 200) sein, oder ergänzend für die östlichen Bundesländer, das Hydrogeologische Kartenwerk der DDR 1: 50 000 (HK50).

Die benötigten Daten zur Feldkapazität und zur Schichtmächtigkeit können in Anlehnung an AG Bodenkunde (2002) aus den petrographischen Gesteinsbeschreibungen zum lithologischen Aufbau transferiert werden (Tabelle 3-2):



Tabelle 3-2: *Petrographische Schichtbeschreibungen für Lockergesteinseinheiten in der HÜK 200 und zugeordnete Feldkapazitätswerte für die Berechnung der Verweilzeiten in den Deckschichten von Lockergesteinsregionen nach AG Bodenkunde (2002)*

Petrographische Beschreibung	Feldkapazität ⁽¹⁾ mm/dm	Petrographische Beschreibung	Feldkapazität ⁽¹⁾ mm/dm
Grobsand	9	Stark lehmiger Schluff	36
Mittelgrober Sand	12	Sandiger Lehm	32
Feinsand	17	Schluffiger Lehm	24
Lehmiger Sand	26	Toniger Lehm	38
schluffig-lehmiger Sand	28	Schluffig-toniger Lehm	40
schluffiger Sand	24	Lehm oder schluffiger Ton	47
Sandig-lehmiger Schluff	31	Ton	51
Lehmiger Schluff	35	Torf	72

3.3.2 Verweilzeit in Grundwasserdeckschichten - Festgestein

Festgesteine haben andere geohydraulische Eigenschaften als Lockergesteine. Der Wassertransport findet hier nicht in einem porösen Substrat statt, sondern überwiegend in Klüften. Ist die Matrixdurchlässigkeit gering, was für die meisten Festgesteinseinheiten der Fall ist, fließt das Wasser praktisch nur in den Klüften als dominantem Fließweg. Für den Durchfluss stellt die Klüftbreite einen der entscheidenden Parameter dar, da sie mit der dritten Potenz in die Durchflussmenge eingeht (Lege et al., 1996).

Aufgrund der meist geringen wasserwirtschaftlichen Bedeutung von Festgesteinsgebieten sind die Kenntnisse über den Untergrund oftmals beschränkt. Landesweit stehen für Festgesteinsbereiche Daten aus geologischen und hydrogeologischen Übersichtskarten (HK 50, HÜK 200, GÜK 200) zur Verfügung sowie vereinzelt Daten aus Lokalstudien. Die Übersichtskarten enthalten nur eingeschränkt Angaben zum Aufbau der Grundwasserdeckschichten. Dies gilt insbesondere für Informationen zu Wasserwegsamkeiten, Kluftausprägung und Schichtmächtigkeit. Darüber hinaus kann aus den vorhandenen hydrogeologischen Kartenwerken kein Wasserspeichervermögen abgeleitet werden, so dass der in Kap. 3.2.1 dargestellte Berechnungsansatz nach DIN 19732 zur Ableitung von Verweilzeiten in der Grundwasserüberdeckung von Lockergesteinsregionen nicht angewendet werden kann.

Für Festgesteinsregionen wurde stattdessen das Verfahren zur Ableitung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung nach Diepolder (1995) und Hölting et al. (1995) eingesetzt. Dieses Verfahren ist immer noch das Standardverfahren der Geologischen Landesämter der Bundesrepublik Deutschland. Die benötigte Datendichte ist verhältnismäßig gering. Entwickelt wurde das Verfahren zur qualitativen Abschätzung der Gesamtschutzfunktion der Grundwasserüberdeckung.

Der Punktwert zur Bewertung der Schutzeigenschaften der Grundwasserüberdeckung für Festgesteine errechnet sich auf der Grundlage von Gl. 3-3 als Produkt eines Wichtungsfaktors für die Sickerwasserhöhe, eines Punktwertes für die Gesteinsart und den Flurabstand sowie eines Wichtungsfaktors für die Struktureigenschaften. Während der Punktwert für die Gesteinsart und der Wichtungsfaktor für die Struktureigenschaften in klassifizierter Form in die Gesamtschutzfunktion eingehen, so wird der Flurabstand in seiner absoluten Höhe berücksichtigt. Je höher die Punktzahl, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Schadstoffe in der Grundwasserüberdeckung physikalischen und mikrobiellen Prozessen unterworfen werden, die zur Folge haben, dass der Eintrag ins Grundwasser geringer bzw. stark zeitverzögert ausfällt.



$$P = P_{SW} \cdot \sum_i F_{Struktur} \cdot P_{Gestein} \cdot M_i \quad \text{Gl. 3-3}$$

mit: $P_{Gestein}$ Punktwert für die Gesteinsart
 $F_{Struktur}$ Wichtungsfaktor für die Struktureigenschaften
 P_{SW} Sickerwasserfaktor
 M_i Schichtmächtigkeit [m]

Die Durchlässigkeit von Festgesteinen hängt in erster Linie von der Gesteinsart und dem Grad der Klüftung ab. Letzterer hängt von der tektonischen Belastung des Gesteins ab und geht als Strukturfaktor in den Ansatz von Hölting et al. (1995) ein. Die Bewertung von Gesteinsart und struktureller Eigenschaft erfolgte nach den in Tabelle 3-3 aufgeführten Werten (Hölting et al., 1995). Je nach Gesteinsart werden unterschiedliche Gesteinswerte zugeordnet. Zusammen mit dem Strukturwert wird damit die Klufthilfsneigung der Gesteine abgebildet.

Tabelle 3-3: Bewertung von Festgesteinen hinsichtlich der Gesteinsart (links) und der strukturellen Eigenschaften (rechts), nach (Hölting et al. 1995).

Gesteinsart	$P_{Gestein}$ [m ⁻¹]	Strukturfaktor	$F_{Struktur}$
Tonstein, Tonschiefer, Mergelstein, Schluffstein	20	ungeklüftet	25,0
Sandstein, Quarzit, vulkanische Festgesteine, Plutonite, Metamorphite	15	wenig geklüftet	4,0
poröser Sandstein, poröse Vulkanite, (z. B. verfestigter Tuff)	10	mittel geklüftet, wenig verkarstet	1,0
Konglomerat, Brekzie, Kalkstein, Kalktuff, Dolomitstein, Gipsstein	5	mittel verkarstet	0,5
		stark geklüftet, zerrüttet, stark verkarstet	0,1
		nicht bekannt	1,0

Angaben zur Bewertung von Gesteinsart und Stratigrafie können aus der HÜK 200 bzw. HK 50 entnommen werden. Informationen hierzu finden sich in der Geologischen Übersichtskarte 1:200000 (GÜK 200). Die Schichtmächtigkeiten ergeben sich aus dem um die Mächtigkeiten von Bodenzone und Deckschichten reduzierten Flurabstand.

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, wird die Sickerwasserhöhe im Festgesteinsbereich durch den Interflow reduziert, und zwar dort, wo vertikal versickerndes Wasser in der ungesättigten Zone auf eine Schicht geringerer Durchlässigkeit stößt, so dass es gezwungen wird, teilweise oberhalb dieser Schicht lateral abzufließen. Der Tiefenbereich, in dem sich der natürliche Zwischenabfluss (Interflow) abtrennt, ist –anders als beim Drainageabfluss- nicht eindeutig lokalisierbar. Vereinfachend wird angenommen, dass die Abtrennung des Interflows unmittelbar an der Obergrenze des Aquifers erfolgt (siehe. Abb. 2-3).

Abb. 3-7 veranschaulicht in welcher Weise die Höhe der Sickerwasserrate den Sickerwasserfaktor beeinflusst und damit den Punktwert zur Bewertung der Schutzeigenschaften der Grundwasserüberdeckung für Festgesteine nach Gl. 3-3. Tendenziell wird hiermit abgebildet, dass die Verweilzeit in der Deckschicht bei steigenden Sickerwasserraten aufgrund des erhöhten Wasserdurchsatzes durch das Gestein abnimmt.



$$F_{SW} = 1,875 - 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{SW}$$

Gl. 3-4

mit F_{SW} Sickerwasserfaktor [-]
 Q_{SW} mittlere jährliche Sickerwasserrate [mm/a]

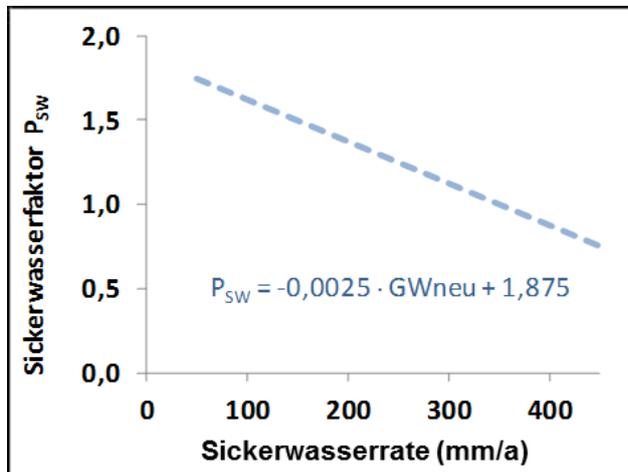


Abb. 3-7: Zusammenhang zwischen der Höhe der Sickerwasserrate und dem Sickerwasserfaktor

Die Bewertung der Schutzeigenschaften der Grundwasserüberdeckung für Festgesteine erfolgt schließlich durch eine qualitative Aussage, welche über fünf Klassen von „sehr geringe Schutzfunktion“ bis hin zu „sehr hohe Schutzfunktion“ reicht. Die Punktwerte aus der Schutzfunktionsbewertung der Grundwasserüberdeckung können dann in Anhaltswerte für die Verweilzeiten umgerechnet werden. Tabelle 3-4 stellt den Zusammenhang zwischen Gesamtschutzfunktion, Gesamtpunktzahl sowie der Größenordnung der Verweildauer des Wassers in der Grundwasserüberdeckung dar.

Tabelle 3-4: Klasseneinteilung der Gesamtschutzfunktion.

Schutzfunktion	Gesamtpunktzahl (S)	Verweildauer des Wassers in der Grundwasserüberdeckung (Anhaltswert)
sehr hoch	> 4000	> 25 Jahre
hoch	> 2000 – 4000	10 – 25 Jahre
mittel	> 1000 – 2000	3 – 10 Jahre
gering	> 500 – 1000	mehrere Monate bis ca. 3 Jahre
sehr gering	≤ 500	Tage bis etwa 1 Jahr, im Karst häufig weniger

Für jede der in Tabelle 3-4 angegebenen Klassen wird von Hölting et al. (1995) eine Größenordnung der Verweildauer des Wassers in der Grundwasserüberdeckung angegeben. Dabei entsprechen geringe Punktwerte (< 500) einer geringen Gesamtschutzfunktion und hohe Punktwerte (> 2000) einer hohen Schutzfunktion. Aus der Gesamtpunktzahl kann somit eine zumindest grobe Abschätzung der zu erwartenden Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten von Festgesteinsregionen erfolgen.

Um den Einfluss unterschiedlicher Punktzahlen auf die Verweilzeit zumindest tendenziell berücksichtigen zu können, wurden die Anhaltswerte in Tabelle 3-4 in eine stetige Beziehung von Punktwert Festgestein nach Gl. 3-3 und Verweilzeit überführt (Gl. 3-5). Diese Beziehung ist grafisch in Abb. 3-8 dargestellt.



$$t_{Deck} \approx 9 \cdot 10^{-5} \cdot P_F^{1,5156}$$

Gl. 3-5

mit t_{Deck} = Verweilzeit in den Festgesteinsdeckschichten [a]
 PF = Punktwert Festgestein [-]

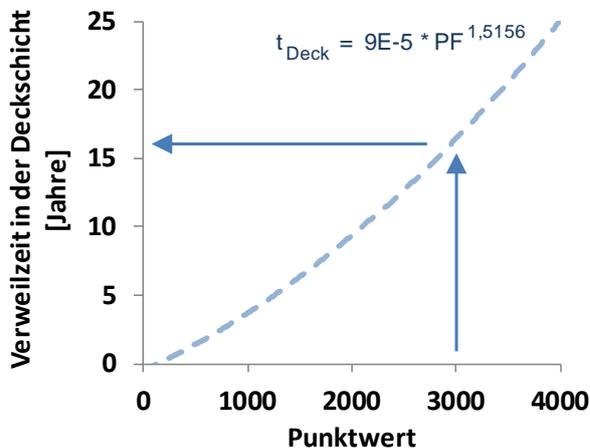


Abb. 3-8:
Abhängigkeit von Verweilzeit und Punktwert in Festgesteinsdeckschichten

Diese hier skizzierte Vorgehensweise, d.h. die Bestimmung einer Punktzahl unter Berücksichtigung von Gesteinsart, Schichtmächtigkeit, tektonischer Struktur und Sickerwasserhöhe sowie der anschließenden Zuordnung von Anhaltswerten für die Verweilzeit kann flächenhaft für Deckschichten aus Festgestein umgesetzt werden. Es sei an dieser Stelle aber ausdrücklich betont, dass die auf diese Weise berechneten Verweilzeiten nur als grobe Anhaltswerte aufzufassen sind, die mit großen Unsicherheiten behaftet sind und im Einzelfall deutlich von den tatsächlich auftretenden Verweilzeiten differieren können.

3.3.3 Verweilzeit in von Lockergestein überlagerten Deckschichten aus Festgestein

Hierbei handelt es sich um einen Sonderfall, der dann zum Tragen kommt, wenn der obere Teil der Grundwasserdeckschichten unterhalb des Bodens aus Lockergestein besteht, der untere Teil der Grundwasserdeckschichten dagegen aus Festgestein (vgl. Abb. 3-3). In diesem Fall wird die Verweilzeit in den Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein nach der in Kap. 3.3.1 beschriebenen Vorgehensweise in Anlehnung an DIN 19732 abgeleitet, d.h. die Verweilzeit wird aus der Sickerwasserhöhe und dem Wasserspeichervermögen des Substrats abgeleitet. In den Grundwasserdeckschichten aus Festgestein erfolgt die Ermittlung der Verweilzeiten dagegen nach der in Kap. 3.3.2 beschriebenen Vorgehensweise in Anlehnung an das Verfahren von Hölting et al. (1995), d.h. über die Bestimmung einer Punktzahl, aus der unter Berücksichtigung von Gesteinsart, Schichtmächtigkeit, tektonischer Struktur und Sickerwasserrate ein Anhaltswert der Verweilzeit abgeleitet wird. Eine detaillierte Beschreibung der beiden Verfahren sowie der erforderlichen Datengrundlagen kann den vorangegangenen Kap. 3.3.1 und 3.3.2 entnommen werden.

3.3.4 Datengrundlagen zur Verweilzeitenermittlung in Grundwasserdeckschichten

Während für die flächenhafte Anwendung der Verfahren zur Verweilzeitenermittlung in den Grundwasserdeckschichten in der Regel Daten aus überregional (z.B. auf Bundeslandsebene) verfügbaren Kartenwerken zur Verfügung stehen, sollten für punktbezogene Anwendungen – sofern vorhanden – Daten aus lokalen Datenerhebungen bzw. Lokalstudien übernommen werden (vgl. Tabelle 3-1). Für den Fall, dass Werte aus Lokalstudien nicht vorhanden sind, können die Datengrundlagen für die flächenhafte Berechnung aus den entsprechenden Datenquellen



(z.B. Karten) für den Ort der Messstelle übernommen werden. Tabelle 3-5 fasst die Datengrundlagen zur Ermittlung der Verweilzeit in Deckschichten aus Festgestein zusammen. Tabelle 3-6 fasst in analoger Weise die Datengrundlagen zur Ermittlung der Verweilzeit in Deckschichten aus Festgestein zusammen.

Tabelle 3-5: *Datengrundlagen für die Berechnung der Verweilzeiten in Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein*

Parameter	Datenquelle flächenhafte Berechnung	Datenquelle punktbezogene Berechnung
Mächtigkeit Feldkapazität	HÜK 200	Vorzugsweise lokale Schichtprofile
Grundwasser- Flurabstand	BK 50; Modellergebnis Landesbehörden	Vorzugsweise lokale GW-Stände
Sickerwasserraten	Modellergebnis Landesebene	Vorzugsweise vor Ort Untersu- chungen oder lokale Modellergeb- nisse

Tabelle 3-6: *Datengrundlagen für die Berechnung der Verweilzeiten in Grundwasserdeckschichten aus Festgestein*

Parameter	Datenquelle flächenhafte Berechnung	Datenquelle punktbezogene Berechnung
Gesteinsart der einzelnen Deckschichten	HÜK 200; HK 50	Vorzugsweise lokale Schichtprofile
Mächtigkeit der einzelnen Deckschichten	HÜK 200; HK 50	Vorzugsweise lokale Schichtprofile
Strukturfaktor	GÜK 200	Vorzugsweise Lokalinformation
Grundwasser- flurabstand	BK 50; Modellergebnis Landesbehörden	Vorzugsweise lokale GW-Stände
Sickerwasserrate	Modellergebnis Landesebene	Vorzugsweise vor Ort Untersu- chungen oder lokale Modellergeb- nisse

3.3.5 Exemplarische Bestimmung der Verweilzeiten in der Grundwasserüberdeckung für drei Test-GWKs

In Abb. 3-9 sind alle für die Verweilzeitenermittlung in den Grundwasserdeckschichten benötigten Datengrundlagen zusammenfassend dargestellt. Hinsichtlich des Wasserspeichervermögens (Feldkapazität, Abb. 3-9 oben links) zeigen sich im GWK 1 mit weniger als 10 mm/dm großräumig die geringsten FK-Werte, die FK-Werte im GWK 3 liegen in der Regel über diesem Wert. Für den GWK 2 liegen keine Werte zum Wasserspeichervermögen der Lockergesteinsdeckschichten vor, da für diesen GWK vom Land Sachsen-Anhalt flächendeckend ein nach dem Verfahren von Hölting (Kap. 3.3.2) summierter Gesteins-Punktwert zur Verfügung gestellt wurde. Dieser lag größtenteils in einem Bereich zwischen ca. 1000 und >5000.



Je größer der Flurabstand, desto größer ist die vertikale Fließstrecke und damit –bei gleichen Standortbedingungen- die Verweilzeit in den Deckschichten. Hinsichtlich des Flurabstandes (Abb. 3-9 oben rechts) zeigen GWK 1 und GWK 3 einen hohen Anteil an Standorten (<5m), während GWK 2 einen hohen Anteil grundwasserferner Standorte (> 25m) zeigt. Bezüglich der in die Verweilzeitenmodellierungen eingehenden Sickerwasserraten sei an dieser Stelle auf Abb. 3-4 verwiesen.

Abb. 3-10 (oben) zeigt die räumliche Verteilung der sich ergebenden Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten. Für GWK 1 und GWK 3 wurden die Verweilzeiten in den Deckschichten entsprechend der in Kap. 3.3.1 dargestellten Vorgehensweise ermittelt. Da in GWK 1 Flurabstände von mehr als 10 m dominieren, liegen die Verweilzeiten –bedingt durch das geringe Wasserspeichervermögen der Grundwasserdeckschichten- für mehr als 75% aller Rasterflächen bei weniger als 10 Jahren (vgl. Abb. 3-10, unten). Für GWK 3 ergeben sich –bedingt durch das höhere Wasserspeichervermögen der Grundwasserdeckschichten- für ca. 75% der Rasterzellen deutlich höhere Verweilzeiten von 5 Jahren und mehr.

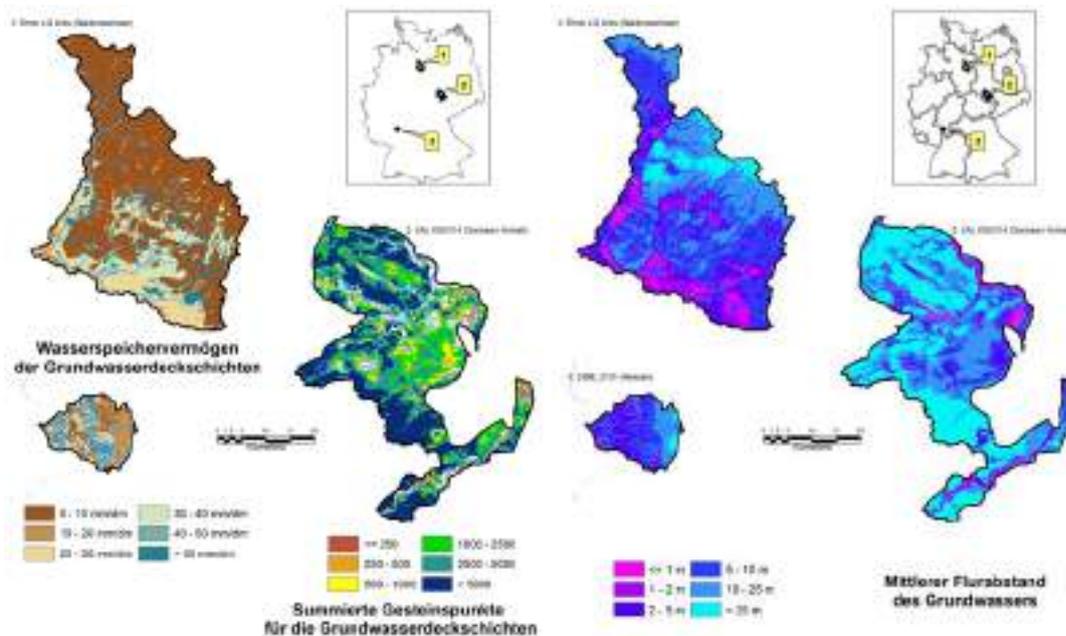


Abb. 3-9: Datengrundlagen für die Verweilzeitenermittlung der drei Test-GW: Feldkapazität bzw. summierter Gesteinspunktwert (links), mittlerer Flurabstand (rechts)

Für GWK 2 wurden die Verweilzeiten entsprechend der Vorgehensweise in Kap. 3.3.2 ermittelt. Aufgrund des Zusammenspiels von geringen Sickerwasserraten, hohen Flurabständen und hohen „Gesteinspunkten“ (~ hoher Wasserspeicherkapazität der Deckschichten) ergeben sich hohe Verweilzeiten, die bei mehr als 50 der Rasterzellen oberhalb von 25 Jahren liegen und bei nur 7 % der Rasterzellen unter 5 Jahren betragen.

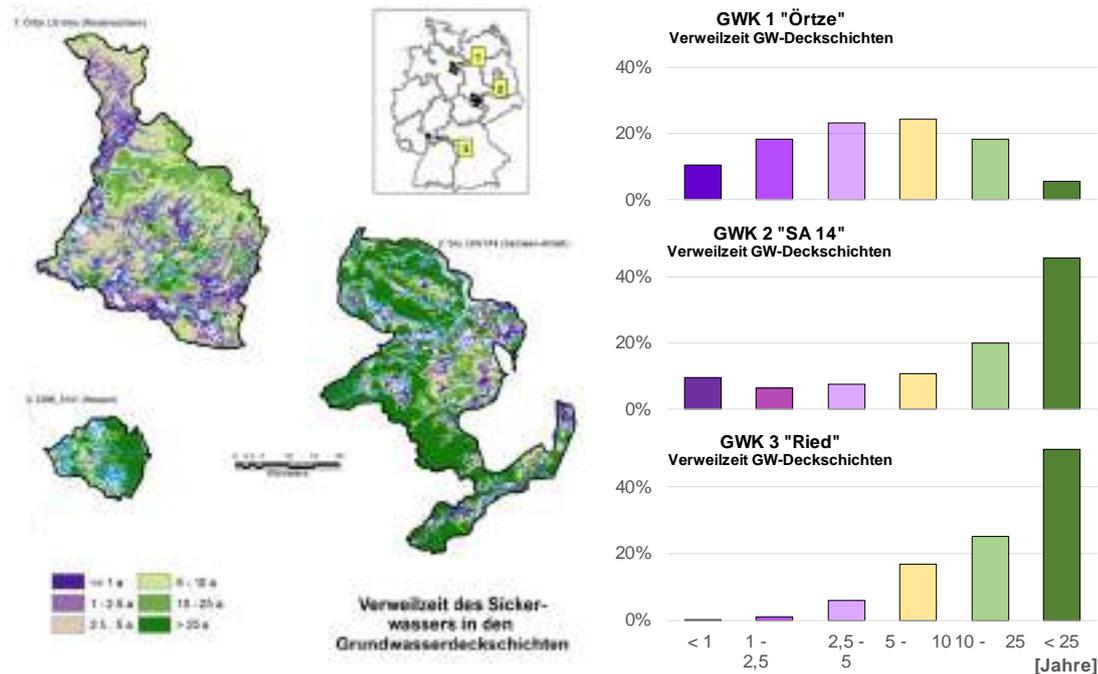


Abb. 3-10: räumliche Verteilung der Verweilzeiten in den Grundwasser-Deckschichten der drei Test-GWK (links) und prozentuale Verteilung für Verweilzeitenklassen (rechts)

3.4 Zusammengefasste Verweilzeiten in der ungesättigten Zone

Durch Summation der berechneten Verweilzeiten in der Bodenzone und in der Grundwasserüberdeckung ergibt sich die Gesamtverweilzeit in der ungesättigten Zone. Diese ist für verschiedene Fragestellungen von Relevanz. Wie bereits in Kap. 1.2. festgestellt, kommt der im Vordergrund stehenden Fragestellung bei der Verweilzeitenmodellierung eine große Bedeutung zu. So kann einerseits die Verweilzeit von einzelnen punktbezogenen Bezugsorten, wie z.B. Grundwasserbeobachtungsbrunnen, in einem GWK im Vordergrund stehen, und andererseits die Reaktionszeit eines gesamten GWK (vgl. Abb. 1-3).

3.4.1 Flächenhafter Ansatz – Bezugsmaßstab Grundwasserkörper

Für flächenhafte Fragestellungen, z.B. zur Abschätzung der mittleren Reaktionszeit der ungesättigten Zone in einem GWK sollten die für alle Rasterzellen ermittelten Verweilzeiten im Boden und in den Deckschichten aufsummiert und gemittelt werden. In Abb. 3-12 sind die auf diese Weise zusammengefassten Verweilzeiten in der ungesättigten Zone der drei Test-GWK dargestellt.

Sehr deutlich treten in Abb. 3-12 die Unterschiede zwischen den GWK hervor. Während in der ungesättigten Zone von GWK 1 72 % der Verweilzeiten unterhalb von 10 Jahren liegen, so liegen in den GWK 2 und 2 mehr als 30 % der Verweilzeiten oberhalb von 50 Jahren. Auch wenn die Verweilzeiten in GWK 2 bedingt durch den unterschiedlichen Berechnungsansatz nur eingeschränkt mit den für die GWK 1 und GWK 3 ermittelten Verweilzeiten vergleichbar sind, so zeigen die Ergebnisse dennoch zumindest die Größenordnung und die Bandbreite der Verweilzeiten, die in der ungesättigten Zone von GWK auftreten können.

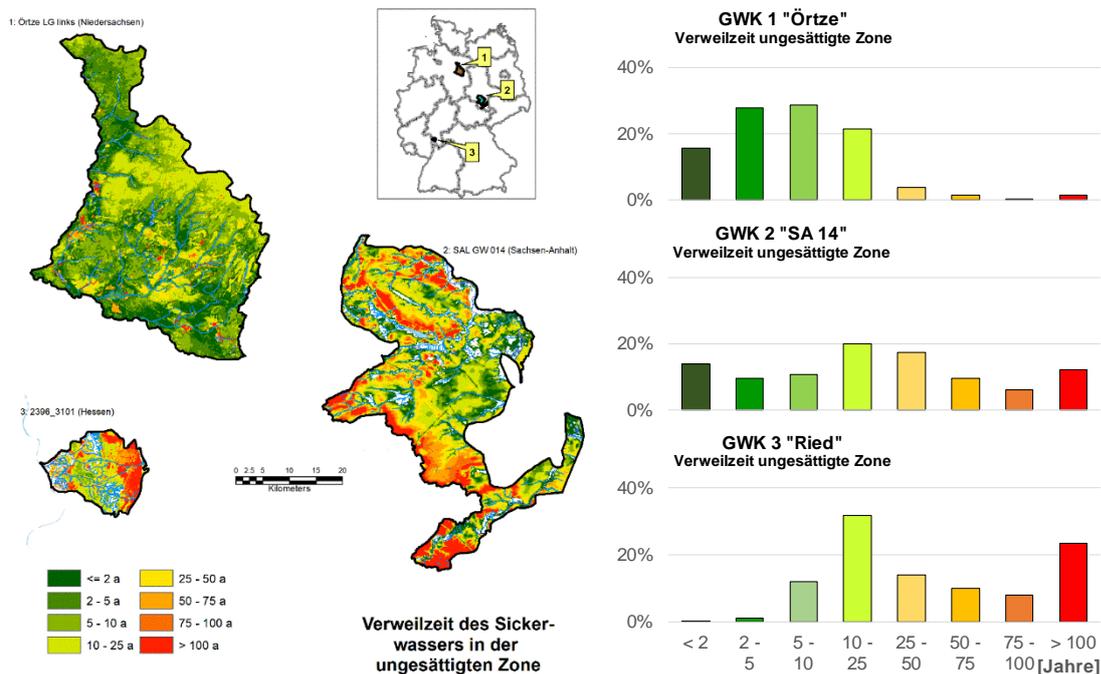


Abb. 3-11: räumliche Verteilung der zusammengefassten Verweilzeiten in der ungesättigten Zone der drei Test-GWK (links) und prozentuale Verteilung für Verweilzeitenklassen

3.4.2 Quellen und Brunnen – Bezugsmaßstab Einzugsgebiete

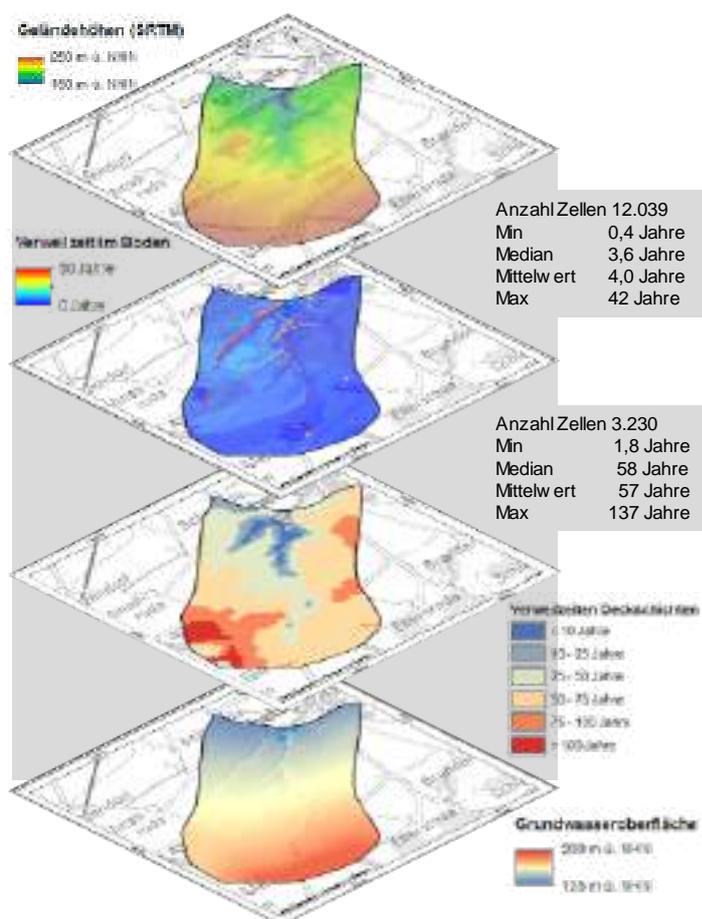
Verweilzeiten können zwar punktuellen Bezugsorten wie Quellen und Entnahmehäusern zugeordnet werden, in beiden Fällen sind die Zeitangaben aber nicht für den Ort des Brunnens bzw. der Quelle repräsentativ, sondern für die mittleren Verhältnisse in dem jeweiligen Einzugsgebiet. Aus diesem Grund sind Angaben zu Verweilzeiten für Brunnen und Quellen zur Verweil- und Fließzeiten nur im weiteren Sinn als punktbezogen anzusehen (siehe Abb. 1-3).

Entsprechend der räumlich differenzierten Standortbedingungen treten in einem Einzugsgebiet unterschiedliche Verweilzeiten auf. Die Verweilzeiten für Boden und Grundwasserdecksschichten können bei bekanntem Einzugsgebiet des Brunnens / der Brunnengalerie mittels GIS-Verschneidung und Mittelung der Rasterzellwerte ermittelt werden.

Benötigte Daten:

- Abgrenzung des Einzugsgebietes des Brunnens / Brunnengalerie / Quelle
- Kartenwerke / Rasterdaten Verweilzeiten

Beispielhaft ist in Abb. 3-13 für das gemeinsame Einzugsgebiet der „Geiselquelle“ und der „Zwölf Apostelquelle“ die Ermittlung der Verweilzeiten dargestellt. Aufgrund der geringen Sickerwasserraten und der teils mächtigen Grundwasserdecksschichten weist das aus den Quellen austretende Wasser eine mittlere Verweilzeit von 62 Jahren auf.



Mittlere Verweilzeiten:

Boden 4,0 Jahre

Grundwasser- 58 Jahre

Deckschichten

Verweilzeit: 62 Jahre

Abb. 3-12:

GIS-basierte Mittelung der Verweilzeiten im Boden und in den Grundwasserdeckschichten für ein Einzugsgebiet einer Quelle (Test-GWK 3: SA GW014; Gemeinsame Fassung der Geiselquelle und der Zwölf-Apostelquelle; Lage des Einzugsgebietes und Angaben zur Quellschüttung aus GUT, 2014).

3.4.3 Punktbezogene Ansätze – Bezugsmaßstab Grundwassermessstellen

Punktbezogen kann beispielsweise die Abschätzung des Zeitraums bis eine Verschmutzung an der Erdoberfläche die Grundwasseroberfläche erreicht bzw. nach welchem Zeitraum sich eine Maßnahme zur Reduktion einer Verschmutzung an der Grundwasseroberfläche bemerkbar macht, von Relevanz sein. Hierzu können die für den betreffenden Punkt (z.B. für eine Rasterzelle, in der sich ein Beobachtungsbrunnen befindet) ermittelten Verweilzeiten im Boden und in den Deckschichten aufsummiert werden.

3.5 Anwendbarkeit und Grenzen der Verfahren zur Verweilzeitenermittlung

Der Anwendbarkeit des Verfahrens nach DIN 19732 zur Ermittlung von Verweilzeiten im Boden sind unabhängig davon, ob es sich um punktbezogene oder flächenhafte Fragestellungen handelt. Berechnet wird die Verweilzeit im Boden bis zum Ende der Bodenzone bzw. bei drainierten Standorten bis zur Grundwasseroberfläche.

Für die Modellierung der Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten sollten in Abhängigkeit von den verfügbaren Datengrundlagen unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden. Für die Verweilzeitenermittlung in der ungesättigten Zone von Lockergesteinsregionen sollte das genauere Verfahren nach DIN 19732 eingesetzt werden. Für die Ermittlung der Verweilzeiten in der ungesättigten Zone von Festgesteinsregionen ist dagegen in der Regel nur das Schätzverfahren nach Hölting et al. (1995) verwendbar.



Unabhängig davon, ob es sich um punktbezogene oder flächenhafte Fragestellungen handelt, sind die für Deckschichten in der Festgesteinsregion ermittelten Verweilzeiten daher mit größeren Unsicherheiten behaftet. Während für die flächenhafte Anwendung der Verfahren in der Regel Daten aus überregional (z.B. auf Bundeslandsebene) verfügbaren Kartenwerken zur Verfügung stehen, sollten für punktbezogene Anwendungen – sofern vorhanden – Daten aus lokalen Datenerhebungen bzw. Lokalstudien übernommen werden.



4 Flächenhafte Ermittlung von Grundwasserfließzeiten

4.1 Vorbemerkungen

Grundsätzlich wird bei der Ermittlung der Fließzeit zwischen einer punkt- und einer flächenbezogenen Betrachtung unterschieden (vgl. Abschnitt 2.2). Über die punktbezogene Verweil- und Fließzeitenanalyse wird die Reaktionszeit von Grundwassermessstellen (aggregiert als Reaktionszeit des Monitoringmessnetzes), Entnahmebrunnen und Quellen ermittelt, flächenhafte Verfahren geben dagegen die großräumige Verteilung von Verweil- und Fließzeiten wieder. Die flächenhafte Ermittlung von Fließzeiten im Grundwasser ist hier i.d.R. auf den Vorfluter bezogen. Die flächenhafte Ermittlung von Grundwasserfließzeiten dient der Abschätzung der Reaktionszeit eines gesamten GWK, z.B. im Hinblick auf grundwasserbürtige Nitrateinträge in Vorfluter.

4.2 Geohydraulische Grundlagen

Generell erfolgt die Ermittlung von Fließzeiten für die gesättigte Zone, d.h. für den gesamten vollständig mit Wasser erfüllten Bereich auf der Basis der Betrachtung der Strömungsgeschwindigkeiten im Grundwasserleiter. Das am häufigsten genutzte Verfahren zur Berechnung der laminaren Grundwasserströmung basiert auf der empirischen Gesetzmäßigkeit nach Darcy. Hierbei werden die Durchflussrate Q [m^3/s] und die durchströmten Querschnittsfläche A [m^2] des porösen Mediums mit dem Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s] und dem Wasserdruckhöhenunterschied dh/dl [-] entsprechend der Gl. 4-1 ins Verhältnis gesetzt.

$$\frac{Q}{A} = -k_f \cdot \frac{dh}{dl} = v_f \quad \text{Gl. 4-1}$$

mit:

Q : Durchflussrate [m^3/s] A : durchströmte Querschnittsfläche [m^2]
 dh/dl hydraulischer Gradient [m/m] k_f Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
 v_f Filtergeschwindigkeit [m/s]

Der Durchlässigkeitsbeiwert wird hierbei als Maß der Wasserwegsamkeit eines Mediums sowie der Viskosität der strömenden Flüssigkeit definiert. Er stellt eine zentrale Kenngröße bei der Modellierung von Strömungsvorgängen im Grundwasserleiter dar und wird in Gebieten wasserwirtschaftlich bedeutender Grundwasservorkommen intensiv, meist durch Pumpversuche oder aus der Korngrößenanalyse repräsentativer Sedimentproben ermittelt. Typische Durchlässigkeitsbeiwerte für Locker- und Festgesteine sind in Tabelle 4-1 aufgelistet.

Tabelle 4-1: Durchlässigkeitsbeiwerte verschiedener Sedimente (zusammengestellt aus Schäfer 2016, Domenico & Schwartz, 1990 und Matthes & Ubell, 1983, DIN 18130-1)

Körnung	Lockergesteine		Festgesteine	
		Durchlässigkeitsbeiwert k_f m/s		Durchlässigkeitsbeiwert k_f m/s
reiner Kies		$10^{-1} - 10^{-2}$	Granit	$5 \cdot 10^{-13} - 2 \cdot 10^{-12}$
grobkörniger Sand		$\sim 10^{-3}$	Kalkstein	$1 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-6}$
mittelkörniger Sand		$10^{-3} - 10^{-4}$	Kreide	$6 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-7}$
feinkörniger Sand		$10^{-4} - 10^{-5}$	Sandstein	$1 \cdot 10^{-10} - 6 \cdot 10^{-6}$
schluffiger Sand		$10^{-5} - 10^{-7}$	Tonschiefer	$1 \cdot 10^{-13} - 2 \cdot 10^{-9}$
toniger Schluff		$10^{-6} - 10^{-9}$	Kristallin (geklüftet)	$8 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-4}$
Ton		$< 10^{-9}$	Granit	$5 \cdot 10^{-13} - 2 \cdot 10^{-12}$



Der Quotient aus dem Durchfluss und der durchflossenen Fläche ergibt die Filtergeschwindigkeit v_f , eine fiktive Geschwindigkeit. Die Strömungsgeschwindigkeit (Abstandsgeschwindigkeit v_a [m/s]) entspricht in guter Näherung dem Quotienten aus Filtergeschwindigkeit und durchflusswirksamen Porenraumanteil n_f [-] in der Gl. 4-2.

$$v_a = \frac{v_f}{n_f} \quad \text{Gl. 4-2}$$

mit: V_a Abstandsgeschwindigkeit [m/s]
 V_f Filtergeschwindigkeit [m/s]
 n_f effektive Porosität, nutzbarer Porenhohraum [-]

Die Nutzung der Darcy-Gleichung ist auf laminare Strömungsverhältnisse ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit der Porenwand limitiert. Durch die Berücksichtigung der Wasserdruckhöhe wird keine Unterscheidung zwischen gespannten und ungespannten Verhältnissen vorgenommen. Turbulente Strömungsverhältnisse, wie sie häufig in Karst- und Klufftgrundwasserleitern auftreten, werden oft durch eine Erweiterung der Darcy Gleichung in der Darcy-Weißbach-Gleichung oder Forchheimer Gleichung angenähert.

Eine Bewegung des Grundwassers im Aquifer ist nur möglich, wenn zusammenhängende Hohlräume vorhanden sind. Je größer der Hohlraumanteil eines Gesteins ist, desto besser kann das Grundwasser den Aquifer durchströmen. Für die Berechnung wird der nutzbare Hohlraumanteil eines Gesteins eingesetzt. Aber nicht der gesamte Hohlraumanteil eines Grundwasserleiters ist wasserwegsam. Als nutzbaren Hohlraumanteil bezeichnet man den Anteil des Gesamthohlraums, der nicht durch adhesiv gebundenes Wasser belegt ist, der also effektiv für die Grundwasserbewegung zur Verfügung steht. Da Daten zu nutzbaren Hohlraumanteilen im Allgemeinen nicht flächendeckend zur Verfügung stehen, ist man auf Abschätzungen angewiesen. Der nutzbare Hohlraumanteil wird durch die Packungsdichte, die Form und Anordnung der Körner sowie die Korngrößenverteilung bestimmt. Diese Parameter entsprechen weitgehend den Größen, die auch für die Durchlässigkeitsbeiwerte maßgeblich sind. Zumindest für Porengrundwasserleiter kann daher eine Korrelation zwischen Durchlässigkeit und nutzbarem Hohlraumvolumen erwartet werden, welche auch durch eine Vielzahl von Untersuchungen nachgewiesen wurde (Abb. 4-1). Obwohl keine allgemeingültigen Beziehungen zwischen nutzbaren Hohlraumanteilen und Durchlässigkeitsbeiwerte existieren, lassen sich für Lockergesteinsgrundwasserleiter zumindest Richtwerte abschätzen (Kunkel, 1994; Kunkel & Wendland, 1999), die auf einer exponentiellen Beziehung von Durchlässigkeitsbeiwert und nutzbarem Hohlraumanteil beruhen (Ahuja et al., 1988):

$$k_f = a \cdot n_f^b \quad \text{Gl. 4-3}$$

mit: k_f Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
 n_f effektive Porosität, nutzbarer Porenhohraum [-]
 a, b Koeffizienten

Die Koeffizienten a und b können durch Anpassung von beobachteten Werten an Gl. 4-2 ermittelt werden. Abb. 4-1 zeigt das Ergebnis einer solchen Anpassung, die auf den Angaben von (Ahuja et al., 1988; Busch & Luckner, 1973; Marotz, 1968) beruht. Der lineare Korrelationskoeffizient von $r=0,98$ dokumentiert, dass der gewählte Ansatz die Daten hinreichend genau beschreibt (Kunkel & Wendland, 1999). Diese Beziehung ist jedoch nur für Lockergesteinsgrundwasserleiter anwendbar.

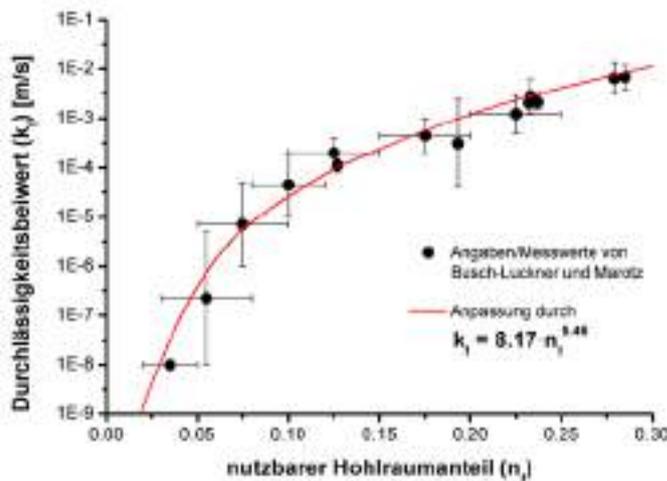


Abb. 4-1:
Abhängigkeit von Durchlässigkeitsbeiwert und nutzbarem Hohlraumanteil (Kunkel & Wendland, 1999).

Für Festgesteine ist es aufgrund der unterschiedlichen Wasserwegsamkeit in den Kluftsystemen nicht möglich, ein „durchflusswirksames Kluftvolumen“ durch empirische Beziehungen zu berechnen. Für Festgesteinsregionen werden deshalb im Allgemeinen Literaturwerte herangezogen, vgl. Tabelle 4-2 (Kunkel, 1994; Kunkel u. Wendland, 1999; Kuhr et al., 2014).

Tabelle 4-2: Kluftvolumen, Porenvolumen und effektive Porosität von Festgesteinen

	effektives Kluftvolumen	effektives Porenvolumen	effektive Porosität	Mittelwert eff. Poros.
paläozoische Sedimentgesteine	0,1 - 0,5 %	< 0,1 %	0,1 - 0,5 %	0,30 %
paläozoische Sandsteine	0,1 - 0,5 %	< 0,1 %	0,1 - 0,5 %	0,30 %
paläozoische Kalksteine	1,5 - 2,0 %	< 0,1 %	1,5 - 2,0 %	1,75 %
Keupersandst. / Konglomerate	1,0 - 1,5 %	< 0,1 %	1,0 - 1,5 %	1,25 %
Mesozoische Kalksteine	0,5 - 5,0 %	< 0,1 %	0,5 - 5,0 %	2,75 %
Tuff	0,5 - 2,5 %	1,0 - 2,0 %	1,5 - 4,5 %	3,00 %
Vulkanite	0,5 - 2,5 %	< 0,1 %	0,5 - 2,5 %	1,50 %
kristalline Gestein	0,1 - 0,5 %	< 0,1 %	0,1 - 0,5 %	0,30 %
Oberer Buntsandstein	1,0 - 1,7 %	1,0 - 2,0 %	2,0 - 3,7 %	2,75 %
Mittlerer Buntsandstein	0,5 - 2,0 %	0,5 - 2,0 %	1,0 - 3,0 %	2,00 %
Unterer Buntsandstein	1,0 - 1,7 %	1,0 - 2,0 %	2,0 - 3,7 %	2,75 %

4.3 Verfahrensgang WEKU-Modell

4.3.1 Grundlagen

Bei der flächenhaften Ermittlung der Verweilzeiten des Grundwassers im Aquifer ist es erforderlich, eine Vorstellung über die im Aquifer ablaufenden Strömungsvorgänge zu entwickeln. Über den Darcy-Ansatz (siehe Abschnitt 4.2) kann für einfache Verhältnisse die Fließzeit vom Punkt der Grundwasserneubildung bis zum Bezugsort, z.B. dem Vorfluter analytisch berechnet werden. Dazu wird ausgehend von Gl. 4-1 und Gl. 4-2 die durchströmte Fließstrecke (Δl) durch die mittlere Abstandsgeschwindigkeit (v_a) entlang dieser Strecke geteilt und nach der Fließzeit umgestellt (siehe Gl. 4-3).



$$\text{Fließzeit } t = \frac{\Delta l}{v_a} = \frac{\Delta l * n_f}{v_f} = \frac{\Delta^2 l * n_f}{\Delta h * k_f} \quad \text{Gl. 4-4}$$

mit:

t	Fließzeit [s]
Δh	Grundwasserhöhenunterschied zwischen Bezugspunkten [m]
Δl	Distanz zwischen den Bezugspunkten [m]
v_a	Abstandsgeschwindigkeit [m/s]
v_f	Filtergeschwindigkeit [m/s]
n_f	effektive Porosität, nutzbarer Porenhohraum [-]

Bei einer großräumig, flächenhaften Modellierung können im Allgemeinen nur Datengrundlagen ohne Tiefenauflösung genutzt werden. So weist beispielsweise die hydrogeologische Übersichtskarte HÜK 200 im Maßstab 1:200 000 zwar eine recht hohe laterale Auflösung auf; ihr sind jedoch kaum Angaben über die Tiefenstruktur der Aquifere zu entnehmen. Da eine Auswertung von Bohrprofilen, Grundwasserständen oder hydrogeologische Schnitten zum Aufbau großräumiger Strukturmodelle sehr aufwändig wäre, bezieht sich die flächenhafte Modellierung der Grundwasserfließzeiten ausschließlich auf eine zweidimensionale Aufsicht auf den jeweiligen Grundwasserkörper.

Das WEKU-Modell (Kunkel, 1994; Kunkel & Wendland, 1997; Kunkel & Wendland, 1999; 2006; Wendland, 1992; Wendland et al., 2004) bietet die Möglichkeit, eine Ermittlung der Fließzeiten des Grundwassers bis zum Vorflutereintritt basierend auf zweidimensionalen, landesweit verfügbaren Datengrundlagen vorzunehmen. Mit dem WEKU-Modell kann abgeschätzt werden, welche Zeiträume das in den Aquifer eingesickerte Wasser benötigt, um nach der Passage der grundwasserführenden Gesteinseinheiten einen Fluss, einen See oder das Meer zu erreichen. Das Modell ist für die Betrachtung meso- und makroskaliger Einzugsgebiete und GWK entwickelt worden und wurde bislang häufig zur Ermittlung des reaktiven Nitrattransports in Grundwasserleitern eingesetzt. Es arbeitet rasterbasiert und ist auf den oberen Grundwasserleiter bezogen. Hierbei wird vereinfachend angenommen, dass das Grundwasser entlang der Grundwasser Oberfläche in ein Oberflächengewässer abströmt.

Die für das WEKU-Modell benötigten Informationen können aus Grundwassergleichenplänen und hydrogeologischen Übersichtskarten abgeleitet werden. Die natürliche Heterogenität der betrachteten Grundwasserleiter, aber auch Unsicherheiten in den Datengrundlagen, können durch eine stochastische Betrachtungsweise berücksichtigt (Kunkel, 1994; Kunkel u. Wendland, 1997) werden. Auf diese Weise kann der Einfluss der Variabilität der Modelleingabegrößen auf die berechneten Fließstrecken und Grundwasserverweilzeiten quantifiziert werden. Als Ergebnis erhält man eine Verteilung von Fließstrecken bzw. Grundwasserverweilzeiten für jede Eintragszelle. Dies ermöglicht es, neben der Angabe mittlerer Werte auch Aussagen über Streubreiten und Vertrauensbereiche zu treffen. In Abb. 4-2 ist der Verfahrensgang der Verweilzeitenmodellierung mit WEKU schematisch dargestellt.

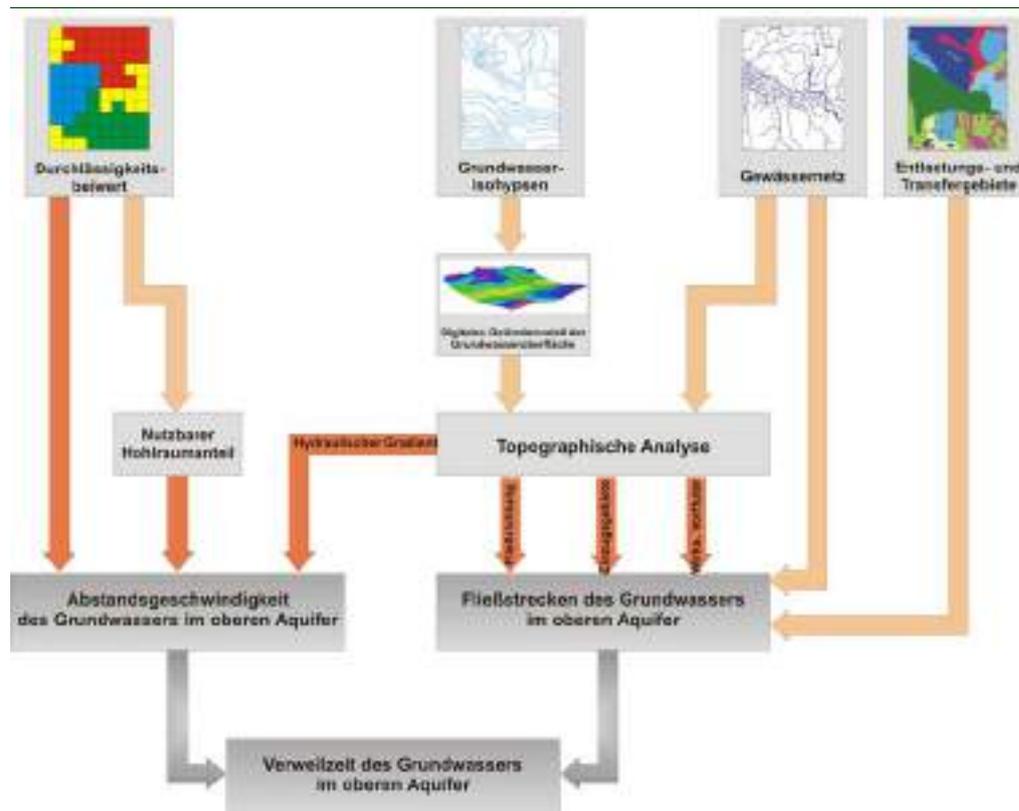


Abb. 4-2: Schematischer Überblick über den Verfahrensgang und die Datengrundlagen für die WEKU-Fließzeitenmodellierung

Modellierung der Abstandsgeschwindigkeit

Die Modellierung der Abstandsgeschwindigkeit im WEKU-Modell umfasst zwei Schritte. In einem ersten Schritt wird zunächst aus Grundwassergleichenplänen und anderen Datengrundlagen ein digitales Höhenmodell der Grundwasseroberfläche des oberen Aquifers erstellt. Aus diesem Höhenmodell wird für jede Rasterzelle der hydraulische Gradient nach Betrag und Richtung sowie die grundwasserwirksamen Vorfluter ermittelt. Anhand des Gradienten, des Durchlässigkeitsbeiwerts und des nutzbaren Hohlraumanteils wird dann die Abstandsgeschwindigkeit berechnet (siehe Abschnitt 4.2, Gl. 4-1, 4-2).

Im zweiten Schritt wird die Abstandsgeschwindigkeit nach Gl. 4.2 berechnet. Die Abstandsgeschwindigkeit charakterisiert die Bewegung eines Wasserteilchens zwischen zwei Punkten in der Fließrichtung des Grundwassers. Die zur Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit benötigten Kenngrößen sind der Durchlässigkeitsbeiwert, der nutzbare Hohlraumanteil und der hydraulische Gradient.

Berechnung der Fließzeit bis Vorflutereintritt

Im nächsten Schritt wird aus den ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten in den einzelnen Rasterzellen nach Gleichung 4-4 zunächst die Fließzeit des Grundwassers berechnet. Anschließend wird die Fließzeit des Grundwassers vom Eintritt in den Aquifer bis zum Austrag in einen Vorfluter ermittelt. Betrachtet wird hierzu die gesamte Fließstrecke von der Eintragszelle des Grundwassers in den Aquifer bis zum Austritt in ein Oberflächengewässer.



Der prinzipielle Verfahrensgang zur Ableitung der Fließwege des Grundwassers vom Eintrittsort in den Aquifer bis zum Austritt in ein Oberflächengewässer ist in Abb. 4-3 schematisch für einen GWK illustriert. Dargestellt ist ein Ausschnitt des digitalen Höhenmodells der Grundwasseroberfläche, die grundwasserwirksamen Vorfluter und schattiert die Rasterzellen mit Vorfluterbesatz im digitalen Höhenmodell. Durch Pfeile sind die Fließrichtungen des Grundwassers in jeder Rasterzelle sowie exemplarisch drei vollständige Fließwege dargestellt. Die dick gezeichneten Linien zeigen die sich aus dem Höhenmodell ergebenden Einzugsgebietsgrenzen. Die Verweilzeiten des Grundwassers ergeben sich durch die Addition der für die Einzelzellen berechneten Abstandsgeschwindigkeiten bzw. Verweilzeiten entlang des Fließwegs vom Eintrags- bis zum Austragsort.

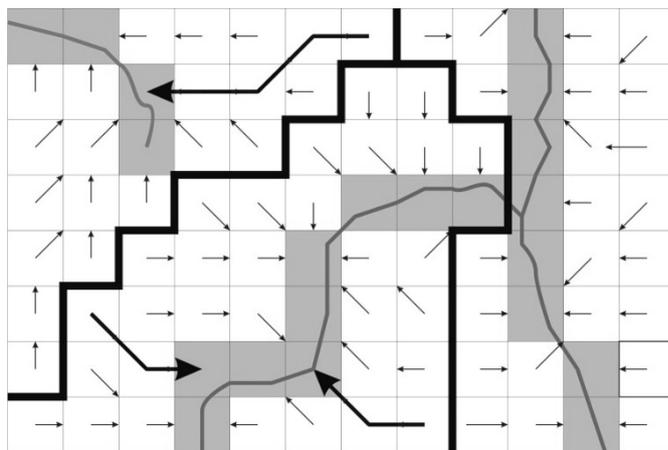


Abb. 4-3:
 Ermittlung der Fließwege des Grundwassers im WEKU-Modell

Als Eingabedaten werden, neben der für die Einzelrasterzellen ermittelten Abstandsgeschwindigkeit, die aus der Grundwassermorphologie ableitbare Fließrichtung und Fließstrecke benötigt (Gl. 4-5). Die Fließzeit errechnet sich also durch Addition der Einzelfließzeiten in den Rasterzellen entlang des Fließwegs von der Eintrags- bis zur Austragsstelle:

$$t_{GW} = \sum_i \frac{L_i}{v_a} \quad \text{Gl. 4-5}$$

mit:

- t_{GW} : Grundwasserverweilzeit für den gesamten Fließweg [s]
- v_a : Abstandsgeschwindigkeit in der Rasterzelle i [m/s]
- L_i : Fließstrecke in der Rasterzelle i [m]

Bei der Analyse des Weg-/Zeitverhaltens des Grundwassers im oberen Aquifer wird also immer der gesamte Fließweg betrachtet, den das Grundwasser von der Einsickerung in den oberen Aquifer bis zum Austritt in den jeweiligen grundwasserwirksamen Vorfluter zurücklegt. Das digitale Höhenmodell der Grundwasseroberfläche ist dabei die zentrale Grundlage zur Nachbildung des lateralen Wassertransports im Aquifer, da aus ihm die Fließrichtung in jeder Elementarzelle direkt bestimmt werden kann. Aus den abgeleiteten Fließrichtungen ergeben sich die Fließpfade und Fließstrecken.

4.3.2 Datengrundlagen zur Ermittlung der Fließzeiten im Grundwasser

Tabelle 4-3 fasst die Datengrundlagen zur Ermittlung der Fließzeiten zusammen. Für punktbezogene Anwendungen können – sofern vorhanden – auch hier Daten aus lokalen Datenerhebungen bzw. Lokalstudien übernommen werden. Für den Fall, dass Werte aus Lokalstudien nicht vorhanden sind, können die Datengrundlagen für die flächenhafte Berechnung aus den entsprechenden Datenquellen (z.B. Karten) für den Ort der Messstelle übernommen werden.



Tabelle 4-3: Datengrundlagen für die Fließzeitenermittlung bis Vorflutereintritt

Parameter	Datenquelle flächenhafte Berechnung	Datenquelle punktbezogene Berechnung
Hydraulischer Gradient Grundwasserfließrichtung	Modell der Grundwasseroberfläche: HÜK 200; HK 50;	Vorzugsweise lokale Datenbestände
Hydraulische Leitfähigkeit (Durchlässigkeitsbeiwert)	HÜK 200; HK 50; Landesdatenbestände	Vorzugsweise lokale Datenbestände
Nutzbarer Hohlraumanteil	Modellergebnis (Lockergestein); Li- teraturwerte (Festgestein)	Vorzugsweise Lokalinformation
Grundführende Gesteins- einheiten (Petrographie)	HÜK 200; HK 50; Landesdatenbestände	Vorzugsweise lokale Datenbestände
Grundwasserwirksame Vorfluter	Gewässernetz aus DLM, Grundwasseroberfläche	Vorzugsweise lokale Datenbestände
Grundwasserflurabstand	BK 50; Modellergebnis Landesbehörden	Vorzugsweise lokale Grundwasserstände
Grundwasserentlastungs- gebiete	BK50 Landesdatenbestände	Vorzugsweise lokale Datenbestände

4.3.3 Exemplarische Bestimmung der Fließzeiten im Grundwasser der drei Test-GWKs

In Abb. 4-4 sind die wichtigsten für die Bestimmung der Fließzeiten im Grundwasser der drei Test-GWK benötigten Datengrundlagen dargestellt. Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) des oberen Grundwasserleiters von $> 10^{-5}$ m/s sind für Lockergesteinsgrundwasserleiter typisch. In den GWK 1 und GWK 2 treten fast flächendeckend k_f -Werte im Bereich von $5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$ m/s auf (siehe Abb. 4-4, links oben). Nach DIN 18130 weisen vor allem Mittel- und Feinsande k_f -Werte in dieser Größenordnung auf. Die k_f -Werte im GWK 2 liegen mit k_f -Werten von verbreitet $1 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-5}$ m/s in der Regel etwas niedriger. Typisch sind diese Werte nach DIN 18130 für schluffige Feinsande, oder aber, wie im Falle von GWK 2, für gut geklüftete mesozoische Sandsteine und Kalksteine. Die im Südosten von GWK auftretenden k_f -Werte von $> 1 \times 10^{-4}$ m/s weisen auf eine gröbere Körnung der Aquifere (fluviatile Sande und Kiese) hin.

Entsprechend der ausgewiesenen k_f -Werte liegen die nutzbaren Hohlraumanteile der Sande (Abb. 4-4, oben rechts) in den GWK 1 und GWK 3 bei 10 % - 20% und damit deutlich oberhalb der Werte für die mesozoischen Sand- und Kalksteine des GWK 2 (2-5 %). Lediglich im Südosten von GWK 3 treten aufgrund der gröberen Körnung der Aquifere (fluviatile Sande und Kiese) mit Werten > 20 % größere Werte auf.

Die Höhe der Grundwasser-Druckfläche (Abb. 4-4, unten links) und der hydraulische Gradient (Abb. 4-4 unten rechts) belegt ebenfalls den grundlegenden Unterschied zwischen den beiden Lockergesteins-GWK (GWK 1 und GWK 3, Höhe der Druckfläche zwischen < 25 m und 100 m, hydraulische Gradienten $< 0.5^\circ$) und dem Festgesteins-GWK (GWK 2, Höhe der Druckfläche zwischen 75 und > 175 m, hydraulische Gradienten verbreitet $> 1^\circ$).

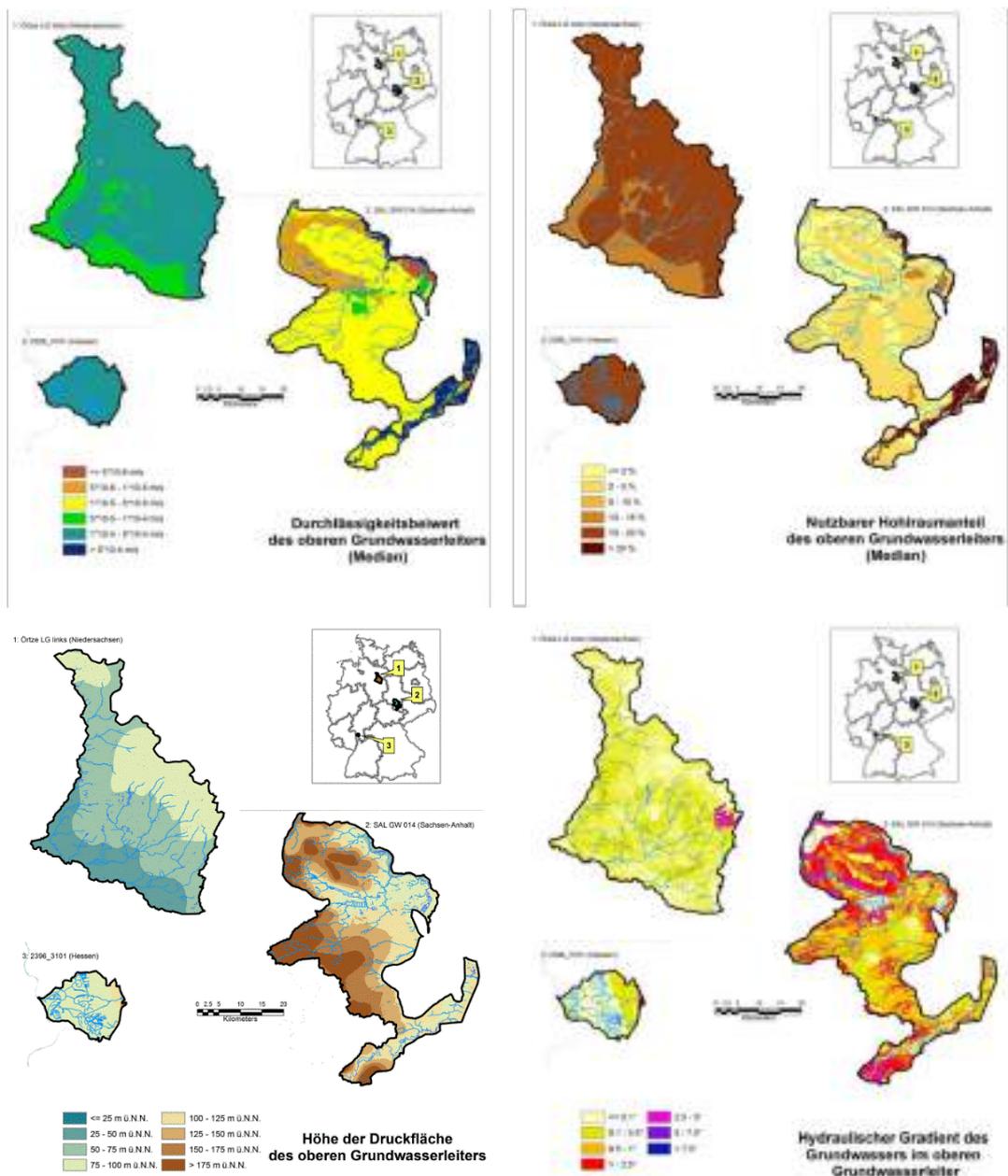


Abb. 4-4: Datengrundlagen für die Fließzeitenermittlung im Grundwasser der drei Test-GW: – Durchlässigkeitsbeiwert (oben links), nutzbarer Hohlraumanteil (oben rechts), Grundwasserdruckfläche (unten links), hydraulischer Gradient (unten rechts)

Abb. 4-5 und Abb. 4-6 zeigen die ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten, welche eine wichtige Zwischengröße zur Bestimmung der Fließzeiten im Grundwasser dargestellt sowie die ermittelten Fließzeiten. Die ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten des Grundwassers im oberen Aquifer (Abb. 4-5, links) umfassen den Bereich von weniger als 0,1 m/d bis mehr als 10 m/d. Abstandsgeschwindigkeiten von 0,5 m/d und weniger ergeben sich fast flächendeckend für die Lockergesteins-GWK 1 und 3. Grund hierfür sind überwiegend die geringen hydraulischen Gradienten. Im Festgesteins-GWK 2 treten aus dem gleichen Grund auch höhere Werte zwischen 1 und mehr als 10 m/d auf.

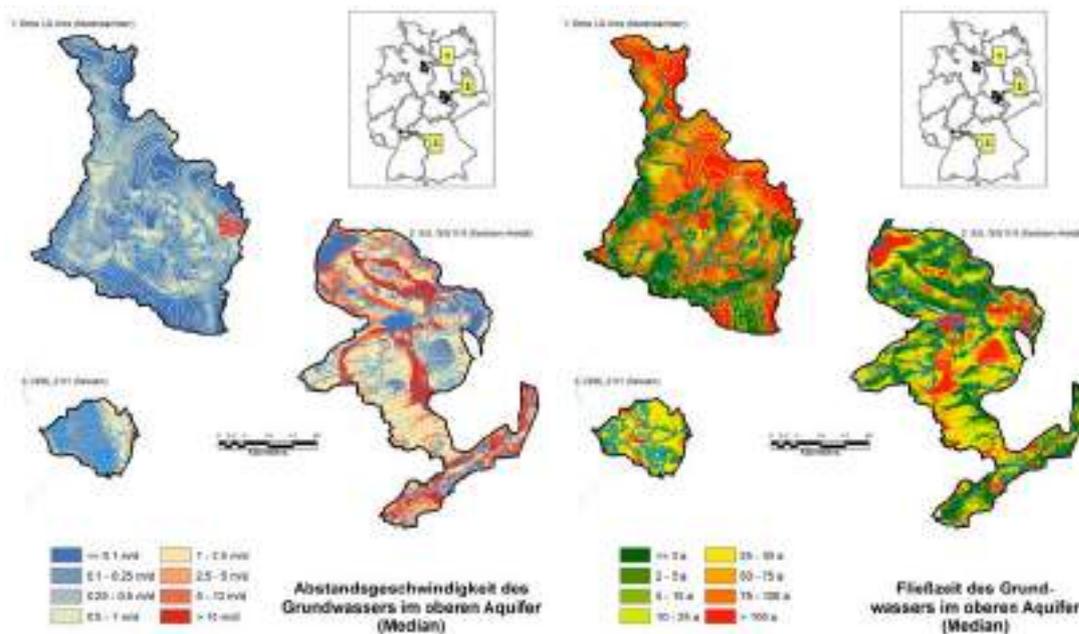


Abb. 4-5: Räumliche Verteilung der Abstandsgeschwindigkeiten im oberen Aquifer pro Rasterzelle der Test-GWK (links) und Fließzeiten im Grundwasser bis Vorflutereintritt (rechts)

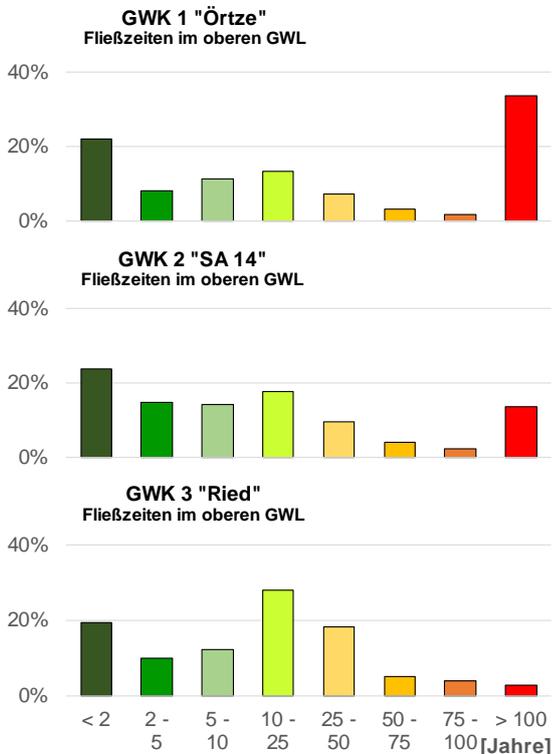


Abb. 4-6: Prozentuale Verteilung der Abstandsgeschwindigkeiten im oberen Aquifer pro Rasterzelle der drei Test-GW für festgelegte Fließzeitklassen

Die Fließzeiten des Grundwassers im oberen Aquifer weisen eine große Spannweite zwischen weniger als einem Jahr und mehr als 50 Jahren auf. Im Lockergesteins-GWK 1 treten zum Teil hohe Grundwasserfließzeiten auf, die häufig bei mehr als 25 Jahren liegen. Dies resultiert aus den vergleichsweise geringen hydraulischen Gradienten und den relativ großen Fließstrecken.

Größere Bereiche mit Fließzeiten von weniger als 10 Jahren treten nur im Festgesteins-GWK 2 auf und ergeben sich dort aus den höheren hydraulischen Gradienten. Da der GWK 3 in einer niederschlagsarmen Region liegt, ist die Gewässernetzdichte relativ gering. Dementsprechend sind die Fließstrecken des Grundwassers und in der Folge auch die Fließzeiten bis zum Vorfluter im GWK 2 relativ hoch. Der Großteil der Festgesteins-GWK Deutschlands liegt jedoch in niederschlagsreichen Regionen mit einer entsprechend höheren Vorfluterdichte. Folglich werden sich für die meisten GWK in Festgesteinsregionen geringere Grundwasserfließzeiten ergeben.



4.4 Anwendbarkeit und Grenzen des WEKU-Verfahrens

Hydrogeologische Gebietsparameter weisen im Allgemeinen eine große räumliche Variabilität auf. Bei flächenhaften Betrachtungen führen diese dazu, dass insbesondere die Durchlässigkeitsbeiwerte nicht als Einzelwerte, sondern in Form von Bandbreiten angegeben werden, die zum Teil mehrere Größenordnungen betragen können. Diese großen Streubreiten führen dazu, dass auch die hieraus berechneten Abstandsgeschwindigkeiten und Grundwasserverweilzeiten große Unsicherheiten aufweisen können. Mit dem WEKU-Modell können diese Variabilitäten durch Betrachtung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Modellparameter explizit berücksichtigt werden, so dass die berechneten Werte im Hinblick auf die Unsicherheiten der zu Grunde liegenden Gebietsparameter interpretiert und Aussagen über mögliche Abweichungen getroffen werden können (Kunkel, 1994; Kunkel & Wendland, 1997).

Die mit dem WEKU-Modell berechneten Fließzeiten beziehen sich immer auf den grundwasserbürtigen Abflussanteil. Wie bereits ausgeführt wurde, stellt der grundwasserbürtige Abflussanteil aber nicht in allen Regionen die dominierende Abflusskomponente dar. So trägt der grundwasserbürtige Abfluss in Grundgebirgskomplexen (z.B. Rheinisches Schiefergebirge, Schwarzwald, Fichtelgebirge) häufig weniger als 15 % zum Gesamtabfluss bei. In diesen Regionen beziehen sich die Fließzeiten daher nicht auf die regional dominante Abflusskomponente. Dies ist bei der Interpretation und Anwendung von Ergebnisse zu Grundwasserfließzeiten für diese Regionen unbedingt zu berücksichtigen.

Im Festgestein liegen zudem häufig keine laminaren Strömungsverhältnisse vor, so dass das Darcy'sche Gesetz, mit dem im WEKU-Modell das Geschwindigkeitsfeld berechnet wurde, streng genommen nicht angewendet werden kann. Eine Abschätzung der Grundwasserfließzeiten in Festgesteinsregionen basierend auf dem hier verwendeten Modellansatz wird trotzdem empfohlen, wenn es darum geht, einen Anhaltswert für die auftretenden Grundwasserfließzeiten zu ermitteln.

In Zusammenhang mit der Verwendung des WEKU-Verfahrens zur Fließzeitenermittlung in Festgesteinsregionen darf nicht unerwähnt bleiben, dass sich die in hydrogeologischen Kartenwerken (z.B. HÜK 200) dargestellten Bandbreiten der Durchlässigkeitsbeiwerte für den oberen Aquifer auf das unverwitterte Gestein beziehen, obwohl der überwiegende Anteil des Grundwasserabflusses in Festgesteinen in der Auflockerungszone über dem unverwitterten Gestein auftritt. Damit sich die zur Berechnung der Grundwasserfließzeiten verwendeten Durchlässigkeitsbeiwerte auf die Verhältnisse in der Auflockerungszone beziehen, sollten die in hydrogeologischen Kartenwerken angegebenen Bandbreiten der Durchlässigkeitsbeiwerte um 1-2 Größenordnungen erhöht werden.

Auch in Regionen, die über Dränagesysteme künstlich entwässert werden, ist der grundwasserbürtige Abflussanteil häufig nicht die dominierende Abflusskomponente. Ca. 65% - 75% des Gesamtabflusses werden in diesen Regionen im Jahresverlauf über Dränagen abgeführt. Dies ist bei der Interpretation und Anwendung von Ergebnisse zu Grundwasserfließzeiten für drainierte Regionen zu berücksichtigen.

In den vom Grundwasser beeinflussten Niederungsregionen ist die hydraulische Situation zu beachten. Grundwasser quillt dort flächenhaft empor, so dass Manhenke et al. (2001) diese Gebiete als Grundwasserentlastungsgebiete bezeichnen. Um eine landwirtschaftliche Nutzung zu ermöglichen, werden grundwasserbeeinflusste Niederungsregionen häufig künstlich entwässert. Durch die künstliche Entwässerung sowie den aufwärts gerichteten Wasserstrom kommt es hier zu keiner nennenswerten Grundwasserneubildung, so dass die Ermittlung von Grundwasserfließzeiten mit dem WEKU-Modell nicht zielführend ist. Die Fließweganalyse im WEKU-



Modell für gewässernahe Niederungsbereiche hin zum regional grundwasserwirksamen Vorfluter würden eine unrealistische hydraulische Situation beschreiben, die durch den extrem flachen hydraulischen Gradienten zudem -selbst bei sehr kurzen Fließstrecken- extrem hohe Grundwasserfließzeiten nach sich ziehen würde. Für Grundwasserentlastungsgebiete sollte deshalb keine Ermittlung von Grundwasserfließzeiten mit dem WEKU-Modell vorgenommen werden.



5 Punktbezogene Verfahren zur Ermittlung der Fließzeit

5.1 Vorbemerkungen

Grundsätzlich wird bei der Ermittlung der Fließzeit zwischen einer punkt- und einer flächenbezogenen Betrachtung unterschieden (vgl. Abschnitt 2.2). Über die punktbezogene Verweil- und Fließzeitenanalyse wird die Reaktionszeit von Grundwassermessstellen, Quellen und Brunnen ermittelt. Durch Aggregation der einzelnen Werte und die Zusammenfassung von Verweil- und Fließzeiten kann die Reaktionszeit eines Messnetzes abgeleitet werden. Dagegen dient die flächenhafte Ermittlung der Abschätzung der Reaktionszeit eines gesamten GWK, z.B. im Hinblick auf grundwasserbürtige Nitrateinträge in Vorfluter.

Punktbezogene Verfahren zur Ermittlung der Fließzeit beziehen sich auf einen durch eine Grundwassermessstelle, Brunnen oder Quelle definierten Messpunkt. Die Fließzeit bezieht sich immer auf die Zeit, die das Grundwasser vom Ort der Neubildung bis zum Erreichen dieses Bezugspunktes benötigt. Prinzipiell stehen für die punktbezogene Ermittlung der Fließzeit mehrere Verfahren zur Verfügung:

1. Teufe/Neubildungsverfahren (Grundwassermessstellen)
2. Ermittlung der mittleren Verweilzeit (Quellen und Entnahmebrunnen)
3. Strömungsmodellierung
4. Altersdatierung mittels Tracern

Die ersten beiden Verfahren erlauben eine einfache und praxisorientierte Ermittlung punktbezogener Fließzeiten. Anders als Altersdatierungen oder Strömungsmodellierungen sind hierfür keine erweiterten Kenntnisse und kein gesonderter Aufwand (Expertenwissen, Modellierkenntnisse, Aufwand für Probenahme und Spezialanalytik) erforderlich.

5.2 Verfahrensgang Teufe-Neubildungsverfahren

5.2.1 Grundlagen

Das Teufe-Neubildungsverfahren basiert auf Kombination eines einfachen Wasserbilanzansatzes mit der Beschreibung der Grundwasserströmung nach Darcy (siehe Abschnitt 4.2). Das Verfahrensprinzip und die zugrundeliegenden Formeln werden im Folgenden hergeleitet.

Die Wasserbilanz bezieht sich auf einen Stromstreifen mit einer spezifischen Fläche im Anstrom einer Grundwassermessstelle (Abb. 5-1). Für eine vereinfachte Berechnung wird dessen Breite standardmäßig auf einen Meter festgelegt. Wasser, welches innerhalb der spezifischen Fläche (A_2) versickert und als Grundwasserneubildung die gesättigte Zone erreicht, muss auf Höhe der Messstelle eine definierte Fläche (A_1) mit einer bestimmten Filtergeschwindigkeit durchströmen. Flächen und Geschwindigkeiten stehen hierbei entsprechend Gl. 5-1 im Verhältnis zueinander. Je größer die Fläche der Grundwasserneubildung (A_2) relativ zu der durchströmten Fläche A_1 ist, desto größer ist auch die Filtergeschwindigkeit gegenüber der Verlagerungsgeschwindigkeit, mit der das Wasser bei der Neubildung in das Grundwasser übertritt (GWN). Auch die Grundwasserneubildung weist die Dimension einer Geschwindigkeit auf [mm/a].

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{GWN_{Mittel}}{v_f} \quad \text{Gl. 5-1}$$

mit: A_1 : Durchströmte Querschnittsfläche im Grundwasserleiter [m²]
 A_2 : Fläche der Grundwasserneubildung im Zustrom [m²]
GWN_{Mittel}: mittlere Grundwasserneubildung auf der Fläche A_2 [m²]
 v_f : Filtergeschwindigkeit [m/s]

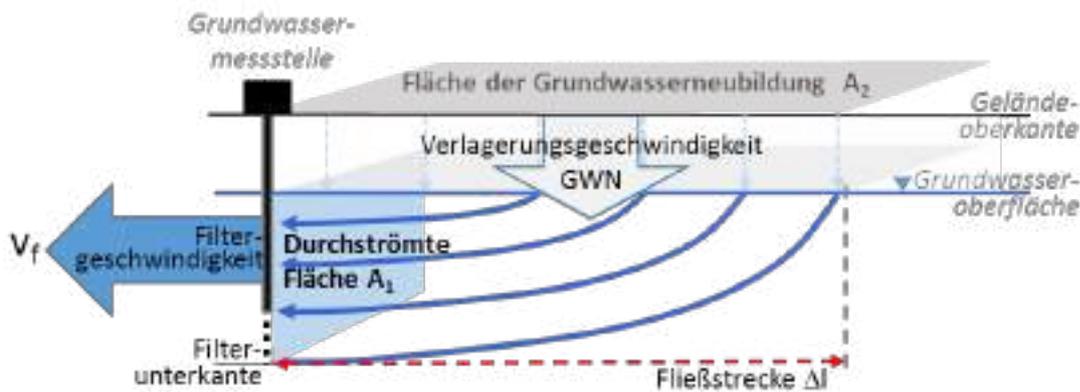


Abb. 5-1: Schematische Darstellung der zugrundeliegenden Abhängigkeiten des Teufen-Neubildungsverfahrens.

Unter stationären Bedingungen sind die Volumenströme durch die Bilanzflächen A_1 und A_2 identisch. Die Größe der Bilanzfläche A_1 ergibt sich aus der grundwassererfüllten Mächtigkeit oberhalb eines Bezugsniveau (z.B. die Filtertiefe der Messstelle) sowie der Breite des Stromstreifens (standardmäßig ein Meter).

Formell werden die über die Filtertiefe (F) und Breite des Stromstreifens (b) sowie über Fließstrecke und Breite (b) definierten Flächen in der Gl. 5-2 ins Verhältnis zur mittleren Grundwasserneubildungsrate und Filtergeschwindigkeit gesetzt. Die Breite (b) des Stromstreifens ist für beide Flächen gleich und kann daher in der Gl. 5-2 herausgekürzt werden. Bei bekannter Grundwasserneubildung im Anstrom der Messstelle und Filtergeschwindigkeit im Bereich der Messstelle kann die Größe der erforderlichen Neubildungsfläche berechnet werden.

Da die Breite des Stromstreifens in beiden Flächen mit einem Meter festgelegt ist, geht nur die Länge, d.h. die Fließstrecke als Variable ein, um die für den äquivalenten Volumenstrom aus der Neubildung benötigte Fläche zu erreichen.

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{(F - GWO) \cdot b}{\Delta l \cdot b} = \frac{GWN_{Mittel}}{v_f} \quad \text{Gl. 5-2}$$

- Mit:
- F: Filtertiefe [m NHN oder m u GOK]
 - GWO Lage der Grundwasseroberfläche [m NHN oder m u GOK]
 - b Breite des Stromstreifens, standardmäßig 1 m [m]
 - Δl Fließstrecke [m]

übrige Erläuterungen siehe Gl. 5-1

Über diesen Ansatz kann jeder Filtertiefe eine entsprechende Fließstrecke und damit die Entfernung bis zum Ort der Neubildung des in dieser Tiefe angetroffenen Grundwassers zugewiesen werden. Für Messstellen kann hierfür wahlweise die Filteroberkante und Filterunterkante oder eine mittlere Filtertiefe angesetzt werden.

Zur Berechnung der Fließstrecke wird Gl. 5-2 nach der Fließstrecke Δl umgestellt (Gl. 5-3). Die Filtergeschwindigkeit wird hierbei aus dem hydraulischen Gradienten im Anstrom der Messstelle und dem k_f -Wert berechnet (Abschnitt 4.2, Gl. 4-1).

$$\text{Fließstrecke } \Delta l = \frac{(F - GWO) \cdot v_f}{GWN_{Mittel}} = \frac{(F - GWO) \cdot k_f \Delta h}{GWN_{Mittel} \Delta l} \quad \text{Gl. 5-3}$$



Durch Einsetzen der Gl. 5-3 in die Darcy-Gleichung ergibt sich folgende vereinfachte Formulierung zur Berechnung der Fließzeit (Gl. 5-4). Dabei ist zu beachten, dass die Abstandsgeschwindigkeit und nicht die Filtergeschwindigkeit in die Berechnung eingeht. Eine Umrechnung nach Gl. 4-2 geht dem voraus.

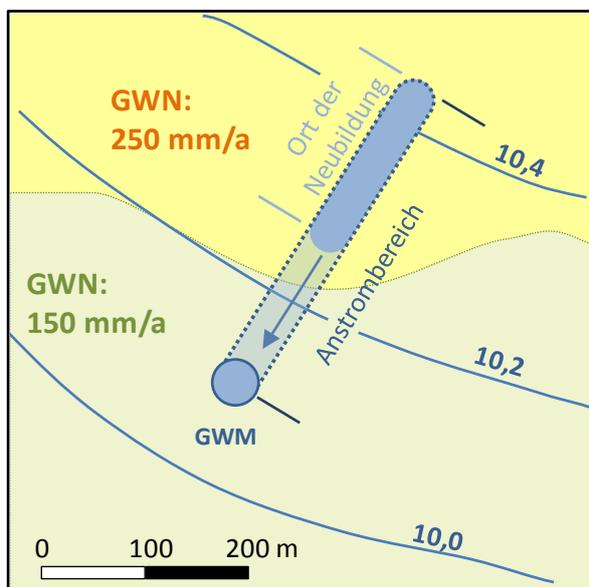
$$t = (F - \text{GWO}) \frac{n_{\text{eff}}}{\text{GWN}_{\text{Mittel}}} \quad \text{Gl. 5-4}$$

Mit:	t:	Fließzeit [a]
	F:	Filtertiefe [m NHN oder m u GOK]
	GWO	Lage der Grundwasseroberfläche [m NHN oder m u GOK]
	GWN	Mittelwert der Grundwasserneubildung im Anstrom
	n_{eff}	speichernutzbares / durchflusswirksames Porenvolumen

Anhand der Gl. 5-4 kann die Fließzeit für Gebiete mit geringer räumlicher Variabilität in den Neubildungsraten direkt berechnet werden (siehe Abschnitt 5.2.4). Bei großräumig einheitlichen Grundwasserneubildungsraten erfolgt die Berechnung der Fließzeit somit unabhängig von der Definition eines Anstrombereichs der Messstelle (Fließstrecke).

Für die Ableitung der mittleren Grundwasserneubildung im Anstrombereich einer Messstelle kann zusätzlich die Erstreckung des Anstrombereichs über Gl- 5-3 berechnet werden. Hierbei wird die Fließstrecke der Bahnlinie berechnet, die durch die Filterunterkante (FUK) der Messstelle verläuft. Für die Berechnung wird der hydraulische Gradient im Anstrom der GWM anhand des Grundwassergleichenplans verwendet.

Die mittels Gleichung 5-3 berechnete Fließstrecke wird, wie in Abb. 5-2 schematisch dargestellt, entlang einer Stromlinie senkrecht zu den Grundwassergleichen abgetragen. Aus der Berechnung der maximalen Fließstrecke (Bahnlinien in der FUK-Tiefe) ergibt sich der Anstrombereich der Messstelle.



Gewichtete mittlere Grundwasserneubildung:

120 m zu 150 mm/a; Streckenanteil: 33 %
240 m mit 250mm/a; Streckenanteil: 67 %

$$\begin{array}{r} 150 \text{ mm/a} \times 0,33 \\ + 250 \text{ mm/a} \times 0,67 \\ \hline 217 \text{ mm/a} \end{array}$$

Abb. 5-2:
Schematische Darstellung der Berechnung des Anstrombereichs und des Orts der Neubildung

Der Anstrombereich (Bezugspunkt Filterunterkante) stellt die Strecke dar, für die die mittlere Grundwasserneubildung zu ermitteln ist. Die Gewichtung der mittleren Neubildung erfolgt entsprechend der Streckenanteile innerhalb des Anstrombereichs. Da die Grundwasserneubildung als Faktor in die Berechnung der Fließstrecke einfließt, ist es ggf. erforderlich dieses Verfahren mehrfach iterativ zu durchlaufen.



5.2.2 Berechnungshilfe in MS-Excel

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde ein Berechnungstool in dem Programm Microsoft Excel erarbeitet, in das durch Eingabe der Eingangswerte eine automatisierte Berechnung der Fließzeit erfolgt (Abb. 5-3). Mit dem MS-Excel Tool kann auch die Fließstrecke berechnet werden, welche als Ausgangswert für die iterative Ermittlung der Grundwasserneubildung im Anstrombereich der Messstelle genutzt werden kann.

Allgemeine Daten und Ausbaudaten							Wasserstandsdaten		
Grundwasserkörper	Grundwasser- messstelle	optional RW	optional HW	GOK mNN	Messpunkt- höhe m NN	FOK m u GOK	FUK m u GOK	Wasserstand	Art
GWK 007	GW-M15			12,10	12,00	4,0	6,0	10,1	GWO m NN

aktuelle Nitrat- konzentration mg/l	Lithologie		mittlere Grundwasser- neubildung mm/a	hydraulischer Gradient [m/m]	berechnete Fließstrecke [m]			berechnete Fließzeit [Jahre]		
	kf-Wert m/s	n eff.			für FOK (Min)	für FUK (Max)	arithm. Mittel	für FOK (Min)	für FUK (Max)	arithm. Mittel
60	6,00E-04	0,2	220	0,001	172	344	258	2,2	3,6	2,9

Abb. 5-3: Eingabemaske zur Ermittlung der Fließzeit und der Fließstrecke in Microsoft Excel.

5.2.3 Datengrundlage

Entsprechend der vereinfachten Gl. 5-4 wird zur Berechnung der Fließzeit für das punktbezogen Teufe-Neubildungsverfahren die in Tabelle 5-1 aufgelistete Datengrundlage erfordert. Bei einer heterogenen Verteilung der Grundwasserneubildung im GWK sind zusätzlich Eingabedaten entsprechend der Gl. 5-3 bereitzustellen.

Tabelle 5-1: Auflistung der Datengrundlage für das Teufe-Neubildungsverfahren

Parameter	flächenhafte Datengrundlage	punktbezogene Datengrundlagen
Bei homogener Grundwasserneubildung im Anstrombereich (ohne Ermittlung der Fließstrecke)		
Kenndaten der Grundwassermessstelle	Grundwasser- bzw. Messstellenkataster	
Lage der Grundwasseroberfläche	Grundwassergleichenplan (HÜK 200, HK 50), Landesdatenbestände	Messung Grundwassermessstelle
Nutzbarer Hohlraumanteil	Modellergebnis (Lockergestein); Literaturwerte (Festgestein)	Vorzugsweise Lokalinformation (Sedimentanalysen, Pumptests)
Grundwasserneubildung	GROWA	Lysimeterdaten, Kleinräumige Berechnung der Grundwasserneubildung
bei heterogener Grundwasserneubildung im Anstrombereich (Ermittlung der Fließstrecke)		
Hydraulischer Gradient	Grundwassergleichenplan (HÜK 200, HK 50)	Lokaler Grundwassergleichenplan
Durchlässigkeitsbeiwert	HÜK 200, HK 50, Geologisches Modell	Bohrprofilaten, Pumptests



5.2.4 Anwendbarkeit des Verfahrens

Das Teufe-Neubildungsverfahren ist für die Ermittlung der Fließzeiten von Grundwassermessstellen mit einer Filterstellung im obersten Grundwasserleiter anwendbar. Es handelt sich um ein einfaches, abschätzendes Verfahren, dessen Anwendbarkeit und Genauigkeit wie bei allen Verfahren von der Güte der Eingangswerte und von der hydrogeologischen Situation abhängt.

Die Anwendung des Verfahrens sollte auf

- weitgehend homogenen aufgebaute,
- hydraulisch unbeeinflusste Porengrundwasserleitern,
- mit freier Grundwasseroberfläche und
- ohne hydraulisch trennende Schichten
- und ausreichend hohen Grundwasserneubildungsraten (mindestens 25 mm/a bei Festgesteinen und 50 mm/a bei Lockergesteinen)

beschränkt werden. Fließzeiten für komplexere Strömungsverhältnisse in Grundwasserleitern können nicht oder nur bedingt mit dem Verfahren wiedergegeben werden.

Vor der Anwendung des Verfahrens ist es sinnvoll, für die zu untersuchenden Messstellen eine Eignungsprüfung durchzuführen. In Abb. 5-4 ist die Vorgehensweise zur Anwendbarkeit des Teufe-Neubildungsverfahrens dargestellt. Die einzelnen Prüfschritte werden im Folgenden kurz erläutert.

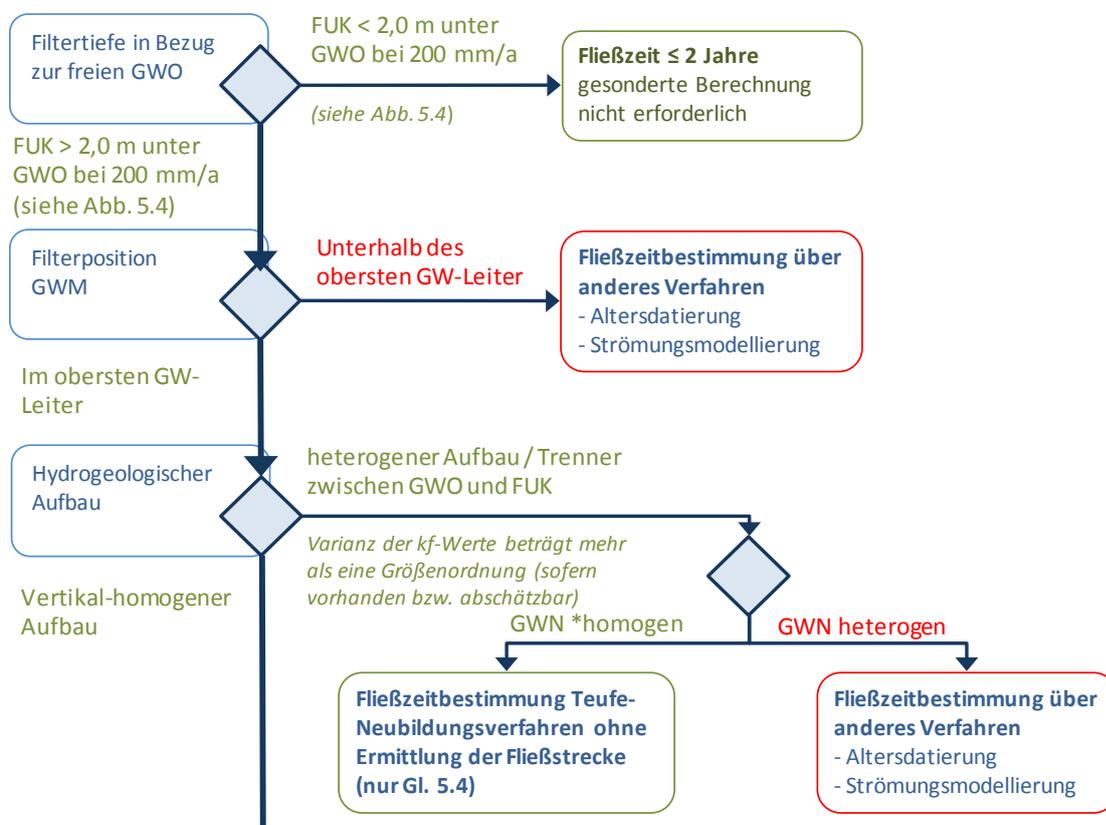




Abb. 5-4: Vorgehensweise und Kriterien zur Anwendung und Vereinfachung des Teufe-Neubildungsverfahrens (Abkürzungen: GWO: Grundwasseroberfläche, GWN: Grundwasserneubildung, FUK: Filterunterkante)

Filtertiefe in Bezug zur freien Grundwasseroberfläche

Eine Besonderheit von Grundwassermessstellen besteht in der tiefenspezifischen Entnahme von Grundwasser über eine definierte Filterstrecke zwischen der Filteroberkante und Filterunterkante. Je tiefer die Filterunterkante unterhalb der Grundwasseroberfläche liegt, desto größer sind die Fließzeiten des an diesem Punkt in die Messstelle eintretenden Grundwassers. Dagegen weisen im Bereich der Grundwasseroberfläche verfilterte Messstellen praktisch keine Fließzeiten auf, da das Grundwasser im direkten Umfeld der Messstelle neugebildet wurde (Abb. 5-5). Die Ermittlung der Fließzeit ist dann erforderlich, wenn die Filterunterkante deutlich unterhalb der Grundwasseroberfläche liegt und sich dadurch eine signifikante Fließzeit ergibt.

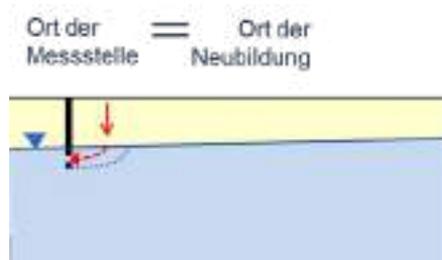
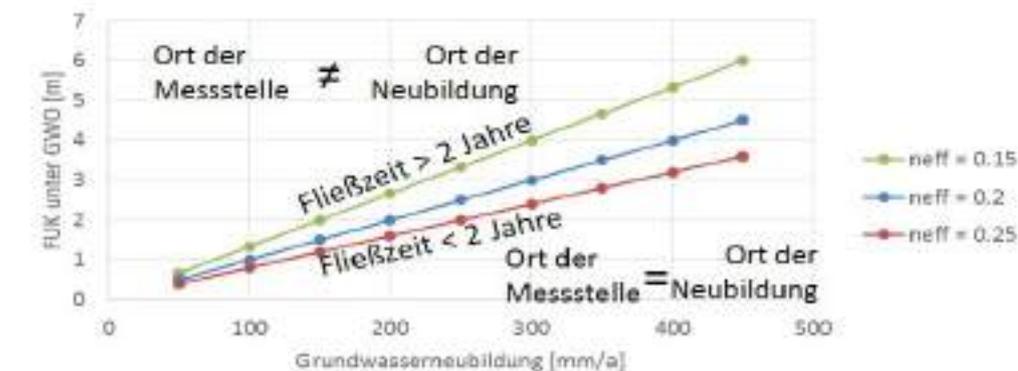


Abb. 5-5: Kennliniendiagramm für Anwendung des Teufe-Neubildungsverfahrens: bei Fließzeiten unter 2 Jahren ist eine Anwendung nicht erforderlich. Fließzeiten unterhalb von 2 Jahren können unter Berücksichtigung der Grundwasserneubildung, der speichernutzbaren Porosität (n_{eff}) und der Filtertiefe der Messstelle (FUK-Position) aus dem Diagramm abgelesen werden



Die Verfilterung der Messstelle stellt damit ein Kriterium für die Anwendung des Teufen-Neubildungsverfahrens dar. Bei zu erwartenden Fließzeiten von weniger als zwei Jahren ist eine Anwendung nicht erforderlich. Aus dem Kennliniendiagramm in Abb. 5-5 kann – in Abhängigkeit von Grundwasserneubildung, durchflusswirksamer Porosität und Filterlage die Erfordernis abgelesen werden. So muss bei einer mittleren Grundwasserneubildung von ca. 200 mm/a die Messstelle tiefer als 2 m unterhalb der Grundwasseroberfläche verfiltert sein ($n_{\text{eff}} = 0,2$), damit Fließzeiten von über 2 Jahren zu erwarten sind. Bei höherer Neubildung oder/und geringerer effektiver Porosität erhöht sich dieser Richtwert.

Je länger die Filterstrecke ist, desto unterschiedlicher sind die Fließzeiten der Bahnlinien, welche die Messstelle an der Filteroberkante (FOK) und der –unterkante (FUK) passieren. Der prozentuale Unterschied der durch Einsetzen der für FOK bzw. FUK berechneten Fließzeiten ist in Abhängigkeit von der Filterlänge in Abb. 5-6 dargestellt.

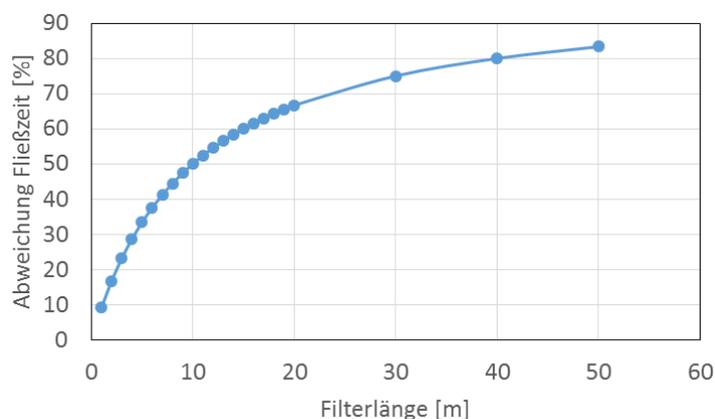


Abb. 5-6:
*Prozentuale
Abweichung der
Fließzeit in Abhängigkeit
von der vorgegebenen
Filterlänge.*

Unabhängig von der Grundwasserneubildung und der effektiven Porosität steigt die Abweichung logarithmisch an. Bei einer Filterlänge von 1 m beträgt der Wert lediglich 10 %. Eine Filterlänge von 10 m erzeugt dahingegen eine Abweichung von 50 %. Bei Filterlängen von ≥ 2 m sollte die Fließzeit nicht für die Filtermitte, sondern getrennt für die Filterober- und unterkante durchgeführt werden¹. Dies ist als Standardverfahren auch im Excel-Tool enthalten. Die berechnete Fließzeit entspricht dem arithmetischen Mittel der für FOK und FUK berechneten Fließzeit.

Filterposition

Die Filterposition sollte im obersten Grundwasserleiter liegen. Für Messstellen mit Filterpositionen in tieferen Leitern bzw. Stockwerken kann eine flächenhafte Überdeckung mit hemmenden oder trennenden Schichten angenommen werden. Damit ist tendenziell von komplexen Grundwasserströmungsverhältnissen auszugehen, für die das Teufe-Neubildungsverfahren nicht eingesetzt werden kann. In diesem Fall sollten andere Verfahren der Fließzeitenbestimmung verwendet werden.

Hydraulischer Aufbau

Auch bei einer Filterposition im obersten Grundwasserleiter können in der gesättigten Zone hemmende oder trennende Schichten und die damit verbundenen komplexen Strömungs-

¹ Liegt die FOK oberhalb der Grundwasseroberfläche würden sich rechnerisch negative Fließzeiten ergeben. In diesem Fall sollte die Grundwasseroberfläche verwendet werden, so dass sich für die Fließzeit ein Wert von 0 ergibt. Dies wird im Excel-Tool automatisch berücksichtigt.



verhältnisse auftreten. Hydraulisch wirksame Trennschichten werden als Sedimentlagen definiert, welche aufgrund ihrer relativ zum umgebenden Sediment geringeren Durchlässigkeit den horizontalen Austausch von Grundwasser behindern. Dies sind insbesondere Grundwassergeringleitern und –hemmern mit einer Durchlässigkeit kleiner 10^{-6} m/s bzw. 10^{-8} m/s. Die gesamte Filterstecke der zu untersuchenden Messstellen sollte oberhalb der Trennschichten liegen.

Da in die Fließzeitberechnung das Verhältnis zwischen effektiver Porosität und Neubildung, nicht aber der k_f -Wert eingeht (siehe Gl. 5-4), kann für den Fall einer großflächig einheitlichen Grundwasserneubildungsrate (ca. 1 km im Anstrom der Messstelle) die Fließzeit berechnet werden. In diesem Fall aber ohne die Ermittlung der mittleren Grundwasserneubildungsrate im Anstrombereich (vgl. Abb. 5-2, S.47). Bei heterogener räumlicher Verteilung der Neubildungsrate – beispielsweise bei kleinräumig variierender acker- und forstwirtschaftlicher Nutzung – ist das Teufe-Neubildungsverfahren nicht mehr einzusetzen. In diesem Fall wären entsprechend hochauflösende Grundwasserströmungsmodelle oder Altersdatierungen einzusetzen.

Hydraulische Einflüsse

Grundwassermessstellen im direkten Umfeld von aktiven Förder- und Infiltrationsorganen zeigen eine erhebliche Beeinflussung der Fließgeschwindigkeit, die mit dem Verfahren nicht wiedergegeben werden können. Die Reichweite von Grundwasserentnahmen kann näherungsweise anhand des Absenkungstrichters bzw. der lokalen Grundwasseraufhöhung nach Sichardt (Gl. 5-5) berechnet werden. Liegt eine Messstelle innerhalb des Absenkungstrichters wäre dies ein Ausschlusskriterium.

$$\text{Radius Absenkung} = 3000 \cdot \Delta h_B \cdot \sqrt{k_f}$$

Gl. 5-5

Mit Δh_B : Differenz Ruhe- und Betriebswasserspiegel Förderbrunnen [m]
 k_f Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

Für einen aus sandigen Kiesen aufgebauten Grundwasserleiter mit einem durchschnittlichen k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-3}$ m/s kann als Faustwert pro Meter Wasserspiegelabsenkung im Brunnen von einem Radius des Absenkungstrichters von ca. 100 m ausgegangen werden.

Als Richtwert sollte bei einem Abstand von 500 m von der hydraulisch aktiven Anlage der Förderbrunneneinfluss hinreichend gering sein.

Nach der Überprüfung der Filterposition, des hydrogeologischen Aufbaus und möglicher hydraulischer Einflüsse kann das Teufe-Neubildungsverfahren für die verbliebenen Messstellen eingesetzt werden. Nach dem Ausschlussverfahren sollte im Idealfall die Mehrzahl der Grundwassermessstellen des jeweiligen GWK für eine Fließzeitermittlung geeignet sein.

Grundwasserneubildung

Das Teufe-Neubildungsverfahren basiert auf dem Verhältnis zwischen der durchflusswirksamen Porosität und der Grundwasserneubildung (Gl. 5-4). Rechnerisch steigt die Fließzeit mit abnehmender Neubildung exponentiell an und würde bei einer Neubildung von 0 mm/a gegen unendlich gehen. Bei geringen Neubildungsraten führen bereits kleine Variationen zu großen Änderungen in den berechneten Fließzeiten. Je niedriger die Porosität ist, desto stärker ist der Effekt ausgeprägt.

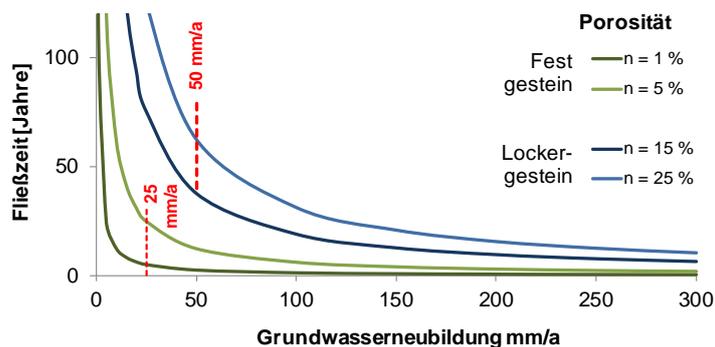


Abb. 5-7: Verhältnis zwischen Fließzeit und Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von der Porosität (Modellfall: Filterstrecke 5 m; FOK 10 m unter GWO)

Für Festgesteine wird empfohlen, eine Mindest-Grundwasserneubildung von 25 mm/a vorzusehen bzw. das Verfahren in Gebieten mit sehr geringen Neubildungsraten nicht anzuwenden, da dann die Unschärfe exponentiell ansteigt.

Lockergesteine weisen üblicherweise höhere durchflusswirksame Porositäten von 15 – 25 % auf. Die exponentielle Zunahme der Unschärfe in den Fließzeiten tritt hier nicht so stark auf, setzt aber schon bei Neubildungsraten unter 50 mm/a ein. Für Lockergesteine wird deshalb empfohlen, bei tiefer verfilterten Messstellen (Filtertiefe 10 m unter GWO oder tiefer) und Neubildungsraten unter 50 mm das Teufe-Neubildungsverfahren nicht mehr einzusetzen.

Für Grundwasserkörper, die eine hohe Variabilität der Grundwasserneubildung aufweisen, kann über die Ermittlung der Fließstrecke und dem daraus ableitbaren Anstrombereich eine höhere Genauigkeit erzielt werden. Dieses Verfahren ist insbesondere auch bei Grundwassermessstellen im Übergangsbereich zu Kluftgrundwasserleitern zu empfehlen, um mögliche Effekte durch einen Wechsel des durchströmten Mediums im Übergangsbereich zu berücksichtigen.

5.2.5 Exemplarische Anwendung durch die Projektpartner

5.2.5.1 Test-GWK 1 (Örtze-Lockergestein links)

Der Grundwasserkörper befindet sich im zentral-östlichen Niedersachsen nördlich der Kreisstadt Celle. Die westlich von Celle in die Aller mündende Örtze bildet die westliche Grenze des GWL. Im Süden stellt die Aller selber die Begrenzung dar.

Bei dem GWK „Örtze links“ handelt es sich um einen typischen Lockergesteinsgrundwasserleiter im glazial geprägten hydrogeologischen Großraum des Nord- und mitteldeutschen Lockergesteinsgebietes. Innerhalb des Grundwasserkörpers tritt ein teilweise komplexer Stockwerksbau auf. Der oberste Grundwasserleiter ist aus drenthezeitlichen Schmelzwassersanden aufgebaut. Die glaziofluviatile Sande und Kiese überlagern tertiäre Braunkohlensande, in die lokal tiefe Rinnenstrukturen eingeschnitten sind.

Im Vergleich der drei Test-GWK besitzt der GWK 1 mit einer Gesamtfläche von 129 km² die größte Ausdehnung, weist jedoch den geringsten Anteil an ackerbaulich genutzter Fläche auf (GWK 1: 32 %). In diesem GWK wird die Flächennutzung vor allem durch Waldflächen dominiert (Tabelle 5-2; Abb. 5-8).



Tabelle 5-2: Flächennutzung und Grundwasser-Messstellen

Flächennutzung	Fläche km ²	Flächenanteil	Anzahl GWM
Acker	42,4	32 %	13
Grünland	9,6	7 %	1
Wald	71,9	54 %	11
Siedlung	5	4 %	0
Summe	133	100 %	25

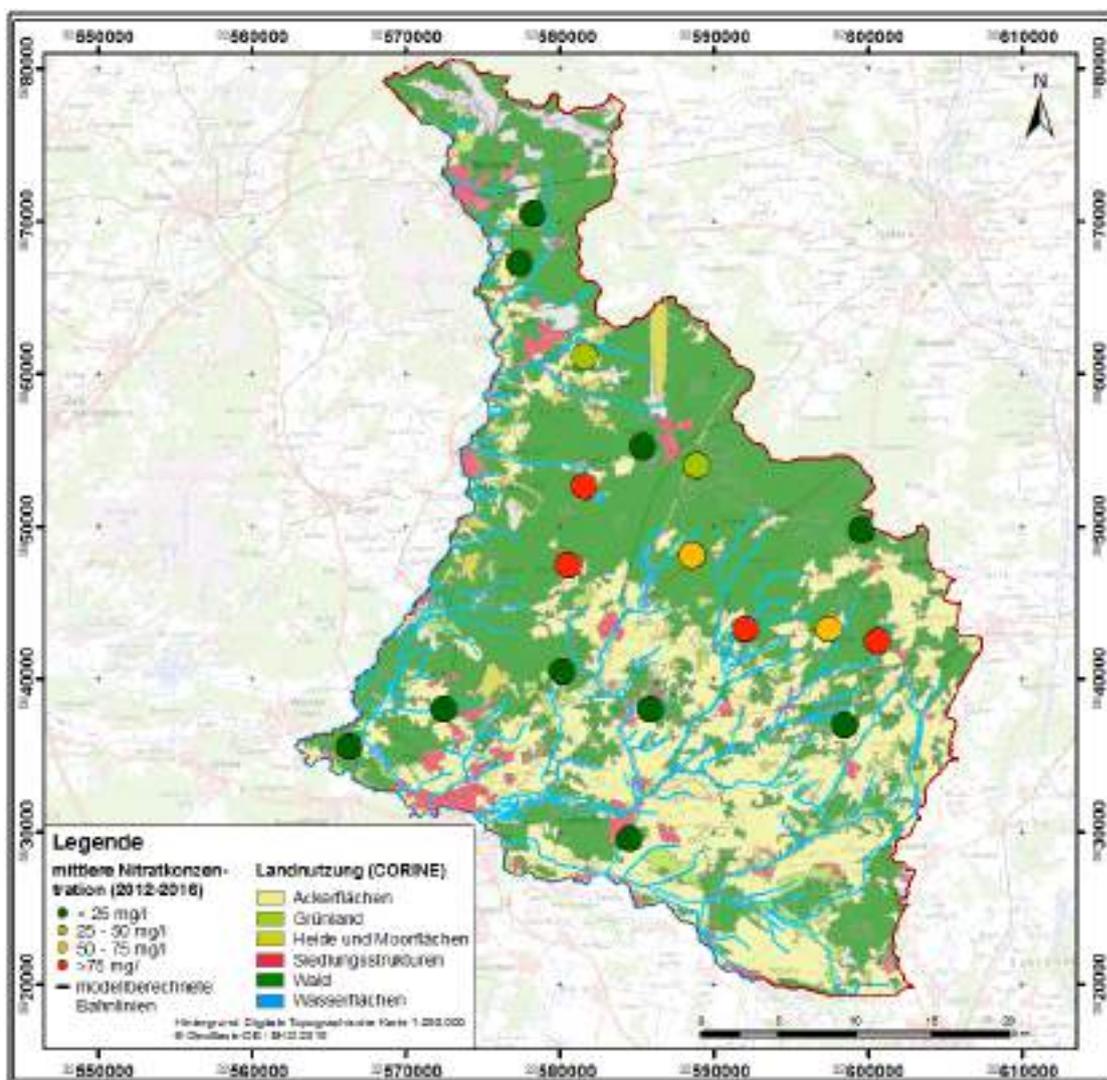


Abb. 5-8: Flächennutzung und Lage der Grundwassermessstellen im GWK 1 „Örtze Lockergestein links“. Die Farbgebung der Messstellensymbole repräsentiert die Nitratkonzentration



Das Messstellennetz umfasst 25 Grundwassermessstellen, und damit eine rechnerische Messstellendichte von 1 Messstelle auf 5 km². Die Hälfte der Messstellen sind im Bereich landwirtschaftlicher Fläche erstellt worden. Acht Messstellen weisen im mehrjährigen Mittel Nitratkonzentrationen von über 50 mg/l auf. Dies entspricht ca. einem Drittel der Beobachtungsmessstellen (Abb. 5-9). Entsprechend der Vorgehensweise ist eine Analyse der Verweil- und Fließzeiten prinzipiell nur für die GWM notwendig, in denen es zu einer Überschreitung der Nitratkonzentrationen gekommen ist. Im Rahmen der Testphase des Verfahrens soll aber die Anwendung auf alle GWM ausgeweitet werden.

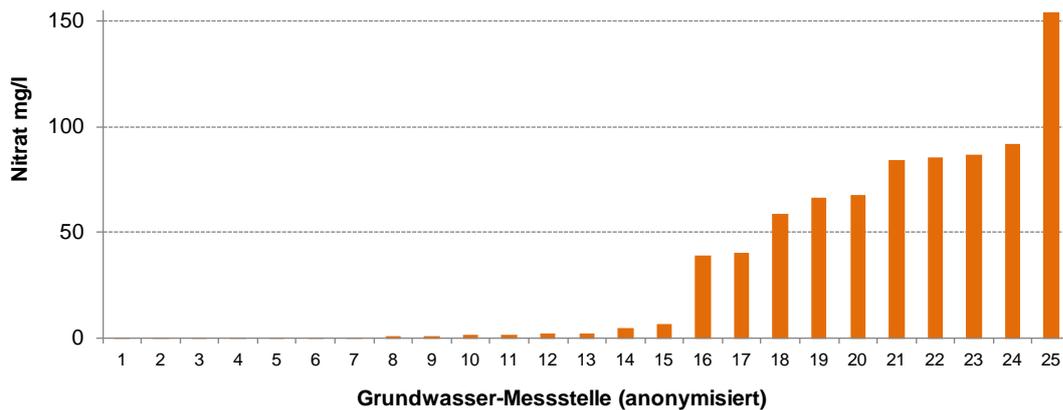


Abb. 5-9: Nitratkonzentrationen in den Grundwasser-Messstellen GWK 1 „Örtze-Lockergerstein“, Mittelwerte der letzten fünf Jahre (Bezugsjahr 2016).

Katasterdaten der Grundwassermessstellen einschließlich der Nitratkonzentrationen wurden vom NLWKN² zur Verfügung gestellt. Alle übrigen Daten³ wurden vom NIBIS-Server [Niedersächsisches Bodeninformationssystem: <http://nibis.lbeg.de>] bezogen.

Für den Grundwasserkörper zeigt sich eine mittel- bis hohe räumliche Variabilität in den Grundwasser-Neubildungsraten. Während in den gewässernahen Niederungsgebieten häufig geringe Neubildungsraten von unter 50 mm/a auftreten, liege die Raten im stärker landwirtschaftlich genutzten zentralen und südöstlichen Bereich zwischen 200 und 300 mm/a. In den nördlichen und nordwestlichen Bereichen mit überwiegend forstwirtschaftlicher Nutzung liegen die Raten üblicherweise zwischen 150 und 250 mm/a.

Im Vorfeld der Fließzeitermittlung wurde eine Prüfung der Messstellen entsprechend der in Kapitel 5.2.4 aufgeführten Kriterien durchgeführt. Für den GWK 1 zeigten sich zwei Messstellen aufgrund des hydrogeologischen Aufbaus als ungeeignet. In beiden Fällen befindet sich die Filterposition der Messstelle unterhalb einer hydraulisch hemmenden Schicht.

Für 23 von 25 Grundwassermessstellen konnte mit dem Teufe-Neubildungsverfahren eine Fließzeit ermittelt werden. Am häufigsten treten Fließzeiten zwischen 5 und 10 Jahren auf (Abb. 5-11), gefolgt von Fließzeiten zwischen 2 und 5 Jahren. Keine der Messstellen wies mittlere Fließzeiten unterhalb von zwei Jahren auf. Fließzeiten oberhalb von 15 Jahren traten nicht auf. Im Mittel lag die Fließzeit des Grundwassers bis zum Erreichen der Messstellen des Messnetzes bei 7,5 Jahren.

² NLWKN: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

³ Als frei verfügbare NIBIS-Daten wurden: Lage der Grundwasseroberfläche (HÜK 200, HK 50), Ausbauprofile der Messstellen, Schichtverzeichnisse, räumliche Verteilung der Grundwasser-Neubildungsraten (GROWA06V2) verwendet.

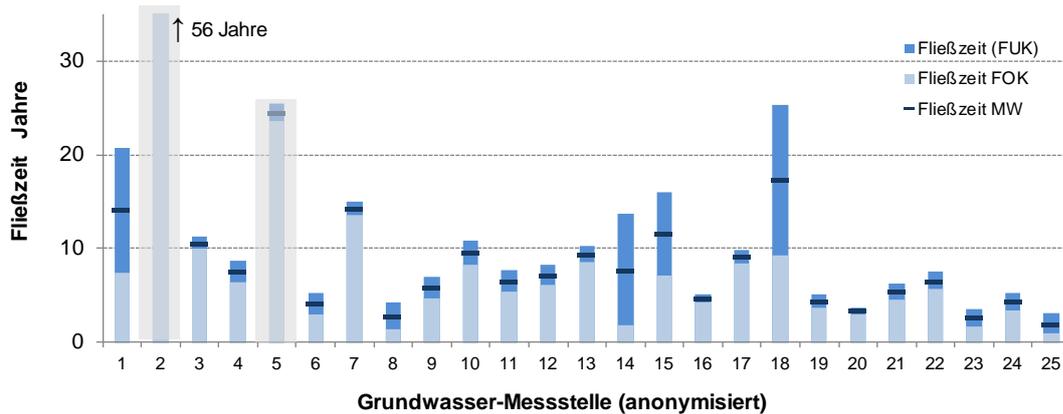


Abb. 5-10: Mit dem Teufe-Neubildungsverfahren ermittelte Fließzeiten für die Messstellen des GWK 1 „Örtze“ (für die grau hinterlegten Messstellen ist das Verfahren nicht oder nur bedingt geeignet)

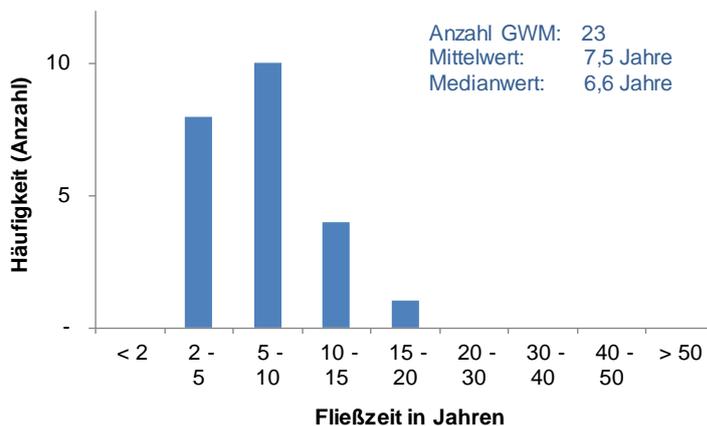


Abb. 5-11: Häufigkeitsverteilung für die mit dem Teufe-Neubildungsverfahren ermittelten Fließzeiten für die Grundwasser-Messstellen im GWK 1 „Örtze“

5.2.5.2 Test-GWK 2 (SA-014)

Der Grundwasserkörper SA-014 befindet sich östlich des Harzes und westlich der Stadt Halle. Hauptvorfluter ist die den GWK in einem Halbbogen am südöstlichen und nordöstlichen Rand umfließende Saale. Dieser GWK ist für das mitteldeutsche Trockengebiet typisch und repräsentiert mehrheitlich einen Kluftwasserleiter in dem aus mesozoischen Festgesteinen aufgebauten hydrogeologischen Großraum „Sandsteinfolgen des Buntsandstein und Kalksteinfolgen des Muschelkalks“. Aufgrund der Lage im Regenschatten des Harzes weist das Gebiet außergewöhnlich geringe Niederschläge und Grundwasserneubildungsraten auf. Diese liegen meist unter 50 mm/a, häufig sogar unterhalb von 25 mm/a. Gebiete mit höheren Neubildungsraten treten nur isoliert und kleinräumig, meist in Bereichen mit mächtigeren alluvialen Sedimenten und geringeren Reliefunterschieden auf.

Der Grundwasserkörper weist eine Gesamtfläche von 1.236 m² auf, die überwiegend landwirtschaftlich genutzt wird (Abb. 5-13, Tabelle 5-7). Siedlungsflächen und forstwirtschaftlich genutzte Flächen treten nur untergeordnet auf.



Die Beschaffenheit des Grundwassers wird über 34 Grundwassermessstellen und 9 Quellen erfasst. Im Folgenden wird nur die Fließzeitermittlung für die Grundwassermessstellen vorgestellt, für die exemplarische Anwendung des Verfahrens zur Fließzeitermittlung für Förderbrunnen und Quellen wird auf Abschnitt 5.3.4 verwiesen.

Tabelle 5-3: Flächennutzung und Grundwasser-Messstellen (Hinweis: die Zuordnung der Messstellen zu einer Flächennutzung bezieht sich auf die Position der Messstelle und nicht auf den Ort der Grundwasserneubildung)

Flächennutzung	Fläche km ²	Flächenanteil	Anzahl GWM
Acker	998	80,7 %	28
Grünland	33	2,7 %	0
Wald	56	4,5 %	1
Siedlung	144	11,6 %	5
Wasserflächen	6	0,5 %	-
Summe	1.237	100 %	34

Das Messstellennetz umfasst 34 Grundwassermessstellen. Dies entspricht einer Messstellendichte von 1 Messstelle auf 36 km². Die überwiegende Mehrzahl sind im Bereich landwirtschaftlicher Fläche erstellt worden. Zehn Messstellen weisen im mehrjährigen Mittel Nitratkonzentrationen von über 50 mg/l auf. Dies entspricht ca. einem Drittel der Beobachtungsmessstellen (Abb. 5-14). Der Grundwasserkörper wird aufgrund der festgestellten Nitratbelastung als nicht in chemisch gutem Zustand eingestuft.

Katasterdaten der Grundwassermessstellen einschließlich der Nitratkonzentrationen wurden vom Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt zur Verfügung gestellt. Daten zur flächenhaften Verteilung der Grundwasserneubildung, der Lage der Grundwasser Oberfläche für die Ableitung der hydraulischen Gradienten im Nahbereich der Grundwassermessstellen und der kf-Werte des oberflächennahen Grundwasserleiters wurden vom Projektpartner FZJ bereitgestellt.

Das Messstellennetz bildet die sehr heterogene lithologisch-hydrogeologische Situation des Grundwasserkörpers ab. Neben einzelnen, oberflächennah in den aufliegenden Lockergesteinen verfilterten Messstellen, weist die Mehrzahl der Messstellen tiefe Filterlagen von mehreren 10er Metern unter GOK auf. Hierbei handelt es sich um Festgesteinsmessstellen, in denen die Beschaffenheit in den triassischen Kluffundwasserleitern des Buntsandsteins und des Muschelkalks erfasst wird. Buntsandsteinserien stehen flächendeckend im zentralen sowie nördlichen, östlichen und dem südöstlichen Bereich an, während im vor allem im zentralen und westlichen Abschnitt Kalksteine des Muschelkalks austreichen.

Im Vorfeld der Fließzeitermittlung wurde eine Prüfung der Messstellen entsprechend der in Kapitel 5.2.4 aufgeführten Kriterien durchgeführt. Aufgrund des heterogenen Aufbaus des Grundwasserleiters zwischen der Grundwasser Oberfläche und der Filterunterkante wurden 10 Messstellen als nicht ohne weiteres geeignet für das Teufe-Neubildungsverfahren angesehen. Zwei von diesen Grundwassermessstellen können - auch ohne eine Abschätzung der maximal erfassten Fließstrecke und des Anstrombereichs sowie der über den Anstrombereich gewichteten Grundwasserneubildung - dennoch verwendet werden, da die Grundwasserneubildungsraten großräumig homogen sind. Die ermittelten Spannen der Fließzeiten und die mittleren Fließzeiten für die einzelnen Messstellen sind Abb. 5-15 dargestellt.

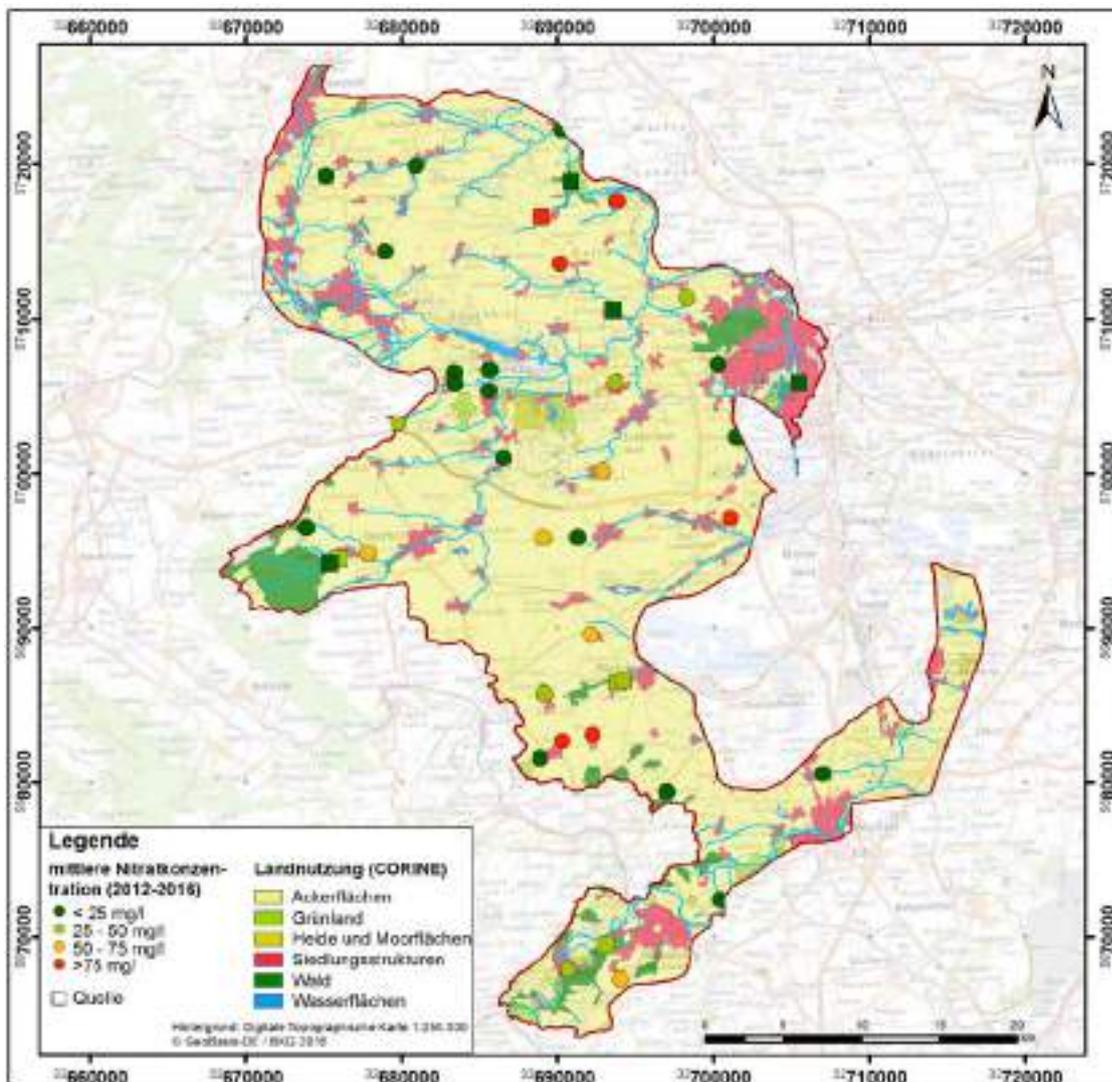


Abb. 5-12: Flächennutzung und Lage der Grundwassermessstellen im GWK 3 SAL 014 „Mansfeld – Querfurt – Naumburger Triasmulden und –platten“.

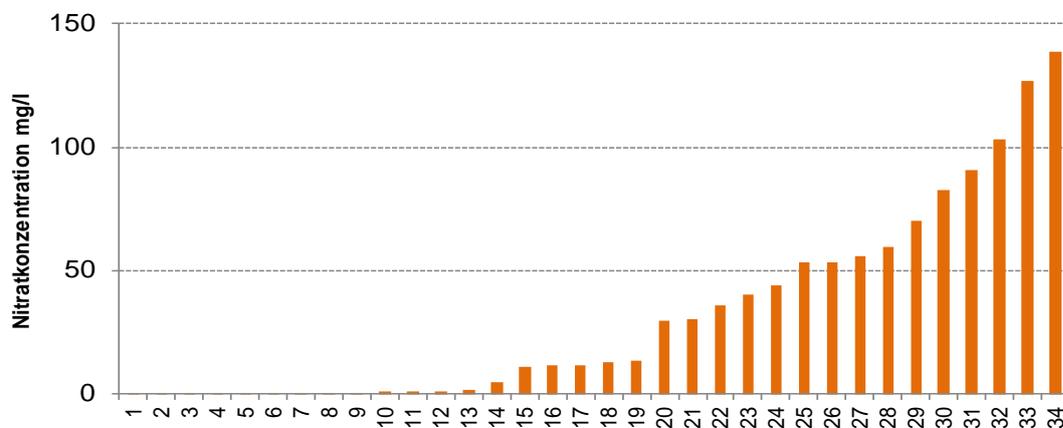


Abb. 5-13: Nitratkonzentrationen in den Grundwasser-Messstellen GWK 3 „SA-014), Mittelwerte der letzten fünf Jahre, Bezugsjahr 2016 (Messstellennamen anonymisiert, Messstellen entsprechend der Nitratkonzentrationen aufsteigend geordnet)



Für 26 von 34 Grundwassermessstellen konnte mit dem Teufe-Neubildungsverfahren eine Fließzeit ermittelt werden. Am häufigsten treten Fließzeiten unterhalb von zwei Jahren auf (Abb. 5-16). Hierbei handelt es sich nahezu ausschließlich um flach verfilterte Messstellen in Festgesteinsgrundwasserleitern, deren Filterstrecke höchsten wenige Meter tief unterhalb der Grundwasseroberfläche endet. Aufgrund der geringen durchflusswirksamen Porosität von 1 – 4 % ergeben sich trotz der geringen Neubildungsraten insgesamt niedrige Fließzeiten.

Demgegenüber führen die geringen Neubildungsraten bei Messstellen in Lockergesteinsgrundwasserleitern aufgrund der relativ höheren durchflusswirksamen Porositäten zu sehr hohen Fließzeiten. Ein Beispiel hierfür ist die Messstelle Nr. 19. Diese ist in einem grobsandig-feinkie-sigen Grundwasserleiter nahe der Grundwasseroberfläche verfiltert. Trotz der oberflächennahen Filterstellung (FOK: 5 m, FUK 5 m, Flurabstand ca. 1,5 m) liefert das Teufe-Neubildungsverhältnis aufgrund der geringen Neubildungsrate von 25 mm/a Fließzeiten zwischen 40 und 90 Jahren.

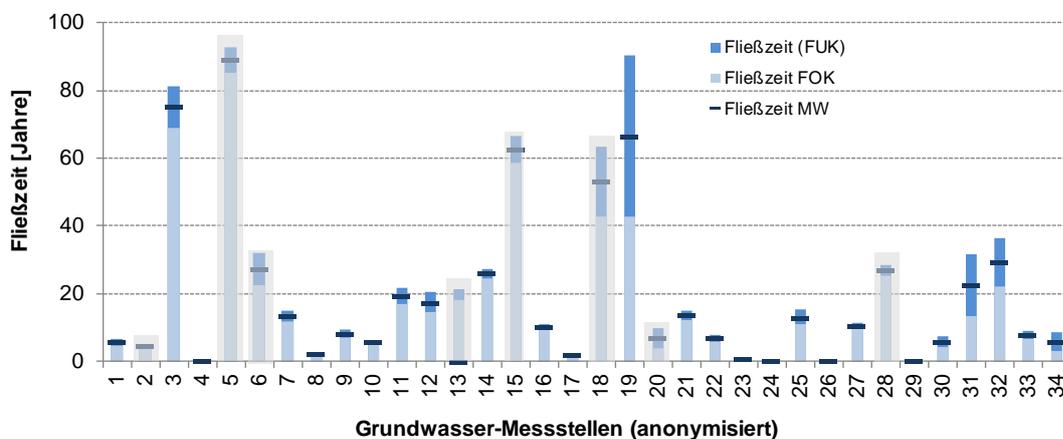


Abb. 5-14: Mit dem Teufe-Neubildungsverfahren ermittelte Fließzeiten für die Messstellen des GWK 3 „SA_014“ (für die grau hinterlegten Messstellen ist das Verfahren nicht geeignet), trotz heterogenem Aufbau wurden die Messstellen Nr. 17 und 33 aufgrund der großräumig homogenen Grundwasserneubildung im Umfeld als geeignet für die überschlägige Fließzeitermittlung mit dem Teufe-Neubildungsverfahren eingestuft

Die zweite Grundwassermessstelle (Nr. 3) mit auffallend hohen Fließzeiten von ca. 70 bis 80 Jahren ist in einem homogenen Kalkstein-Grundwasserleiter verfiltert. Hier befindet sich die Filterstrecke aber ca. 65 bis 75 m unterhalb der Grundwasseroberfläche. Dementsprechend benötigt das Grundwasser eine lange Zeit, bis es bei den geringen Neubildungsraten von ca. 25 mm/a den entsprechenden horizontalen und vertikalen Fließweg zurückgelegt hat.

Messstellen mit Fließzeiten zwischen 5 und 10 bzw. 10 bis 15 Jahren bilden die nächst häufigen Gruppen. Hierbei handelt es sich meist um Festgesteinsmessstellen mit oberflächennahen bis mitteltiefen Filterstellungen. Fließzeiten zwischen 20 und 30 Jahren sind typischerweise an Messstellen gebunden, deren Filterstellung meist einige Zehnermeter unterhalb der Grundwasseroberfläche liegt.

Im Mittel ergab das Teufe-Neubildungsverfahren für die, für das Verfahren geeigneten Messstellen, eine mittlere Fließzeit von 14,3 Jahren. Die weitaus heterogene Situation bezüglich der Lithologie der Grundwasserleiter und der damit verknüpften Filterpositionen der einzelnen



Messstellen führt zu einer größeren Spanne in den ermittelten Fließzeiten und einer entsprechend größeren Abweichung zwischen dem Mittelwert und dem Medianwert (7,9 Jahre) als in dem hinsichtlich der Anzahl der Messstellen vergleichbaren GWK 1. In diesem Grundwasserkörper liegen Mittelwert und Medianwert der Fließzeiten deutlich enger beieinander (vgl. Abb. 5-11, S.56).

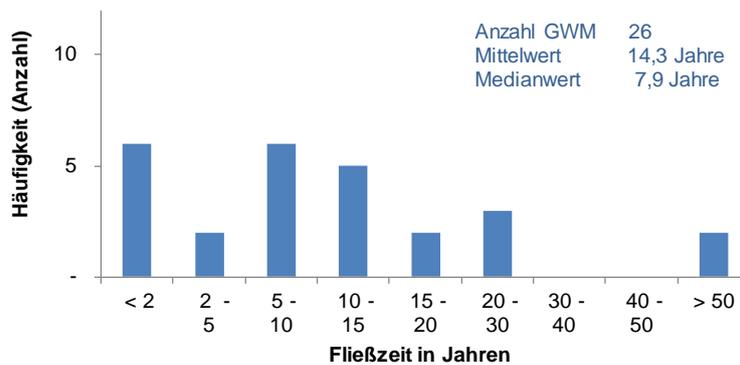


Abb. 5-15:
Häufigkeitsverteilung für die mit dem Teufe-Neubildungsverfahren ermittelten Fließzeiten für die Grundwasser-Messstellen im GWK 2 „SA-014“

5.2.5.3 Test-GWK 3 (Hessisches Ried)

Der GWK im Hessischen Ried befindet sich im nördlichen Oberrheingraben, welches durch mächtige tertiäre und quartäre Ablagerungen bis zu 3500 m geprägt wird. Insbesondere die quartären Sedimente bilden einen wichtigen Grundwasserleiter, welcher überwiegend aus kiesig-sandigen Sedimenten des Rheins und Neckars aufgebaut wird. Überlagert werden die fluviatilen Sedimente im Bereich von Bürstadt, Viernheim und Lorsch von Flugsanden. In den Talausgängen des Odenwalds haben sich zudem z.T. großflächig Schwemmfächer gebildet. Auch in diesem GWK kommt es zu einer regionalen Stockwerkstrennung durch zwei flächig ausgebildete, feinkörnige Trennhorizonte (Oberer und unterer Ton).

Der mit 20 km² im Vergleich der Testgrundwasserkörper kleinste GWK weist einen hohen Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche von 55% auf. Mit insgesamt 10 Messstellen hat der GWK 2 eine relativ hohe Messstellendichte von 1 Messstelle auf 2 km², wobei auch hier etwa die Hälfte der Messstellen im Bereich der Ackerflächen abgeteuft wurden (Tabelle 5-3). Eine Überschreitung der mittleren Nitratkonzentrationen von 50 mg/l wurde im Hessischen Ried für 3 GWM (30%) festgestellt (Abb. 5-12).

Tabelle 5-4: Flächennutzung und Grundwasser-Messstellen GWK 3

Flächennutzung	Fläche km ²	Flächenanteil	Anzahl GWM
Acker	11.1	55	5
Grünland	0.5	3	0
Wald	4	20	1
Siedlung	3.5	17	4
Summe	20.1	100	10

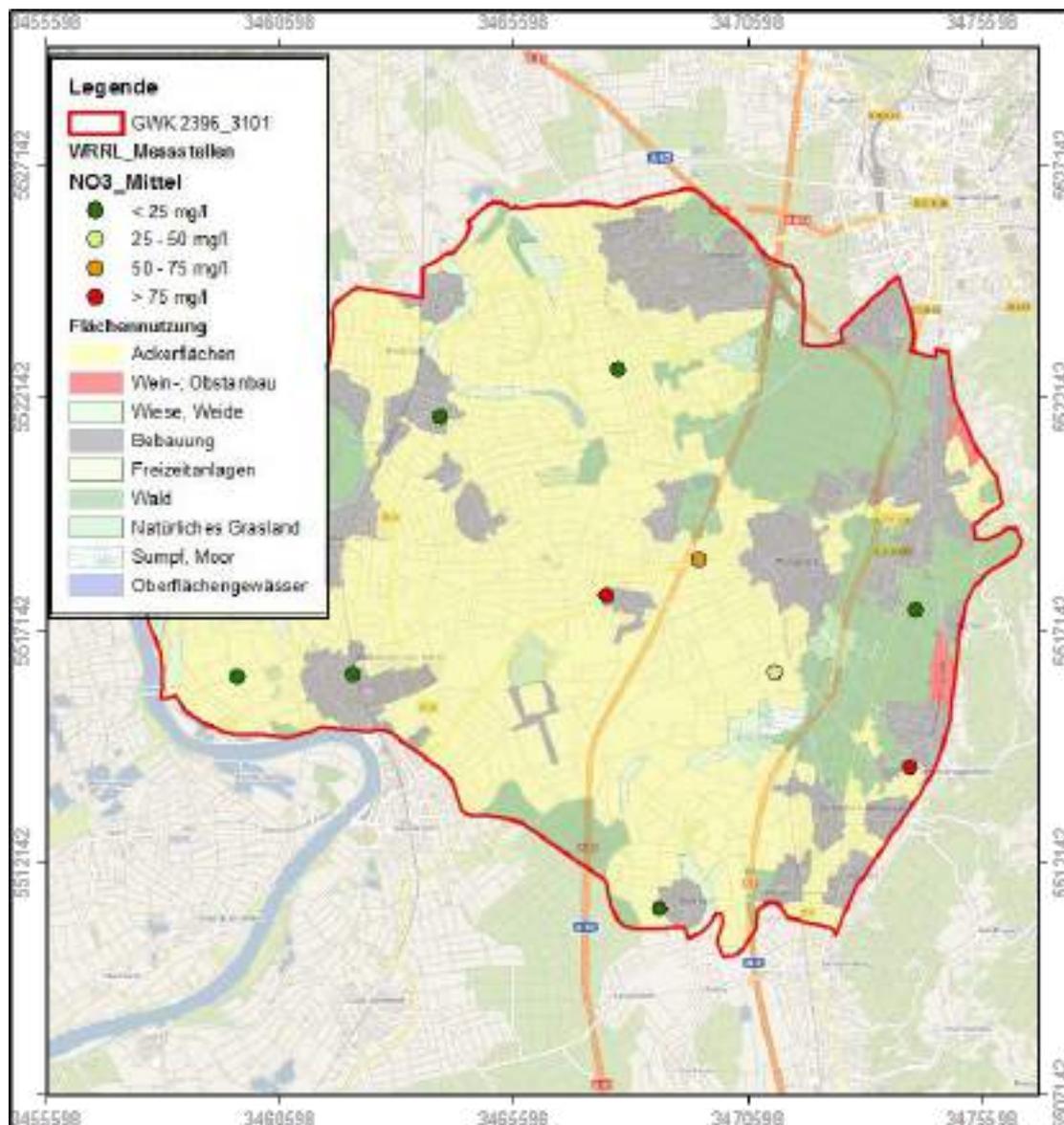


Abb. 5-16: Flächennutzung und Lage der Grundwassermessstellen im GWK 3 „Hessisches Ried“. Die Farbgebung der Messstellensymbole repräsentiert die Nitratkonzentrationen.

Entsprechend der Vorgehensweise ist eine Analyse der Verweil- und Fließzeiten prinzipiell nur für die GWM notwendig, in denen es zu einer Überschreitung der Nitratkonzentrationen gekommen ist. Im Rahmen der Testphase des Verfahrens soll aber die Anwendung auf alle GWM ausgeweitet werden. Daten zu den Grundwassermessstellen wurden von der jeweilig zuständigen Landesbehörde, dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie HLNUG für diese Untersuchung bereitgestellt.

Im Vorfeld der Fließzeitermittlung wurde eine Prüfung der Messstellen entsprechend der in Kapitel 5.2.4 aufgeführten Kriterien durchgeführt. Für den GWK 3 zeigten sich drei Messstellen aufgrund der Nähe zu einem Förderbrunnen, der Verfilterung im zweiten Grundwasserleiter bzw. der Nähe zum angrenzenden Festgesteinsgrundwasserleiter als ungeeignet für die Auswertung mit den Teufe-Neubildungsverfahren. Die Ergebnisse der Berechnungen mit dem Tool sind in der Tabelle 5-4 für die Fließzeit für den GWK 3 dargestellt.



Die berechneten mittleren Fließzeiten (arithmetisches Mittel) im GWK 3 variieren zwischen 5 und 33 Jahren. Hierbei weist die GWM 5 mit der kürzesten Fließzeit von 5 Jahren erwartungsgemäß die höchsten Nitratkonzentrationen aufweist. Dahingegen ist das Grundwasser der GWM 2 mit ca. 33 Jahren Fließzeit nitratfrei.

Tabelle 5-5: Berechnung der Fließzeit auf der Basis einer mittleren Grundwasserneubildung für den GWK 3 (GWM anonymisiert)

Messstellenkürzel	Grundwasser- messstelle	Verfahren anwendbar?	mittlere Grundwasser- neubildung mm/a		hydraulischer gradient (m/m)	Berechnete Fließstrecke (m)					
			K _z FOK (Min)	F _z FUK (Max)		arithm. Mittel	K _z FOK (Min)	F _z FUK (Max)	arithm. Mittel		
2396_3101 Hessisches Ried	1	Ja	155	155	0	8	0	8.1	14.5	12.0	
2396_3101 Hessisches Ried	2	Ja	155	155	0	8	0	31.7	33.7	32.7	
2396_3101 Hessisches Ried	3	Nein	155								
2396_3101 Hessisches Ried	4	Ja	155	155	0	8	0	1.1	14.7	7.9	
2396_3101 Hessisches Ried	5	Ja	155	155	0	8	0	2.1	7.9	5.0	
2396_3101 Hessisches Ried	6	Ja	155	155	0	8	0	7.0	14.7	10.0	
2396_3101 Hessisches Ried	7	Nein	155								
2396_3101 Hessisches Ried	8	Ja	155	155	0	8	0	13.9	17.8	15.9	
2396_3101 Hessisches Ried	9	Nein	155								
2396_3101 Hessisches Ried	10	Ja	155	155	0	8	0	7.4	13.2	10.3	

Im Hessischen Ried zeigt sich eine starke Schwankung der Grundwasserneubildung zwischen Werten von wenigen mm/a in der Rheinebene bis zu 300 mm/a am Odenwald. Eine weiterführende Analyse der Grundwasserneubildung im Anstromgebiet der Einzel-Messstellen wird daher empfohlen und soll im Folgenden beschrieben werden. Zur Ermittlung der Fließstrecke wird von einer mittleren Durchlässigkeit von $5 \cdot 10^{-4}$ m/s im GWK ausgegangen. Der hydraulische Gradient wird für jede GWM im Anstrom anhand des Grundwassergleichenplans (Daten HLNUG) entlang einer 3 km langen Bahnlinie im Anstrom der jeweiligen Messstelle ermittelt. Aufgrund der geringen Dichte der Grundwassergleichen konnte für die GWM 6 kein hydraulischer Gradient abgeleitet werden. Diese GWM entfällt somit im erweiterten Verfahren. Die Eingabedaten sowie die ermittelten Fließstrecken sind in der Tabelle 5-5 für die Messstellen aufgelistet. Die Fließstrecken wurden im folgenden Schritt graphisch ausgewertet. Dazu wurde die Fließstrecke im GIS entlang der Bahnlinie senkrecht zu den Grundwassergleichen abgegriffen. Für den so ermittelten Anstrombereich (Bereich zwischen Fließstrecke FUK und FOK) kann nun in einem zweiten Schritt die Grundwasserneubildung ausgewertet und erneut in das Berechnungstool übertragen werden. Das Ergebnis der angepassten Berechnung der Fließzeit ist in Tabelle 5-6 dargestellt. Die berechneten Fließzeiten zeigen im Vergleich zur Berechnung mit der gemittelten Grundwasserneubildung eine Abweichung von bis zu 35 %. Weiterer Näherungsschritte wurde nicht durchgeführt.

Tabelle 5-6: Ergebnisse der Berechnung für den GWK 2396_3101 Hessisches Ried – erweitertes Verfahren (GWM anonymisiert)

Messstellenkürzel	Grundwasser- messstelle	Literaturwert		mittlere Grundwasser- neubildung mm/a		hydraulischer gradient (m/m)	Berechnete Fließstrecke (m)					
		K _z FOK (Min)	F _z FUK (Max)	K _z FOK (Min)	F _z FUK (Max)		arithm. Mittel	K _z FOK (Min)	F _z FUK (Max)	arithm. Mittel		
2396_3101 Hessisches Ried	1	$5 \cdot 10^{-4}$	8.3	155	0.0037	335	540	442	9.1	14.3	12.0	
2396_3101 Hessisches Ried	2	$5 \cdot 10^{-4}$	8.3	155	0.0066	1181	1190	1135	31.7	33.7	32.7	
2396_3101 Hessisches Ried	3	$5 \cdot 10^{-4}$	8.3	155								
2396_3101 Hessisches Ried	4	$5 \cdot 10^{-4}$	8.3	155	0.0057	33	870	277	1.1	14.7	7.9	
2396_3101 Hessisches Ried	5	$5 \cdot 10^{-4}$	8.3	155	0.0038	41	857	94	2.1	7.9	5.0	
2396_3101 Hessisches Ried	6	$5 \cdot 10^{-4}$	8.3	155					7.0	14.7	10.0	
2396_3101 Hessisches Ried	7	$5 \cdot 10^{-4}$	8.3	155								
2396_3101 Hessisches Ried	8	$5 \cdot 10^{-4}$	8.3	155	0.0145	1882	1257	1218	13.9	17.8	15.9	
2396_3101 Hessisches Ried	9	$5 \cdot 10^{-4}$	8.3	155								
2396_3101 Hessisches Ried	10	$5 \cdot 10^{-4}$	8.3	155	0.0051	187	352	275	7.4	13.2	10.3	



Tabelle 5-7: Ergebnisse der Berechnung für den GWK 2396_3101 Hessisches Ried – erweitertes Verfahren mit Anpassung der Grundwasserneubildung (GWM anonymisiert)

Abgrenzen Daten und Abrechnungen	Grundwasser- messstelle	Verfahren anwendbar?	Eingangsparameter		mittlere Grundwasser- neubildung re_{GW} (a)	Rechenfaktor Gradient γ (a/y)	Ergebnisse (Fließzeit in a)					
			q-Wert m ³ /s	n _{eff}			Er-FOK (Min)	Er-TAK (Max)	mittl. Mittel	Er-FOK (Min)	Er-TAK (Max)	mittl. Mittel
2396_3101 Hessisches Ried	1	Ja	5,00E-04	0,3	100	0,0807	126	136	131	8,8	14,0	11,8
2396_3101 Hessisches Ried	2	Ja	5,00E-04	0,3	100	0,0808	889	843	916	25,6	27,3	26,4
2396_3101 Hessisches Ried	3	Nein	5,00E-04	0,3								
2396_3101 Hessisches Ried	4	Ja	5,00E-04	0,3	200	0,0807	29	384	207	8,8	19,9	8,9
2396_3101 Hessisches Ried	5	Ja	5,00E-04	0,3	120	0,0808	91	190	123	3,9	8,8	6,2
2396_3101 Hessisches Ried	6	Ja	5,00E-04	0,3	100					7,8	14,1	10,8
2396_3101 Hessisches Ried	7	Nein	5,00E-04	0,3								
2396_3101 Hessisches Ried	8	Ja	5,00E-04	0,3	104	0,08140	1226	1070	1320	10,1	20,6	16,4
2396_3101 Hessisches Ried	9	Nein	5,00E-04	0,3								
2396_3101 Hessisches Ried	10	Ja	5,00E-04	0,3	237	0,08081	129	221	160	4,8	8,8	6,7

5.2.6 Exemplarische Anwendung durch Mitglieder der LAWA-Kleingruppe „Verweilzeiten“

Über die Anwendung der oben aufgeführten Verfahren in den drei Test-GWKs hinaus, wurden die Verfahren zur Verweilzeitenermittlung sowie das Teufe-/Neubildungsverfahren auch von Mitgliedern der LAWA- Kleingruppe „Verweilzeiten“ zur Anwendung gebracht. Die verantwortlichen Landesämter -vertreten durch Hr. Neumann (LANUV NRW), Fr. Hofman (KUP i.A. LUBW), Fr. Hermsdorf (LFU_BB), Fr. Schwerdtfeger (LUNG-MV), Hr. Steinmann (LLUR), Hr. Schnepfmüller (LHW MULE Sachsen-Anhalt) - kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass die eingesetzten vereinfachten Verfahren -bei geeignetem Messnetz und Messstellenausbau- für die untersuchten GWK einen guten Überblick über die zu erwartenden Reaktionszeiten im oberen Grundwasserkörper ermöglicht.

Schleswig-Holstein (GWK Ei 14)

In Schleswig-Holstein wurden die Verfahren im oberflächennahen Haupt-Grundwasserkörper (GWK) Ei14 mit 20 Grundwassermessstellen angewendet. Als geeignet für die Auswertung haben sich entsprechend des Verfahrens 16 Grundwassermessstellen herausgestellt. Als ein Ergebnis der Ausarbeitung zeigte sich, dass die Verweilzeiten im Boden und der Deckschicht im ausgewählten GWK eine untergeordnete Rolle spielen. Bei einer Einzelfallbetrachtung wurden ausgewählte Eingangsparameter variiert. So zeigen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Durchlässigkeit und dem hydraulischen Gradienten die größten Auswirkungen auf die Berechnung der Fließstrecke. Die effektive Porosität weist zwar einen relativ geringeren Einfluss auf das Ergebnis auf, unterliegt jedoch aufgrund der Datenlage einer Unschärfe. Dahingegen sind die Grundwasserneubildung und Sickerwasserraten gut dargelegt. Für eine korrekte Schätzung des Anstrombereichs ist ein iterativer Ansatz zu verfolgen, bei dem schrittweise die Eingangsdaten angepasst werden. Hr. Steinmann weist darauf hin, dass bei der Berechnung des Anstrombereichs aufgrund der Unschärfe der Eingangsparameter eine Einzelfallprüfung erforderlich ist. Generell wurde das Verfahren als für in SH anwendbar beurteilt.

Brandenburg (GWK Nauen)

Im Rahmen des Projektes wurde der GWK Nauen mit 5 Grundwassermessstellen bearbeitet. Fließ- und Verweilzeiten wurden für die Messstellen ermittelt, wobei insgesamt kurze Fließzeiten (2- 12 Jahre) aber teils sehr hohe Verweilzeiten (> 30 Jahre) ermittelt wurden. Ergänzend wurde die Verweildauer anhand unterschiedlicher Verfahren (LAWA-Methode, Hölting und nach DIN 19732) berechnet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Die so ermittelte Verweildauer unterscheidet sich maßgeblich voneinander, wobei jeweils die geringste Verweildauer über das Hölting-Verfahren berechnet wurde. Nach DIN 19732 wird eine Zeitspanne ermittelt, welche in 2 Fällen mit den Berechnungen nach LAWA übereinstimmen. Hierbei ist aber zu beachten, dass das Hölting-Verfahren für Festgesteine und die DIN 19732 für Lockergesteine vorgesehen ist.



Mecklenburg-Vorpommern

An insgesamt 18 Grundwassermessstellen wurde eine vergleichende Bewertung des LAWA-Verfahrens mit Helium-Tritium-Altersdatierungen durchgeführt. Im direkten Vergleich zur Altersdatierung über Tritium-Helium zeigt sich für die Mehrzahl der GWM eine gute Übereinstimmung. Lediglich in 6 GWM wird eine größere Abweichung von bis zu 30 Jahren ermittelt. Eine Plausibilitätsprüfung von Fließ- und Verweilzeiten anhand von Indikatorsubstanzen wie aktuell eingesetzten PSM oder Altersdatierungen wird empfohlen. Eine Einzelfallbetrachtung wurde für die GWM Trent durchgeführt, bei der eine Fließzeit von ca. 6 Jahren mittels Tritium-Helium Methode bestimmt wurde. Die berechnete Grundwasserneubildung variiert in Abhängigkeit von der Berücksichtigung des Dränabflusses zwischen 120 mm/a (ohne) und 42 mm/a (mit Dränabfluss). Bei der Berechnung der Fließzeit ergeben sich dementsprechend Werte von 9,6 Jahren (ohne) und bis zu 27,1 Jahren (mit Dränabfluss). Auch für die Verweilzeit werden ausgehend von der Grundwasserneubildung Werte von 8,2 Jahren (ohne) und 23 Jahren (mit Dränabfluss) bestimmt. Die Reaktionszeit variiert damit zwischen 17,7 und 50,1 Jahren.

Nordrhein-Westfalen (GWK DENW_286_01)

In NRW erfolgte die exemplarische Anwendung für den GWK DENW_286_01 in der Niederrheinischen Bucht. Im oberen Grundwasserleiter sind 15 Grundwassermessstellen des Messprogramms 50 (landeseigene GWM) verfiltert. In 9 dieser Grundwassermessstellen wurden Nitratkonzentrationen größer 50 mg/l festgestellt. Bei der Berechnung zeigen sich v.a. für die GWM mit einer hohen Nitratbelastung relativ geringe Fließzeiten kleiner 5 Jahren (FUK). Eine Einzelfallbetrachtung wurde für die Grundwassermessstellen Pfalzdorf durchgeführt. Das ermittelte Zustromgebiet befindet sich unter landwirtschaftlicher Nutzfläche und erklärt damit gut die hohen Nitratkonzentrationen im Grundwasser der GWM. Die messstellenbezogene Betrachtung wird von NRW als pragmatische und einfach handzuhabende Methode eingeschätzt, die – bei geeignetem Messnetz und Messstellenausbau - einen guten Überblick über die zu erwartenden Reaktionszeiten im oberen Grundwasserkörper ermöglicht.

Sachsen-Anhalt (GWK SAL_GW022)

In Sachsen-Anhalt erfolgte die Anwendung des Verfahrens für den GWK SAL_GW022. Lediglich 9 der insgesamt 20 GWM eignen sich für die Auswertung im Rahmen des LAWA Projektes. Hauptausschlusskriterium war die Ausbildung gespannter Verhältnisse durch die Überdeckung des Grundwasserleiters durch bindige Sedimente. Im Rahmen der Fließzeitberechnung wurde eine Variantenunterscheidung hinsichtlich der verwendeten Wasserhaushaltsgrößen durchgeführt. Hierzu wurde einmal die Sickerwasserhöhe aus GROWA-Modellierungen verwendet (Kuhr et al., 2013) und einmal Grundwasserneubildungsergebnisse aus einer ArcEMO-Modellierung. Beide Ergebnisse unterscheiden sich nur gering voneinander. Die ermittelten Fließzeiten von 9-16 Jahren (Median) sind aufgrund der geringen Sickerwassermengen und Grundwasserneubildung als plausibel einzuschätzen. Aufgrund der unzureichenden Datenlage hinsichtlich der Bodenkennwerte (FK/nFK), sowie der Ausbildung und Verbreitung von Grundwasserstauern ist die Ermittlung der Verweilzeit jedoch schwierig. Nach den zur Verfügung stehenden Daten sind für den GWK SAL_GW022 überschlägige Verweilzeiten im Boden und der Grundwasserdeckschichten von rund 30 Jahren zu erwarten. Bei komplexen Strömungsbedingungen v.a. unter gespannten Bedingungen, sollte auf eine Strömungsmodellierung zur Beschreibung des gesamten Grundwasserkörpers nicht verzichtet werden. Eine generelle bzw. ausschließliche Anwendung des Teufe-Neubildungsverfahrens auf alle Grundwasserkörper Sachsen-Anhalts wird als zu aufwendig angesehen.

Baden-Württemberg (GWK 16.8 Markgräfler Land)

Für den GWK 16.8 (Markgräfler Land) zeigte sich, dass das Verfahren für Messstellen in Bereichen mit homogenen Lockergesteins-Grundwasserleitern gut einsetzbar ist und im Vergleich mit Strömungsmodellen und Tritium-Altersdatierungen weitgehend plausible Werte bezüglich der mittleren Fließzeiten liefert. Tendenziell deutet sich gegenüber der Strömungsmodellierung eine leichte Unterschätzung der Fließzeiten an, während die berechnete Fließstrecke bis zum Ort der Neubildung oft zu lang erscheint. Bei komplexen hydrogeologischen Verhältnissen ist eine Weiterentwicklung und Modifikation des Verfahrens erforderlich.



Tabelle 5-8: Auflistung der Datengrundlage für die Ermittlung der mittlere Aufenthaltszeit

Parameter	flächenhafte Datengrundlage	punktbezogene Datengrundlagen
Ausweisung eines Einzugsgebietes	Strömungsmodellierung	
Mittlere Wasserentnahme oder Quellschüttung		Betreiber der Anlage / Messwerte
Nutzbarer Hohlraumanteil	Modellergebnis (Lockergestein); Literaturwerte (Festgestein)	Vorzugsweise Lokalinformation Bohrprofile, Sedimentanalysen
grundwassererfüllte Mächtigkeit	Flurabstandsdaten oder Grundwassergleichenplan (HÜK 200, HK 50); Geologisches Modell	Grundwasserstandsdaten, Bohrprofilaufnahmen
Grundwasserneubildung	Großräumige Modelle (GROWA);	Lysimeterdaten, Kleinräumige Berechnung der Grundwasserneubildung

5.3.4 Exemplarische Anwendung – Test GWK 3 (SA-014)

Nur für den GWK 3 (SA-14) werden auch Beschaffenheitsdaten aus Quelfassungen bei der Bewertung des chemischen Zustands verwendet. In den beiden anderen Testgrundwasserkörpern werden ausschließlich Grundwassermessstellen berücksichtigt.

In den meisten Fällen handelt es sich im GWK 3 um Schichtquellen bzw. um Stau- und Überlaufquellen mit natürlichen Grundwasseraustritten. Lediglich in einem Fall handelt es sich um einen ehemaligen Heilwasser-Brunnen. Für alle Quellen konnten aus den vom Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt zur Verfügung gestellten Quellen-Steckbriefen sowie aus hydrogeologischen Gutachten Angaben zu den Quellschüttungen und zu den quellspeisenden Horizonten entnommen werden. Für den ehemaligen Brunnen stehen keine Angaben zur Verfügung, so dass eine Berechnung der mittleren Aufenthaltszeit nicht möglich ist. Eine kurze Charakterisierung der Quellen, der Schüttungsraten und der Ergebnisse der Aufenthaltsberechnung sowie ergänzende Anmerkungen zur Güte und Aussagekraft der Berechnung sind in Tabelle 5-9 zusammengestellt.

Für die Berechnung der mittleren Aufenthaltszeit der Quellwässer wurde die Mächtigkeit der quellspeisenden Horizonte angesetzt, sofern diese auch den hydraulisch angebotenen obersten Grundwasserleiter bildeten. Hierbei geht aber nur die grundwassererfüllte Mächtigkeit ein. Die mittlere Mächtigkeit der Grundwasserdeckschichten in den Einzugsgebieten wurde aus den Daten des Projektpartners FZJ zur Höhenlage der Grundwasseroberfläche und der Geländemorphologie überschlägig ermittelt.



Tabelle 5-9: Charakterisierung der Quellen im Messnetz des GWK 3 sowie berechnete mittlere Verweilzeiten der Quellwässer

Quelle Nr.	Quellspeisender Horizont und Quelltyp	Schüttung m ³ /Jahr	Mittlere Aufenthaltszeit	Anmerkungen
1	Mittlerer Buntsandstein in mittelsteiler Lagerung, Schichtquelle	63.000	24 Jahre	Sehr Unsicher durch störungsbedingte Wasserzutritte, unsicheren Basisabfluss und komplexe hydrogeologische Situation
2	Unterer Muschelkalk in weitgehend horizontaler Lagerung, Schicht- bzw. Überlaufquelle	2,5 Mio.	21 Jahre	Unsicher durch die morphologisch bedingte Unsicherheit in der Mächtigkeit der ungesättigten Zone
3	Mittlere Buntsandstein, Brunnen	k.A.	-	Nicht berechenbar aufgrund fehlender Angaben zur Größe des Einzugsgebiets und der Schüttung-/Förderrate
4	Unterer Muschelkalk und Buntsandstein teilweise unter Quartär- und Tertiärüberdeckung; Tertiärsande als quellspeisender Horizont; Schicht/Stauquelle	70.000	-	Nicht berechenbar aufgrund des komplexen geologischen Aufbaus und der nicht bekannten Mächtigkeit der tertiären Sande
5	Unterer Muschelkalk, Schicht- bzw. Verengungsquelle	125.000	11,5	Etwas unsicher aufgrund der geschätzten Mächtigkeit der ungesättigten Zone und des hydrogeologischen Aufbaus
6	Quartärbedeckung oberhalb steiler stehender Festgesteine des Oberen Buntsandstein, Schichtquelle	1.900	-	Nicht berechenbar aufgrund komplexer hydrogeologischer Situation
7	Mittlerer Buntsandstein in mittelsteiler Lagerung, Schichtquelle	50.500	20 Jahre	Sehr Unsicher aufgrund steil stehender Lagerung und unsicherer Tiefenabgrenzung des entwässernden Grundwasserleiters
8	Zechstein und unterer Buntsandstein in steiler Lagerung, Artesischer Austritt von Tiefenwasser aus Altbohrung	2.500	-	Nicht berechenbar aufgrund fehlender Angaben zum Einzugsgebiet und komplexer Geologie
9	Unterer Muschelkalk in weitgehend horizontaler Lagerung, Schicht- bzw. Überlaufquelle	142.000	(90 Jahre)	Sehr unsicher, Größe des Einzugsgebiets nicht plausibel ⁴

⁴ Die Quellen Q2 und Q9 weisen ein gemeinsames Einzugsgebiet auf, das Teileinzugsgebiet Q9 umfasst ca. 20 % des Gesamteinzugsgebietes, der Schüttungsanteil an der Gesamtschüttung liegt bei der Q9 aber nur bei 5 %.



Quellspeisende Grundwasserleiter sind Buntsandsteinserien und der untere Muschelkalk.

Der untere Muschelkalk ist fast überall in Sachsen-Anhalt in Wellenkalk-Fazies ausgebildet und weist eine Mächtigkeit von ca. 100 m auf (Radzinski, 2008; Kozur & Bachmann 2004). Aufgrund der meist flachen Lagerung im Umfeld der Quellen, der bekannten Schichtmächtigkeiten und der zumindest näherungsweise bekannten Mächtigkeit der grundwassererfüllten Mächtigkeit konnten in allen Fällen mittlere Aufenthaltszeiten ermittelt werden. In zwei Fällen sind die Ergebnisse mit Aufenthaltszeiten von 11 bzw. 21 Jahren plausibel und stehen nicht im Widerspruch zu den aktuellen Nitratkonzentrationen von einigen 10er Milligramm je Liter.

Bei den quellführenden Buntsandsteinschichten handelt es sich vor allem die Serien des mittleren Buntsandsteins. Gegenüber dem stärker durch Tonsiltsteine geprägten unteren Buntsandstein ist mit mittlere Buntsandstein durch eine zyklische Abfolge mit mächtigen Sandsteinbänken gekennzeichnet. Im Raum Halle – Weißenfels weist der mittlere Buntsandstein Gesamtmächtigkeiten zwischen 200 und 300 m auf (Radzinski, 2008). Eine Abschätzung der Verweilzeiten in den Buntsandsteinquellen des Messnetzes war nur für zwei von vier Fällen möglich. Durch die komplexe, hydrogeologische Situation und die unsichere Tiefenabgrenzung des entwässernden Grundwasserleiters sind angegebene Werte als unsicher einzustufen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Ergebnisse für die an Festgesteine gebundenen Quellen in dem Testgrundwasserkörper insgesamt als unsicher eingestuft werden müssen. Der wichtigste Grund liegt vor allem in der Unsicherheit bei der Erfassung der grundwassererfüllten Mächtigkeit und der Größe des Einzugsgebietes. Das Verfahren ist nur für hydrogeologisch gut beschriebene Quellen geeignet. Im Allgemeinen sollte für Quellen in Gebieten mit mesozoischen oder paläozoischen Kluftgrundwasserleitern eine Altersdatierung eingesetzt werden. Für eine überschlägige Bestimmung der mittleren Aufenthaltszeiten von Rohwässern ist das Verfahren geeignet, sofern Einzugsgebiete und mittlere grundwassererfüllte Mächtigkeiten bekannt sind. Je komplexer der hydrogeologische Aufbau ist, desto unsicher ist das Verfahren.

5.4 Grundwasserströmungsmodellierung

5.4.1 Grundlagen

Zur Simulation komplizierter Grundwasserströmungsbedingungen werden zunehmend numerische Modelle genutzt. Die Entscheidung ob die Berechnung der Fließzeit mit einem Strömungsmodell sinnvoll ist, welchen Umfang die Modellierung einnehmen soll und welche Software dazu genutzt werden soll, ist jedoch nicht trivial (Merkblatt ALEX Nr.14) und setzt vertiefte Kenntnisse im Umgang mit Grundwasserströmungsmodellen voraus (Expertenwissen).

Derzeit steht eine große Auswahl an kommerzieller und „open source“ Software für die Erstellung von Grundwasserströmungsmodellen zur Verfügung. Eine Auswahl von Programmen, welche den reaktiven Stofftransport einschließen, wurde in den Publikationen von Steefel et al. 2015 zusammengestellt. Es ist anzumerken, dass aufgrund der andauernden Weiterentwicklung der Software solche Auflistungen in der Literatur lediglich eine Momentaufnahme darstellen können. Bei der Wahl der Software ist daher stets zu prüfen, ob der jeweilig aktuelle Lösungsansatz geeignet und nutzbar für die Fragestellung ist. In diesem Zusammenhang wurde ein Auswahlprotokoll entwickelt, welches die wichtigsten Kriterien zusammenfasst (erweitert und modifiziert nach Kumar 2012):



Phase I: Ist der Einsatz eines Grundwasserströmungsmodells sinnvoll?

- (1) Erfordert die Komplexität der Systembedingungen und/oder Fragestellung die Nutzung eines Grundwasserströmungsmodells?
- (2) Liegt eine ausreichend gute Datengrundlage vor?
- (3) Gibt es alternative Lösungsansätze? Welche Einschränkungen weisen diese Lösungsansätze auch im Hinblick auf die zu erwartenden Ergebnisse auf?

Phase II: Ist die Modellierungssoftware geeignet?

- (1) Können die Hauptströmungs- und ggf. Transportmechanismen mit der Software umgesetzt werden?
- (2) Welche Vereinfachungen der im natürlichen System ablaufenden Prozesse sind im Modell erforderlich und inwiefern beeinflussen diese die Modellergebnisse?
- (3) Wurde die Software für ähnliche Fragestellungen bereits getestet?

Phase III: Ist die Modellierungssoftware nutzbar?

- (1) Ist die Modellierungssoftware frei erhältlich? Welche Kosten müssen beim Erwerb kommerzieller Programme eingeplant werden?
- (2) Welcher Aufwand ist für die Einarbeitung in das Programm einzuplanen?
- (3) Wird durch den Hersteller oder die Nutzergemeinschaft ein Support angeboten? (Wie ist dieser organisiert? Werden Tutorials angeboten?) Gibt es Begleitmaterial (User Manual) und wie umfangreich ist dieses?
- (4) Besteht eine Qualitätskontrolle der Software durch den Hersteller oder die Nutzergemeinschaft?
- (5) Wie wird der Datentransfer organisiert (Import- und Exportoptionen, Schnittstellen zu anderen Programmen)?

In der Literatur wird darauf hingewiesen, dass die mathematische Exaktheit einer numerischen Lösung häufig eine Genauigkeit vortäuschen kann, mit der die Natur im Modell nicht abgebildet werden kann. Mögliche Gründe hierfür können eine unzureichende Datengrundlage, das Auftreten systematischer Fehler bei der Überführung von Daten ins Modell oder schlicht die Wahl eines falschen Modellansatzes sein. Es ist daher wichtig, dass die Durchführung von Simulationsprojekten von der Wahl der Software bis zur Bewertung der Modellergebnisse von Fachpersonal durchgeführt bzw. begleitet wird, sowie ein hohes Maß an Transparenz aufweist. Arbeitshilfen zur Anwendbarkeit des Verfahrens, die prinzipiellen Vorgehensweise beim Aufbau eines Grundwasserströmungsmodells und die geforderte Datengrundlage sind den in Tabelle 5-10 aufgelisteten Arbeitsblättern und Fachliteratur zu entnehmen. Je nach Aufgabenstellung und gewählter Software kann die Berücksichtigung weiterführender Literatur (Bsp. User Manual) sinnvoll sein. Aufgrund der Breite der Thematik wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet.

Tabelle 5-10: Weiterführende Literatur Grundwasserströmungsmodellierung

Arbeitsblätter:

- Merkblatt ALEX Nr. 14 (2002), Kapitel 7: Simulation von Grundwasserströmungs- und Transportprozessen (Einschließlich der ungesättigten Bodenzone)
- DVGW W107 Arbeitsblatt 02/2016: Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodele in Wassergewinnungen
- FH-DGG (2002): Hydrogeologische Modelle. Ein Leitfaden mit Fallbeispielen.- Heft 24



- LANUV Nr. 12: Hinweise zur Erstellung und Beurteilung von Grundwassermodellen im Altlastenbereich
- Waterlines Report Series No. 82
- Australian groundwater modelling guidelines.- National Water Commission, Canberra.

Fachliteratur:

- Schäfer, I. W. (2016). Modellierung der Grundwasserströmung.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.
- Holzbecher, E. (2013). *Modellierung dynamischer Prozesse in der Hydrologie: Grundwasser und ungesättigte Zone*. Springer-Verlag.
- Kinzelbach, W., & Rausch, R. (1995). Grundwassermodellierung.

Programm Manuals (nicht vollständig)

- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process* (pp. 6-A16). Reston: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Diersch, H. J. G. (2013). *FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*. Springer Science & Business Media.

5.4.2 Datengrundlagen

Je nach Aufgabenstellung, integrierter Prozesse aber auch genutzte Software können der Aufwand und die geforderte Datengrundlage für die Entwicklung eines Strömungsmodells stark variieren. In der folgenden Tabelle 5-11 ist für ein einfaches Strömungsmodell (statisch, ohne Berechnung der Grundwasserneubildung und des Oberflächenabflusses) die prinzipiellen Datengrundlage aufgelistet (ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

Tabelle 5-11: Datengrundlage für die Erstellung eines einfachen Strömungsmodells

Parameter	flächenhafte Datengrundlage	punktbezogene Datengrundlage
Wasserbilanzanteile		
Grundwasserneubildung	Übernahme aus Großmodellen (z.B. GROWA)	Lysimeterdaten, Kleinräumige Berechnung der Grundwasserneubildung
Infiltration/Exfiltration von Oberflächengewässern		Pegelstände
Mittlere Wasserentnahme oder Quellschüttung		Betreiber der Anlage
Modellrandbedingungen: Zustrom über Modellrand oder Lage Wasserscheide	Grundwassergleichenplan (Festpotential oder Volumenstrom)	
Grundwasserleiter		



Parameter	flächenhafte Datengrundlage	punktbezogene Datengrundlage
Topografie	Digitale Geländeoberfläche DGHM	
Grundwasserleitermächtigkeit und Lage hydraulisch wirksamer Trennschichten	Geologische Karte Geologisches Modell (3D)	Bohrprofilaufnahmen
Sedimentdurchlässigkeiten	Geologische Karten/Modell HÜK 200	Pumpversuch, Sedimentanalysen Durchlässigkeiten im Flussbett
Kalibration		
Flurabstand/Grundwasserstände	Repräsentativer Grundwassergleichenplan (HÜK 200/50)	Grundwassermessstellen (definierter Zeitraum)

5.4.3 Exemplarische Anwendung GWK 1

Für den Grundwasserkörper 1 wurde für 11 Grundwassermessstellen die mit dem Teufe-Neubildungsverfahren ermittelten Fließzeiten mit den Ergebnissen einer Grundwasserströmungsmodellierung verglichen. Ein Teil des Grundwasserkörpers 1 „Örtze-links“ wird von einem 3D-Grundwasserströmungsmodell abgedeckt, das - außerhalb dieses Projektes - von CAH aufgebaut und stationär kalibriert wurde. Es wurde vom LBEG als zuständiger Aufsichtsbehörde akzeptiert und von den Stadtwerken Celle für die Verwendung in diesem Projekt freigegeben. Die Berechnung der Fließzeiten und der Neubildungsgebiete erfolgte über eine inverse Bahnlinienberechnung von den Filterober- und unterkanten der Grundwassermessstellen.

In Abb. 5-18 sind - für die einzelnen Grundwassermessstellen - die mit dem Teufe-Neubildungsverfahren und mit dem Strömungsmodell berechneten Fließzeiten gegenüber gestellt. Gleichzeitig sind auch die Abweichungen zwischen beiden Verfahren dargestellt.

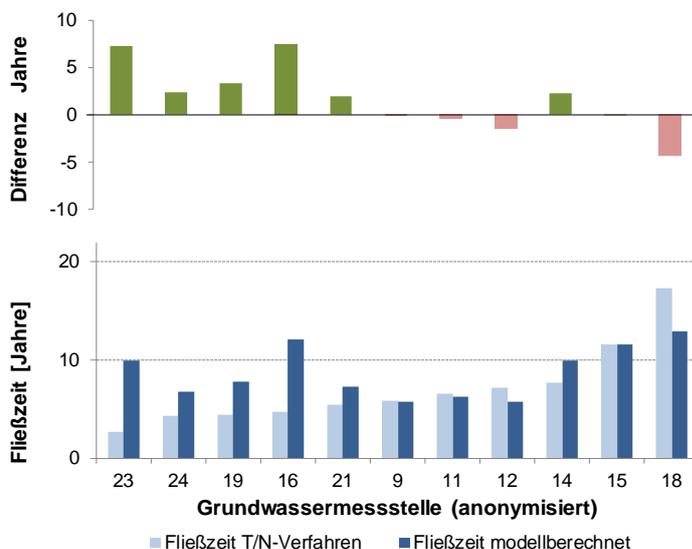


Abb. 5-18:
 Vergleich der mit dem Teufe-Neubildungsverfahren und mit einem Grundwasserströmungsmodell berechneten Fließzeiten für 11 Grundwassermessstellen im GWK 1



In über der Hälfte der Messstellen zeigen sich praktisch keine Unterschiede in den ermittelten Fließzeiten. Die Modellergebnisse stützen die mit dem Teufe-Neubildungsverfahren auf vergleichsweise Art ermittelten Fließzeiten. In einzelnen Messstellen treten aber auch größere Abweichungen auf. So sind beispielsweise in der Messstelle Nr. 23 die modellberechneten Fließzeiten dreimal länger als die mit dem Teufe-Neubildungsverfahren abgeschätzten Zeiten. Ursächlich hierfür sind Unterschiede in den Grundwasserständen. Gegenüber der für das Teufe-Neubildungsverfahren verwendeten HÜK 20 weist das Grundwassermodell ca. 2 m höhere Grundwasserstände auf. Damit ergeben sich bei praktisch gleichen Grundwasserneubildungsraten entsprechend längere Fließzeiten, bis das Grundwasser die Filterpositionen der Messstellen im Modell erreicht.

Bei homogenem Untergrundaufbau zeigen beide Verfahren vergleichbare Ergebnisse bezüglich der Position der Neubildungsgebiete und Anstrombereiche sowie der ermittelten Fließzeiten. Abweichungen sind in erster Linie auf lokale Unterschiede zurückzuführen. Sie treten insbesondere bei einem heterogenen Untergrundaufbau und bei unterschiedlichen Randbedingungen auf. Anhand der Modellrechnungen können die mit dem Teufe-Neubildungsverfahren abgeschätzten Fließzeiten für oberflächennah verfilterte Messstellen in einem vergleichsweise homogen aufgebauten Grundwasserleiter betätigt werden.

5.4.4 Exemplarische Anwendung GWK 3

Im Rahmen des Forschungsprojektes zur „Quantifizierung des Nitratabbaus in den Grundwasserkörpern des Hessischen Rieds und Lokalisierung von Risikogebieten“ (HLNUG 2014) wurde mit dem Strömungsmodell (SPRING, BGS Umwelt) für ausgewählte Messstellen in den GWK des Hessischen Rieds (2396_3101 bis 2398_3101) die Fließzeit sowie das Zustromgebiet (Fließstrecke) berechnet. Unabhängig davon erfolgte eine Berechnung der Fließzeiten und Fließstrecken nach dem Teufe-Neubildungsverfahren über zwei Iterationsschritte.

Modellergebnisse und berechnete Werte nach dem Teufen-Neubildungsverfahren werden in Tabelle 5-12 verglichen. Beide Werte stimmen für die einzelnen Messstellen sehr gut miteinander überein. Lediglich für die Messstellen 5 und 6 wird mit dem Tiefe-Neubildungsverfahren eine höhere Fließzeit berechnet. Grund hierfür ist die Randlage dieser Messstellen zum Odenwaldrand mit sehr variablem hydraulischen Gradienten und Durchlässigkeiten im Schwemmfächer, die vom Strömungsmodell aber nicht im Teufe-Neubildungsverfahren berücksichtigt werden.

Tabelle 5-12: Vergleich der Fließzeit- und Fließstreckenberechnung für den GWK 3 mit dem Strömungsmodell (SM) und Teufe-Neubildungsverfahren T-N (GWM anonymisiert).

Mess- stelle	GWO [m uGOK]	FOK [m uGOK]	FUK [m uGOK]	SM Fließzeit [a]	T-N Fließzeit [a]	SM Fließstrecke [m]	T-N Fließstrecke [m]
1	2,3	7	10	8 - 19	9 - 14	300 - 700	320 - 524
2	1,8	18,2	19,2	30 - 35	32 - 34	800 - 950	1094 - 1161
3	2,3	8,7	13,7	8 - 18	12 - 22	500 - 1400	540 - 962
4	3,7	5	20	1 - 30	3 - 32	50 - 1800	57 - 716
5	2,7	6	9	< 5	6 - 12	300 - 600	216 - 412
6	1,8	7	9	4 - 6	10 - 14	200 - 400	321 - 445



5.5 Tracermethoden

Tracer bilden ein wichtiges Hilfsmittel bei der Analyse des Grundwasseralters. Prinzipiell ist zwischen Umwelttracern und künstlichen Tracern zu unterscheiden. Je nach Tracergruppen unterscheidet sich darüber hinaus der Versuchsaufbau und damit die Anwendungsfälle der jeweiligen Tracergruppe. So hängt die Wahl des Tracers auch immer von der jeweiligen Fragestellung und den gegebenen Systembedingungen sowie bereits vorhandenen Informationen zum System ab. Die Planung, Durchführung und Auswertung von Tracerversuchen bedarf damit vertieftes Fachwissen und sollte immer von Fachpersonal ausgeführt oder begleitet werden (Expertenwissen).

An dieser Stelle soll daher lediglich die Spannweite der Nutzungen von Tracermethoden bezogen auf die Ermittlung der Verweil- und Fließzeit aufgezeigt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Methode ist den in der Tabelle 5-13 aufgeführten Arbeitsblättern und Fachliteratur zu entnehmen.

Umwelttracer können natürliche oder zivilisatorische Verbindungen und Isotopen sein. In Abhängigkeit vom betrachteten Umwelttracer erfolgt eine Abschätzung des Grundwasseralters auf Basis (siehe auch Abb. 5-18):

- Eines einmaligen und datierten Events, bei dem der Umwelttracer in das Grundwassersystem eingetragen worden ist. Ein wichtiges Beispiel hierfür stellt superschwerer Wasserstoff dar (Tritium ^3H).
Wasser enthält das radioaktive Isotop ^3H (Tritium) mit einer Halbwertszeit von 12,36 Jahre. Die natürliche Tritiumkonzentration im Oberflächenwasser, welche beständig in der Atmosphäre durch die Einwirkung von kosmischer Strahlung erzeugt wird, beträgt ca. 5 TU (Tritium Unit). Rezent in der Atmosphäre vorhandenes Tritium ist jedoch zum größten Teil im Rahmen der 1953 durchgeführten Kernwaffenversuche entstanden und gelangte mit den Niederschlägen in den Untergrund. Im Grundwasser sinkt der Tritiumgehalt aufgrund des radioaktiven Zerfalls weiter und ermöglicht somit die Ableitung des Alters von Grundwässern älter als 60 Jahre. Kombiniert mit Tritium werden sogenannte „Jungwassertracer“ Sauerstoff-18 und Deuterium ^2H eingesetzt, um mögliche Einflüsse durch Temperatur- und Bildungsbedingungen abzuschätzen. Es ist zu beachten, dass der Einfluss der Kernwaffentests zunehmend schwächer wird und damit u.U. das Signal nicht eindeutig zugeordnet werden kann.
- Eines Produktions- und Verwendungszeitraums anthropogener Verbindungen. Häufig verwendete Umwelttracer sind hierbei Schwefelhexafluorid (SF_6) und Fluorchlorokohlenwasserstoffe (FCKW). Schwefelhexafluorid ist ein anthropogenes, sehr stabiles Spurengas. Über den Kontakt mit der Atmosphäre gelangt SF_6 entsprechend seiner Löslichkeit in die Hydrosphäre. Durch das stetige Anwachsen des atmosphärischen Mischungsverhältnisses von SF_6 zeichnet sich im Grundwasser eine Zeitinformation ab. Diese Methode eignet sich damit für junge Grundwässer jünger als 30 Jahre. Fluorchlorokohlenwasserstoffe oder Freone, und hier insbesondere F-12 (CCl_2F_2) und F-11 (CCl_3F), sind anthropogene Spurengase, die sich in der Umwelt nahezu konservativ verhalten. Analog zur SF_6 -Methode ermöglicht der Anstieg des atmosphärischen Gehaltes an FCKWs von ca. 1950 bis in die 1990er Jahre die Datierung jüngerer Grundwässer. In rezenten Wässern < 10 Jahre ist diese Methode aufgrund des Produktionsstopps (Montreal-Abkommen) von FCKWs wenig geeignet.
- Des radioaktiven Zerfalls eines Elementes. So kombiniert diese Variante die Messung von beispielsweise ^3H und seines Zerfallsproduktes Helium ^3He und ermöglicht über die Ermittlung des Zerfalls eine präzise Datierung von Grundwässern im Bereich von Monaten bis zu 40 Jahren.

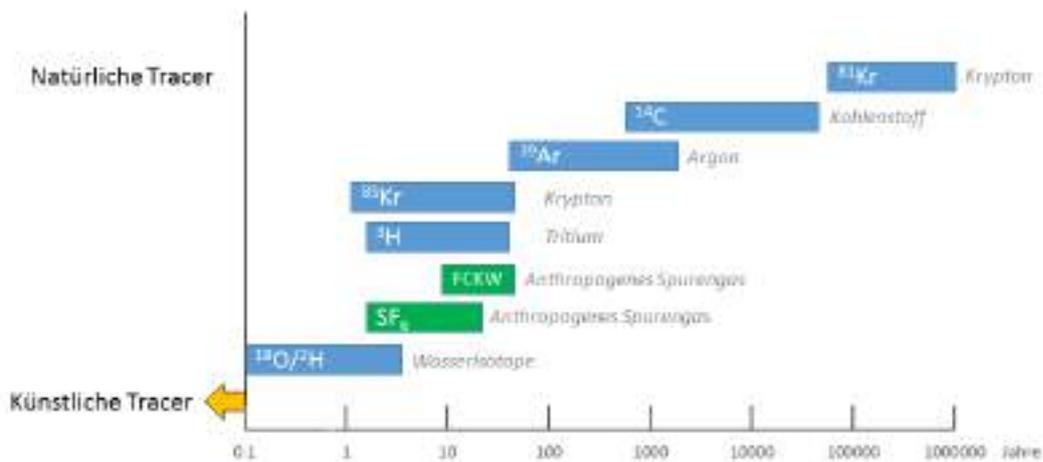


Abb. 5-19: Anwendungsbereiche von Tracern für die Altersdatierung von Wässern

Immer öfter werden auch Pestizide und Herbizide als Umweltracer genutzt. Ungleich schwerer ist hierbei direkt auf das Grundwasseralter zu schließen da diese Verbindungen Abbau- und Sorptionseigenschaften zeigen. Vielmehr werden diese Verbindungen als Indikator für den Ort der Grundwasserneubildung genutzt. Analog dazu lässt sich das Vorkommen von Süßstoffen im Grundwasser auf den Eintrag von Abwässern über Oberflächengewässern schließen.

Bei Tracerversuchen mit künstlichen Tracern wird meist ein Cocktail verschiedener Substanzen als Puls oder über eine bestimmte Zeit an einem geeigneten Injektionspunkt oder auf einer bestimmten Fläche aufgegeben. Künstliche Tracer können:

- Partikeltracer wie Sporen, Bakterien oder fluoreszierende Mikropartikel,
- Chemische Tracer wie Salze oder Farbstoffe oder fluoreszierende Verbindungen oder
- Stabile Isotopen sowie
- in der Vergangenheit oft auch radioaktive Tracer sein.

Ziel dieser Versuche ist die Ermittlung einer Durchbruchkurve des Tracers an einer definierten Beobachtungsstelle. Die Durchbruchkurve bildet die Grundlage für die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit im System. Die Auswertung mittels Summenkurve stellt hierbei ein sehr einfaches Verfahren dar. Die mittlere Fließzeit ergibt sich hierbei beim Durchbruch von 50% der resultierenden Tracerkonzentration.

Bei der Abschätzung des Grundwasseralters anhand von Tracern werden oft sehr einfache Strömungsbedingungen angenommen. Bei komplexen hydraulischen Verhältnissen ist die Anwendung hydrologische Fließmodelle und Mischungsvorgänge zu berücksichtigen.



Tabelle 5-13: Weiterführende Literatur Tracermethoden

Arbeitsblätter:

- DVGW (2005): Arbeitsblatt W 109 Planung, Durchführung und Auswertung von Markierungsversuchen bei der Wassergewinnung
- Bayrisches Landesamt (2002): Merkblatt Nr. 3.1/1
- BWG (2002): Praxishilfe – Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie

Fachliteratur:

- Käss, W. (2004): Lehrbuch der Hydrogeologie / Geohydraulische Markierungstechnik.
- Cushman, J. H., & Tartakovsky, D. M. (Eds.). (2016). *The Handbook of Groundwater Engineering*. CRC Press.

5.5.1 Datengrundlagen

Die benötigte Datengrundlage zur Durchführung (Versuchsaufbau) und Auswertung von Tracerversuchen richtet sich nach dem Verfahren und verwendeten Tracer selbst. Tracerversuche bei dem ein künstlicher Tracer in den Untergrund eingebracht wird erfordern prinzipiell keine weiteren Informationen. Grundlegende Kenntnisse zur Grundwasserströmung wie Strömungsrichtung, Wasservolumen und eine erste Abschätzung der Fließzeit sind jedoch für den Versuchsaufbau empfehlenswert. Dahingegen werden bei der Nutzung natürlicher Tracer für die Abschätzung der Fließzeit z.T. langjährige Eintragskennwerte benötigt. So wird die Verweilzeit im Boden über Jungwassertracer anhand von mehrjährigen Vergleichskurven vor Ort abgeschätzt.



6 Aggregation Verweil- und Fließzeiten

6.1 Aggregierte Verweil- und Fließzeiten für flächenhafte Betrachtungen

Durch Summation der berechneten Gesamtverweilzeit in der ungesättigten Zone mit den Fließzeiten im Grundwasserleiter kann die Reaktionszeit, bis sich der Einfluss von Grundwasser-schutzmaßnahmen bemerkbar macht, abgeschätzt werden. Beim flächenhaften Verfahren beziehen sich die Werte dabei immer auf das Ausgangselement und bezeichnen die Zeiten, die das Sickerwasser von der Einsickerung in den Boden an der jeweiligen Rasterzelle bis zum Austritt in den grundwirksamen Vorfluter benötigt.

Für flächenhafte Fragestellungen, z.B. zur Abschätzung der Reaktionszeit der ungesättigten Zone in einem GWK sollten die für alle Rasterzellen ermittelten Verweilzeiten im Boden und in den Deckschichten mittels eines geeigneten Statistischen Verfahrens berücksichtigt werden. Ein sehr einfaches und geeignetes Verfahren stellt die arithmetische Mittelwertberechnung dar, bei der die Werte aufsummiert und gemittelt werden.

Wie die flächenhafte Darstellung (Abb. 6-1) sowie die Häufigkeitsverteilung (Abb. 6-2) zeigen, umfassen die Reaktionszeiten in den 3 GWK einen weiten Bereich zwischen weniger als 2 Jahren und mehr als 100 Jahren. In allen drei Grundwasserkörpern liegt der Flächenanteil mit Reaktionszeiten von über 100 Jahren bei ca. einem Drittel (29 – 35 %). Hierbei handelt es sich erwartungsgemäß meist um die vorfluterfernen Bereich innerhalb der GWK. In den kürzeren Reaktionszeitklassen zeigt sich eine breite Verteilung, wobei sich in allen drei GWK schwache Maxima bei wenigen Jahrzehnten darstellen (Klassen 10 – 25 Jahre und 25 – 50 Jahre)

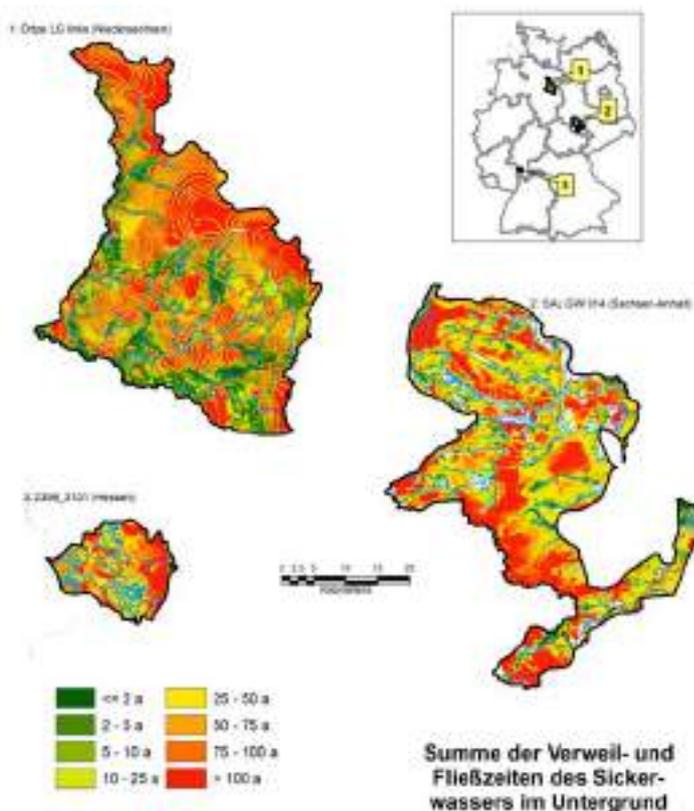


Abb. 6-1:
Summierte flächenhafte Verweil- und Fließzeiten von der Einsickerung in den Boden bis zum Austritt in ein Oberflächengewässer

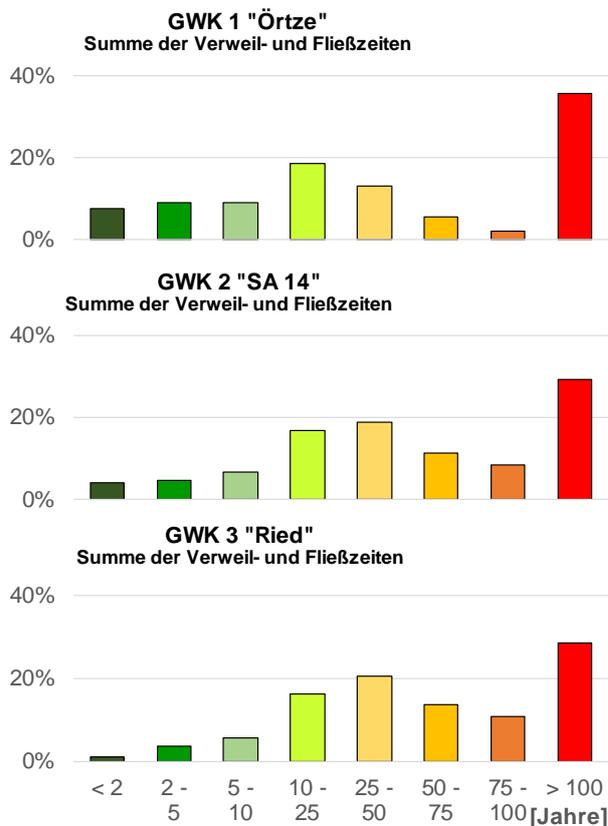


Abb. 6-2:
prozentuale Verteilung der summierten Verweil- und Fließzeiten von der Einsickerung in den Boden bis zum Austritt in ein Oberflächengewässer für festgelegte Reaktionszeitklassen

Die Reaktionszeit der Lockergesteinsgrundwasserkörper GWK 1 und GWK 3 wird insbesondere durch die Fließzeiten bei der Passage des Grundwasserraums bestimmt, während die Verweilzeiten in der ungesättigten Zone in beiden GWK vergleichsweise gering sind. Für den GWK 2, der die Reaktionszeit in einem Festgesteins-GWK repräsentiert, stellt sich die Situation umgekehrt dar. Bedingt durch die geringe Sickerwasserrate übertrifft die Verweilzeit in der ungesättigten Zone dort in einigen Teilregionen die Grundwasserfließzeiten.

6.2 Punktbezogener Ansatz – Bezugsmaßstab Grundwassermessstellen

Punktbezogene Verweil- und Fließzeiten können für Grundwassermessstellen sowie Quellen und Brunnen addiert und aggregiert werden. Die Summe von Verweil- und Fließzeiten gibt die Reaktionszeit einer Messstelle im Hinblick auf Eintragsänderungen am Ort der Grundwasserneubildung wieder. Dies entspricht der Zeit, die erforderlich ist, damit sich beispielsweise Grundwasserschutzmaßnahmen erst in einer Messstelle zeigen können. Über eine Mittelung aller Reaktionszeiten kann in einem zweiten Schritt ein Kennwert für die Reaktionszeit des Messnetzes abgeleitet werden. Hierbei sollte anstelle des arithmetischen Mittels der gegenüber Ausreißern robustere Medianwert verwendet werden.

Werden nur Reaktionszeiten der Messstellen mit Nitratkonzentrationen über 50 mg/l bei der Kennwertbildung berücksichtigt, erhält man ein Maß für die erforderliche Mindestzeit, bis zu der sich Grundwasserschutzmaßnahmen im Messnetz bemerkbar machen können. Nach Einführung hinreichender Grundwasserschutzmaßnahmen ist mindestens diese Zeit erforderlich, bis ein GWK den guten chemischen Zustand erreichen kann.



6.2.1 Exemplarische Anwendung GWK 1 „Örtze Lockergestein“

In Abb. 6-2 sind die Verweil- und Fließzeiten für die Messstellen des Messnetzes des GWK 1 zusammengestellt. Fließzeiten wurden mit den Teufe-Neubildungsverfahren ermittelt, Verweilzeiten wurden für die Messstellen aus der Verweilzeitenkarten (siehe Abschnitt 3.4.1) entnommen. Zusätzlich sind auch die mittleren Nitratkonzentrationen mit aufgeführt.

Bezogen auf das Messnetz liegen die Verweilzeiten in der ungesättigten Zone und die Fließzeiten in der gleichen Größenordnung, wobei aber in den der überwiegenden Mehrzahl der Messstellen die Fließzeiten etwas größere Werte als die Verweilzeiten aufweisen. Im Mittel des Messnetzes liegen die Verweilzeiten bei ca. 5,5 Jahren und die Fließzeiten bei 7,5 Jahren. Um die Reaktionszeit für die Messstellen eines Messnetzes zu beschreiben, müssen stets Verweil- und Fließzeiten ermittelt werden.

Am häufigsten treten Reaktionszeiten von 10 bis 15 Jahren auf (Abb. 6-2), gefolgt von einer Gruppe mit Zeiten von fünf bis 10 Jahren und einer Gruppe mit etwas längeren Reaktionszeiten. Lediglich zwei Messstellen weisen Reaktionszeiten von über 20 Jahren auf. Im Mittel liegt die Reaktionszeit des Messnetzes bei 13 Jahren (Medianwert: 11 Jahre).

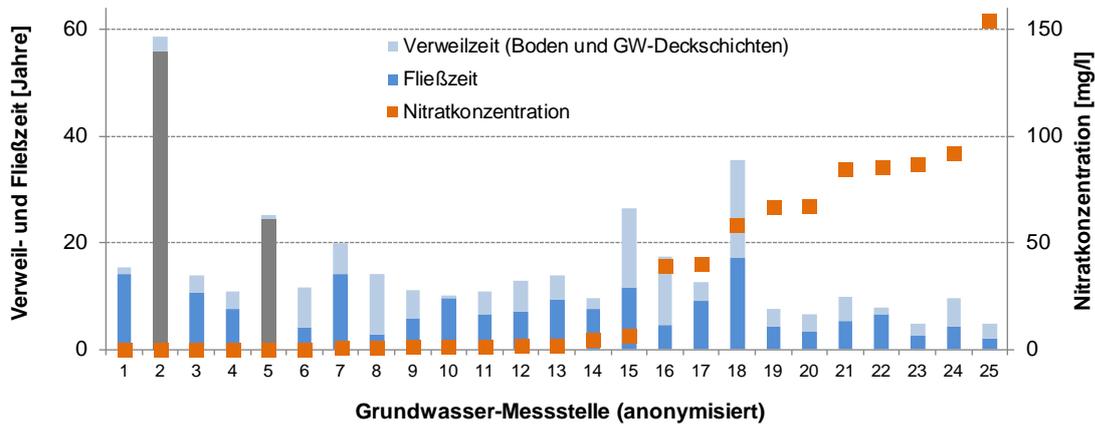


Abb. 6-3: Verweil- und Fließzeiten (=Reaktionszeit) der Grundwassermessstellen für die Güteüberwachung des GWK 1 (Messstellenbezeichnungen anonymisiert), für Messstellen mit grau eingefärbten Säulen (Nr. 2 und 5) ist das Teufe-Neubildungsverfahren nicht geeignet.

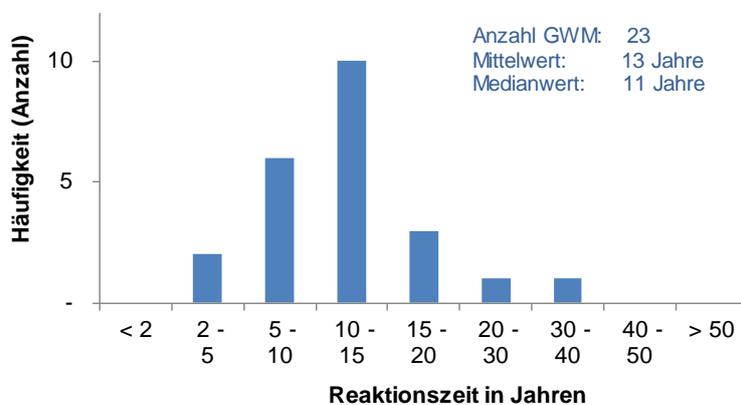


Abb. 6-4: Häufigkeitsverteilung für die mit dem Teufe-Neubildungsverfahren ermittelten Reaktionszeiten für die Grundwasser-Messstellen im GWK 1 „Örtze“ (dargestellt sind nur für das Verfahren geeignete Messstellen)



Werden nur die Messstellen mit Nitratkonzentrationen von über 50 mg/l betrachtet, so weisen die im Mittel etwas kürzer Reaktionszeiten auf. Hier stellt lediglich die Messstellen Nr. 18 mit einer ermittelten Reaktionszeit von ca. 35 Jahren eine Ausnahme dar. Alle anderen Messstellen weisen Reaktionszeiten von unter 10 Jahren auf und liegen damit unterhalb des Mittelwertes für das Gesamtmessnetz. Die Reaktionszeit dieser Messstellen liegt im Mittel (Median und arithmetischer Mittelwert) bei ca. 7,5 Jahren.

6.2.2 Exemplarische Anwendung GWK 2 „SA-14“

In Abb. 6-4 sind die Verweil- und Fließzeiten für die Messstellen des Messnetzes des GWK 2 zusammengestellt. Fließzeiten wurden mit den Teufe-Neubildungsverfahren ermittelt, Verweilzeiten wurden für die Messstellen gemäß der in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beschriebenen Vorgehensweise bestimmt. Zusätzlich sind auch die mittleren Nitratkonzentrationen mit dargestellt.

Bezogen auf das Messnetz liegen die Verweilzeiten in der ungesättigten Zone und die Fließzeiten auch in diesem Grundwasserkörper in der gleichen Größenordnung. Im Unterschied zu den beiden Lockergesteinsgrundwasserleitern weisen hier aber tendenziell die Verweilzeiten in der ungesättigten Zone größere Werte als die Fließzeiten auf. Im Mittel des Messnetzes liegen die Verweilzeiten bei ca. 19,5 Jahren und die Fließzeiten bei 14,0 Jahren. Um die Reaktionszeit für die Messstellen eines Messnetzes zu beschreiben, müssen auch in Festgesteinsgrundwasserleitern stets Verweil- und Fließzeiten ermittelt werden.

Im Vergleich zu dem hinsichtlich der Größe und der Anzahl der Messstellen vergleichbaren GWK 1 weist das Messnetz des GWK 2 eine deutlich größere Spanne in der Verteilung der Reaktionszeiten auf (Abb. 6-5). Es treten sowohl Messstellen mit Reaktionszeiten von unter zwei Jahren als auch Messstellen mit Reaktionszeiten von über 50 Jahren auf. Mit großer Streuung weisen die meisten Messstellen Reaktionszeiten von 15 bis 30 Jahren auf. Die Streuung resultiert sowohl aus den geringen Grundwasserneubildungsraten als auch aus der heterogenen hydrogeologischen Situation und den Filterpositionen im Messnetz. Aufgrund der großen Streuung in den ermittelten Reaktionszeiten sind die Median- und Mittelwerte zur Reaktionszeit des Messnetzes wenig aussagekräftig.

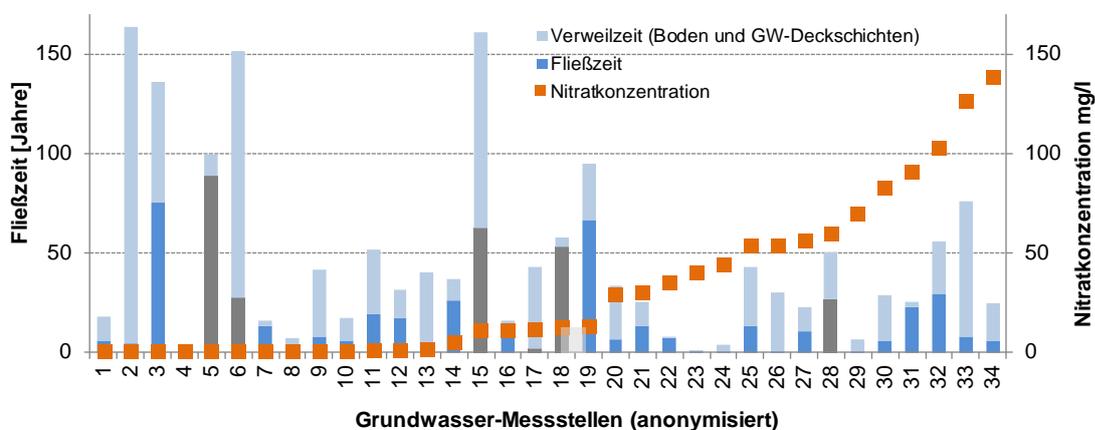


Abb. 6-5: Verweil- und Fließzeiten (=Reaktionszeit) der Grundwassermessstellen für die Güteüberwachung des GWK 2 (Messstellenbezeichnungen anonymisiert), für Messstellen mit grau eingefärbten Säulen (Nr. 2, 5, 6, 13, 15, 17, 18, 28) ist das Teufe-Neubildungsverfahren nicht geeignet.

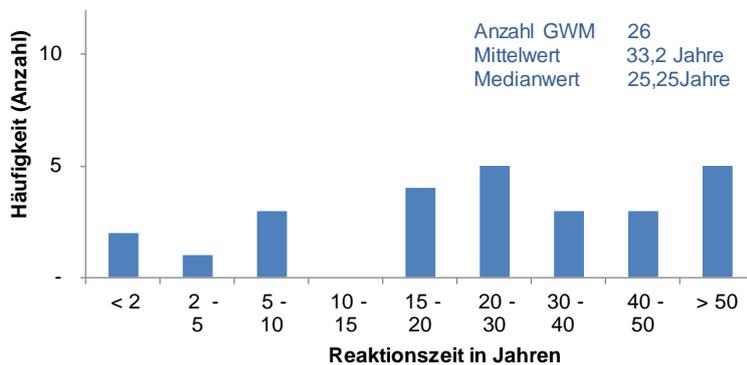


Abb. 6-6: Häufigkeitsverteilung für die mit dem Teufe-Neubildungsverfahren ermittelten Reaktionszeiten für die Grundwasser-Messstellen im GWK 2 „SA-14“ (dargestellt sind nur für das Verfahren geeignete Messstellen)

Aufgrund der großen Streubreite in den ermittelten Reaktionszeiten zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messstellen, die Nitratkonzentrationen über 50 mg/l aufweisen und den übrigen Messstellen. Die berechneten mittleren Reaktionszeiten liegen in den nitratbelasteten Messstellen bei durchschnittlich 34 Jahren (Medianwert 29 Jahre). Damit würden diese Messstellen die Eintragsituation der 1970er und frühen 1980er Jahre widerspiegeln. Messstellen mit extrem langen Reaktionszeiten von über 100 Jahren sind dagegen erwartungsgemäß nitratfrei.

6.2.3 Exemplarische Anwendung GWK 3 „Hessisches Ried“

Für die Bestimmung der Reaktionszeit wurde eine graphische Auswertung der flächenhaft bestimmten Verweilzeiten in der ungesättigten Zone und der Zustromgebiete für den GWK 3 durchgeführt. In der Abb. 6-6 sind beide Parameter übereinander gelegt. Die so ermittelten Verweilzeiten in der ungesättigten Zone (Verweilzeit Grundwasserdeckschicht) wurden in das Berechnungstool in der eingetragen. Aufgrund fehlender Daten zum Zustromgebiet wurde für die GWM 6 die Verweilzeit an der GWM abgelesen. Automatisiert wird in dem Tool eine Bewertung des GWK hinsichtlich der mittleren Verweil- und Fließzeiten sowie der sich daraus ergebenden Reaktionszeiten ausgegeben (siehe). Die für den GWK berechnete mittlere Reaktionszeit (Median) beträgt ca. 24 Jahre. Insbesondere im Bereich des Odenwalds zeigt sich aufgrund sehr langer Verweilzeiten in der ungesättigten Zone mit ca. 62 Jahren in der GWM 8 eine deutlich längere Reaktionszeit.

Grundwasserkörper	GWK 007	arith.	
		Mittelwert	Median
Grundwassermessstellen			
Gesamtanzahl	10 GWM		
Verfahren anwendbar für	7 GWM		
	GWM mit Nitrat > 50 3 GWM		
		mittlere Verweilzeit Boden [Jahre]	0.0
		mittlere Verweilzeit GW-Deckschicht [Jahre]	17.7
		mittlere Fließzeit [Jahre]	12.3
		mittlere Reaktionszeit [Jahre]	30.0
			23.8

Allgemeine Daten und Auswertefaktoren			Berechnete Parameter (Jahre)					Verweilzeit (Jahre)		Reaktionszeit (Jahre)	
Grundwasserkörper	Grundwassermessstelle	Verfahren anwendbar?	Nr FOK (Min)	Nr FOK (Max)	arith. Mittel	Nr FOK (Min)	Nr FOK (Max)	arith. Mittel	Boden	GW-Deck.	
2396_3101 Hessisches Ried	1	Ja	320	538	433	6.9	14.0	11.8	0.0	12.0	23.8
2396_3101 Hessisches Ried	2	Ja	809	843	818	25.5	27.3	26.4	0.0	25.0	51.4
2396_3101 Hessisches Ried	3	Nein							0.0		
2396_3101 Hessisches Ried	4	Ja	29	384	257	0.0	10.3	5.9	0.0	9.0	14.8
2396_3101 Hessisches Ried	5	Ja	51	188	123	2.5	9.8	5.2	0.0	11.0	17.2
2396_3101 Hessisches Ried	6	Ja				7.0	14.7	10.8	0.0	17.0	27.8
2396_3101 Hessisches Ried	7	Nein							0.0		
2396_3101 Hessisches Ried	8	Ja	1229	1573	1399	16.1	20.0	18.4	0.0	44.0	62.4
2396_3101 Hessisches Ried	9	Nein							0.0		
2396_3101 Hessisches Ried	10	Ja	129	231	188	4.6	8.8	6.7	0.0	6.0	12.7

Abb. 6-7: Bewertung des GWK 2396_3101 Hessisches Ried



7 Zusammenfassung und Ausblick

Auf landwirtschaftlich intensiv genutzten Flächen werden seit Jahrzehnten Stickstoffdünger zur Ertragssteigerung ausgebracht, die in vielen Regionen zu einer so hohen Nitratbelastung des Grundwassers geführt haben. Zu hohe Nitrateinträge sind die Hauptursache, dass die Nitratkonzentrationen im Grundwasser den Grenzwert von 50 mg/l überschreiten, so dass der gute chemische Zustand gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL, 2000) und der EU-Grundwasserrichtlinie (EU-GWRL, 2006) nicht erreicht wird.

Entsprechend den Anforderungen der EU-WRRL (2000) und EU-GWRL (2006) wurden für die betreffenden Grundwasserkörper Maßnahmenprogramme zur Minderung der Stickstoff-Einträge ins Grundwasser entwickelt und umgesetzt. Trotzdem wurde der gute chemische Zustand des Grundwassers im Bezugsjahr 2015 für 267 von insgesamt 990 GWK aufgrund der Nitratbelastung verfehlt.

Natürliche Standortbedingungen können dazu führen, dass trotz zielführender und effizient umgesetzter Grundwasserschutzmaßnahmen in manchen Grundwasserkörpern kein Rückgang der Nitratkonzentrationen in den Messstellen der Überwachungsmessnetze erkennbar ist. Die Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone und die Fließzeiten des Grundwassers im Aquifer gehören zu diesen natürlichen Standortfaktoren.

Aufgrund von langen Verweil- und / oder Fließzeiten ist ein Rückgang der Nitratkonzentrationen im Grundwasser unter Umständen erst mit einer deutlichen zeitlichen Verzögerung an der Messstelle bemerkbar. Trotz der großen Bedeutung der Verweil- und Fließzeitenermittlung für die Erstellung von Zielerreichungsprognosen gemäß EU-WRRL (2000) fehlte es bislang an einer in sich konsistenten Methodik / Vorgehensweise für die verschiedenen Anwendungsfelder des behördlichen Vollzugs.

Entscheidend für die Eignung eines Verfahrens im behördlichen Vollzug ist dessen allgemeine Anwendbarkeit, so dass die Kenngrößen zu den Verweil- und Fließzeiten mit vergleichsweise geringem Aufwand abgeleitet werden können. Vor diesem Hintergrund lag der Schwerpunkt des Projektes auf der Etablierung leicht anwendbarer, pragmatischer Verfahren, für die hinsichtlich der Eingangsdaten durchweg auf verfügbare Daten auf Landesebene bzw. behelfsweise auf robuste Annahmen und Abschätzungen zurückgegriffen kann.

Zur Ableitung der Verweilzeiten des Sickerwassers im Boden und in den Grundwasserdeckschichten (ungesättigte Zone) wurden, bedingt durch die unterschiedliche Qualität der verfügbaren Datengrundlagen, drei verschiedene Berechnungsansätze als relevant identifiziert.

- Für die Verweilzeitenermittlung im **durchwurzelten Bodenbereich** wird das Verfahren nach DIN 19732 zur Anwendung empfohlen
- Für die Verweilzeitenermittlung in den **Grundwasserdeckschichten von Lockergesteinsregionen** wird ebenfalls das Verfahren nach DIN 19732 zur Anwendung empfohlen.
- Für die Verweilzeitenermittlung in den **Grundwasserdeckschichten von Festgesteinsregionen** ist dagegen in der Regel nur das Schätzverfahren nach Hötting et al. (1995) anwendbar.

Unabhängig von der Fragestellung ist die Verweilzeitenermittlung für die Grundwasserdeckschichten, vor allem in der Festgesteinsregion, mit größeren Unsicherheiten behaftet. Während



für die flächenhafte Anwendung der Verfahren auf GWK-Ebene in der Regel Daten aus überregionalen Kartenwerken zur Verfügung stehen, sollten für punktbezogene Anwendungen – sofern vorhanden – Daten aus lokalen Datenerhebungen bzw. Lokalstudien übernommen werden.

Bedingt durch die unterschiedlichen Fragestellungen im behördlichen Vollzug bzw. die hierdurch bedingten unterschiedlichen Betrachtungsmaßstäbe und Raumbezüge wurden im Rahmen des Projektes zwei verschiedene Typen von Ansätzen für die Ermittlung von Fließzeiten im Grundwasserleiter als relevant identifiziert:

- Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte **Teufe-Neubildungsverfahren** als **punktbezogener Ansatz** für eine einfache Abschätzung der Fließzeiten des Grundwassers für Grundwasserbeobachtungsmessstellen und Monitoringmessnetze, Entnahmebrunnen und Quellen. Die Fließzeit bezieht sich immer auf die Zeit, die das Grundwasser vom Ort der Neubildung bis zum Erreichen dieses Bezugspunktes benötigt.
- **Das WEKU-Verfahren als flächenhafter Ansatz** für die Abschätzung der Fließzeiten des Grundwassers bis zum Vorflutereintritt, bzw. der Reaktionszeit eines gesamten GWK basierend auf zweidimensionalen, landesweit verfügbaren Datengrundlagen.

Beide Verfahren erlauben eine einfache und praxisorientierte Ermittlung punktbezogener bzw. flächenbezogener Fließzeiten. Sie stellen aber zwangsläufig auch einen Kompromiss bezüglich der erreichbaren Genauigkeit, der Aussagekraft bzw. der damit verbundenen Unsicherheiten dar. Letztlich sind beide Verfahren als Schätzverfahren einzustufen, die aber eine schnelle und nachvollziehbare Einordnung der Fließzeiten ermöglichen. Anders als Altersdatierungen oder Strömungsmodellierungen sind hierfür keine erweiterten Kenntnisse und kein gesonderter Aufwand (Expertenwissen, Modellierkenntnisse, Aufwand für Probenahme und Spezialanalytik) erforderlich.

Die Anwendbarkeit der oben aufgeführten flächenhaften und punktbezogenen Verfahren wurde von den Projektpartnern für drei exemplarische Grundwasserkörper in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt überprüft. Bei der Auswahl der GWK wurde darauf geachtet, dass verschiedene, für Deutschland repräsentative Grundwasserleitertypen (Poren- und Kluftgrundwasserleiter) sowie verschiedene hydrologische und bodenkundliche Standortbedingungen abgedeckt sind. Ein weiteres Auswahlkriterium war die problemlose Verfügbarkeit der für die Modellierung benötigten Datengrundlagen. Die endgültige Festlegung der GWK erfolgte in enger Abstimmung mit dem LAWA-Begleitarbeitskreis. Die generelle Eignung aller oben aufgeführten Verfahren zur Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten wurde hiermit nachgewiesen.

Über die Anwendung der oben aufgeführten Verfahren in den drei Test-GWKs hinaus, wurden die Verfahren zur Verweilzeitermittlung sowie das Teufe-/Neubildungsverfahren auch von Mitgliedern der LAWA- Kleingruppe „Verweilzeiten“ zur Anwendung gebracht. Die verantwortlichen Landesämter -vertreten durch Hr. Neumann (LANUV NRW), Fr. Hofman (KUP i.A. LUBW), Fr. Hermsdorf (LFU_BB), Fr. Schwerdtfeger (LUNG-MV), Hr. Steinmann (LLUR), Hr. Schnepfmüller (LHW MULE Sachsen-Anhalt) - kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass die eingesetzten vereinfachten Verfahren -bei geeignetem Messnetz und Messstellenausbau- für die untersuchten GWK einen guten Überblick über die zu erwartenden Reaktionszeiten im oberen Grundwasserkörper ermöglichen.

Trotz der generellen Eignung der Verfahren für die Abschätzung von Verweil- und Fließzeiten soll an dieser Stelle auf Limitationen und mögliche Risiken hingewiesen werden, die bei der Interpretation und Verwendung der Modellergebnisse, z.B. in Zusammenhang mit Zielerreichungsprognosen für einen GWK, unbedingt beachtet werden müssen:



Die Modellergebnisse des flächenhaft anwendbaren WEKU-Verfahrens können generell für Zielerreichungsprognosen von Oberflächengewässern von Relevanz sein, jedoch setzt sich die in einem Vorfluter zum Abfluss kommende Wassermenge immer aus unterschiedlichen Abflusskomponenten zusammen. Der grundwasserbürtige Abfluss ist immer nur eine Komponente der in einem Vorfluter abfließenden Wassermenge. Andere relevante Abflusskomponenten sind der natürlicher Zwischenabfluss und der Abfluss aus Dränagen.

Durch den hohen Anteil an dränierten Flächen ist im Norddeutschen Flachland beispielsweise der Abfluss aus Dränagen in vielen Flusseinzugsgebieten die dominierende Abflusskomponente bzw. der Haupteintragspfad für N-Einträge in die Vorfluter (Kunkel et al., 2016). In vielen Mittelgebirgsregionen ist der natürliche Zwischenabfluss die dominierende Abflusskomponente, durch den der Anteil des Grundwasserabflusses am Gesamtabfluss vermindert wird.

Lediglich in GWK in Grundwasserneubildungsgebieten, d.h. dort, wo der größte Teil des versickernden Niederschlags den Grundwasserleiter erreicht und die Wasserführung eines Vorfluters über den Grundwasserabfluss gesteuert ist, entspricht die flächenhaft für den GWK ermittelte Verweil- und Fließzeit weitestgehend dem Reaktionszeitraum bis zu dem sich im Oberflächengewässer die Wirkung von Minderungsmaßnahmen bemerkbar macht. Nur in solchen GWK können die Verweil- und Fließzeiten der grundwasserbürtigen Abflusskomponenten uneingeschränkt für Zielerreichungsprognosen für Oberflächengewässer verwendet werden. Um die Bedeutung des grundwasserbürtigen Abflusses für die Wasserführung eines Oberflächengewässers richtig einzuschätzen und Fehlinterpretationen zu vermeiden, sollte die flächenhafte Verweil- und Fließzeitenermittlung in einem GWK daher immer in Kombination mit einer Wasserhaushaltsmodellierung erfolgen.

Mit dem punktbezogenen Teufe-Neubildungsverfahren lässt sich vor allem die Reaktionszeit von Grundwasserbeobachtungsmessstellen (Grundwassermessstellen / Grundwasserbeobachtungsbrunnen) als Teil des Monitoringmessnetzes abschätzen. Im Rahmen der Umsetzung der EU-WRRL (2000) dienen Grundwassermessstellen vor allem dazu, die Wirksamkeit von Maßnahmenprogrammen, z.B. zur Reduktion des Nitrateintrags ins Grundwasser, zu überprüfen. In der Praxis werden Grundwassermessstellen in einem GWK dort installiert, wo im Hinblick auf die hydrogeologische Standortsituation sowie die festgestellten Belastungen eine große Repräsentativität vorliegt. Abnehmende Konzentrationen (Trends) an repräsentativen Grundwassermessstellen können nach entsprechender Verweil- und Fließzeit eine erfolgreiche und zielführende Umsetzung von Maßnahmenprogrammen an der betreffenden Grundwassermessstelle belegen.

Die Repräsentativität einer Grundwassermessstelle ist aber weder ein Beleg für die konsistente und flächendeckende Umsetzung von Maßnahmen im gesamten GWK, noch ist aus der Reaktionszeit der Messstelle ein Rückschluss auf die Reaktionszeit des GWK möglich. In diesem Zusammenhang besteht die Gefahr, dass kleinräumig und ausschließlich im Zustrom einer Messstelle umgesetzte Grundwasserschutzmaßnahmen in Kombination mit den Verweil- und Fließzeitenergebnissen unzulässigerweise für Zielerreichungsprognosen für einen GWK verwendet werden. Gleiches gilt für die durch Aggregation der Ergebnisse abgeleiteten Reaktionszeit des Messnetzes. Auch die Reaktionszeit des Messnetzes ist keineswegs einer repräsentativen Fließzeit in einem Grundwasserkörper gleichzusetzen. Die Anwendung des punktbezogenen Verfahrens für diesen Zweck ist nicht zulässig.

Abschließend sei nochmals hervorgehoben, dass die in diesem Bericht beschriebenen Methoden Hilfsmittel zur Abschätzung von Verweil- und Fließzeiten darstellen, z.B. ob und in welchem Ausmaß begründete Fristverlängerungen gemäß WRRL erforderlich sind. Keines der Verfahren



ersetzt jedoch die sachverständige Prüfung durch den Bearbeiter bei Spezialfällen, wie z.B. Havarien. In diesem Fall sollten (weiterhin) Strömungsmodelle eingesetzt werden.

Die hier beschriebenen und angewendeten Methoden beziehen sich ausschließlich auf die Erfassung von Verweil- und Fließzeiten. Geringe Denitrifikationsleistungen von Böden, ein Nachlassen der Nitratabbauleistung des Grundwasserleiters oder geringe Sickerwasser- bzw. Grundwasserneubildungsraten stellen ebenfalls besondere natürliche Standortfaktoren dar. Auch diese Faktoren können zu einem Ausbleiben des Erfolgs von Grundwasserschutzmaßnahmen führen.

Bei dem natürlichen Nitratabbauvermögen von Grundwasserleiter handelt es sich um einen praktisch nicht erneuerbaren reaktiven Vorrat, der durch die lang anhaltenden hohen Nitrateinträge sukzessiv aufgezehrt wird. Ein Nachlassen des Nitratabbauvermögens von Grundwasserleitern führt damit trotz geringerer Nitrateinträge zu konstanten oder sogar steigenden Nitratkonzentrationen. Verstärkt wird dieser Effekt insbesondere durch geringe Sickerwasser- und Grundwasserneubildungsraten. Um diese Faktoren bei der Zustandsbewertung von Grundwasserkörpern berücksichtigen zu können, fehlt ebenfalls noch ein methodischer Kontext.

Über die Zustandsbewertung hinaus ist die Kenntnis dieser Faktoren auf die Beschaffenheitsentwicklung von Grundwasserkörpern erforderlich, um Erfolg und Auswirkung von Maßnahmen erfassen zu können und um für bestimmte Grundwasserkörper oder Teilbereiche von Grundwasserkörpern einen besonderen Schutz- und Maßnahmenbedarf abzuleiten.



8 Anhang

8.1 Literatur und Regelwerke

- Ahuja, L. R., D. K. Cassel, R. R. Bruce & B. B. Barnes (1988): Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. Soil Science, 404-411. BLA-GEO, 2004
- Bachmann, G.H. & Kozur, H. (2004): The German Triassic: Correlation with the international chronostratigraphic scale, numerical ages, Milankovitch cyclicity.- Hallesches Jahrbuch Geow., B 36: 17-62.
- BGR (1995): BODENÜBERSICHTSKARTE DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND 1:1.000.000, BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, HANNOVER, 1995.
- BGR & SGD (2000): Methodendokumentation Bodenkunde (2000): Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden (Geol. Jb. Reihe G, Heft SG 1, 2. Auflage, Hannover 2000)., -
- BMU 2014: Zustand der Grundwasserkörper hinsichtlich Nitrat nach WasserBLlck (Stand: 11/2012) sowie Angaben der Länder (nur Mecklenburg-Vorpommern) Stand: 07/2014
- BLA-GEO (2004): Bund-Länder-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO), UAG Sickerwasserprognose der Ad-hoc-AG Hydrogeologie und der Ad-hoc-AG Boden, Empfehlungen für die Charakterisierung und Parametrisierung des Transportpfades Boden-Grundwasser als Grundlage für die Sickerwasserprognose, Version 1.0 Mai 2004.
- Bogena, H., R. Kunkel, T. Schöbel, H. P. Schrey & F. Wendland (2003): Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment, Vol 37. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Germany.
- Busch, K. F. & L. Luckner (1973): Geohydraulik. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- DIN 4049-3: Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 18130-1: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche.
- DIN 19732: Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotenzials von nichtsorbiebaren Stoffen, Beuth Verlag, Berlin.
- EU-WRRL: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.- *Amtsblatt Nr. L 327 vom 22/12/2000 S. 0001 - 0073*
- Domenico & Schwartz (1990): Physical and chemical Hydrogeology. John Wiley and sons. New York. pp. 410-420.
- GUT (2014): Ermittlung von Einzugsgebieten für zum Monitoring genutzte Quellen – Anhang 1 – Quelle: Apostelquelle.
- GUT (2014): Ermittlung von Einzugsgebieten für zum Monitoring genutzte Quellen – Anhang 4 – Quelle: Geiselquelle.
- Höltling, B., Haertlé, T., Hohberger, K.-H., Nachtigall, K.H., Villinger, E., Weinzierl, W., Wrobel, J.P. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. – Geol. Jb. C63, 5-24; Hannover.



- Kumar, C.P. (2012): Groundwater Modelling Software – Capabilities and Limitations.- Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT), 1(2), 46-57.
- Kunkel, R. (1994): Stochastische Modellierung der Nitratbelastung und der Verweilzeiten in den Grundwässern der Bundesrepublik Deutschland. Interner Bericht, Internal Report, FZJ-STE-IB 4/94, Forschungszentrum Jülich GmbH, Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung, Jülich, Germany.
- Kunkel, R. & F. Wendland (1997): WEKU - A GIS-supported stochastic model of groundwater residence times in upper aquifers for the supraregional groundwater management. Environmental Geology, 30 (1-2), 1-9.
- Kunkel, R. & F. Wendland (1999): Das Weg-/Zeitverhalten des grundwasserbürtigen Abflusses im Elbeinzugsgebiet. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment, Vol 19. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Germany.
- Kunkel, R. & F. Wendland (2006): Diffuse Nitrateinträge in die Grund- und Oberflächengewässer von Rhein und Ems. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment, Vol 62. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Germany.
- Matthess & Ubell (1983): Lehrbuch der Hydrogeologie, Borntraeger.
- Marotz, W. (1968): Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund. thesis thesis, Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany.
- Radzinski, K.-H. (2008): Buntsandstein.– in: Bachmann, G.H., Ehling, B.-C., Eichner, R., Schwab, M. [Hrsg.] (2008): Geologie von Sachsen-Anhalt.- 688 S., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Radzinski, K.-H. (2008): Muschelkalk.– in: Bachmann, G.H., Ehling, B.-C., Eichner, R., Schwab, M. [Hrsg.] (2008): Geologie von Sachsen-Anhalt.- 688 S., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Schäfer, I. W. (2016). Modellierung der Grundwasserströmung.
- Steeffel, C. I., Appelo, C. A. J., Arora, B., Jacques, D., Kalbacher, T., Kolditz, O., Lagneau, V., Lichtner, P.C., Mayer, K.U., Meeussen, J.C.L., Molins, S., Moulton, D., Shao, H., Simunek, J., Spyvher, N., Yabusaki, S.B., Yeh, G.T. (2015). Reactive transport codes for subsurface environmental simulation.- Computational Geosciences, 19(3), 445-478.
- Tetzlaff, B., Kuhr, P., Vereecken, H. u. Wendland, F. (2009): Aerial photograph-based delineation of artificially drained areas and their relevance for water balance and nutrient modeling in large river basins.- Physics and Chemistry of the Earth 34, 552 – 564.
- Wendland, F. (1992): Die Nitratbelastung in den Grundwasserlandschaften „alten“ Bundesländer (BRD). Berichte aus der Ökologischen Forschung. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Germany.
- Wendland, F., R. Kunkel & H. J. Voigt (2004): Assessment of groundwater residence times in the pore aquifers of the River Elbe Basin. Environmental Geology, 46 (1), 1-9.



8.2 Glossar

Abstich [m]:	Höhenunterschied zwischen dem Messpunkt und der Standardrohrspiegelhöhe (Grundwasserspiegel). [DIN-4049-3]
Teufe [m]	Die lotrechte Höhendifferenz zwischen einem definierten Referenzpunkt auf der Geländeoberkante und einem Punkt im Erdkörper. Beschreibt oft die Länge vertikaler Bohrlöcher.
gesättigte Zone	Vollständig mit Wasser gefüllter (gesättigter) Porenraum, der den Grundwasserraum und den geschlossenen Kapillarraum umfasst. (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Bodenkundliche Kartieranleitung, 2005)
ungesättigte Zone	Porenraum, der nicht vollständig mit Wasser gefüllt (gesättigt) ist [DIN-4049-3]
Grundwasser	Unterirdisches Wasser, das Hohlräume der Lithosphäre (Pedosphäre) zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird. [DIN-4049-3] (Kapillarraum ist ausgenommen)
Grundwasserkörper (GWK)	Abgegrenztes Grundwasservorkommen oder abgrenzbarer Teil eines solchen. [DIN-4049-3]. GWK im Sinne der WRRL wurden auf Grundlage von Fluss-Teileinzugsgebieten nach hydraulischen und hydrogeologischen Kriterien abgegrenzt. Die oberstromige Begrenzung wird durch eine Wasserscheiden, die unterstromige Grenze durch den Vorfluter gebildet. Die Abgrenzung dient vor allem der Sicherstellung einer systematischen Bearbeitung und einer übersichtlichen Verteilung der Bewirtschaftungsaufgaben.
Grundwasserleiter (GWL)	Gesteinskörper, die Hohlräume enthalten und damit geeignet sind, Grundwasser weiterzuleiten.
Aquifer	Aquifere sind solche Gesteinskörper, die Grundwasser in wirtschaftlich bedeutsamen Mengen liefern.
(erster) Hauptgrundwasserleiter	Erster großräumig zusammenhängender Grundwasserleiter.
Grundwasseroberfläche (GWO [m ü. NHN])	Obere Grenzfläche des Grundwasserkörpers [DIN-4049-3]. Trennt die ungesättigte Zone von der gesättigten Zone. (Diskussion: Fläche gleicher Standardrohrspiegelhöhen? Wie ist die GWO bei gespannten Aquiferen?)



Grundwasserüberdeckung (Grundwasserdeckschicht)	Gesteinskörper, der sich oberhalb der Grundwasseroberfläche befindet.
Grundwasserneubildung (GWN [mm/a])	Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser [DIN-4049-3]. Beeinflussende Faktoren sind u.a. klima- und witterungsbedingte Menge der Niederschläge und der Evapotranspiration sowie Bodeneigenschaften wie Wasserdurchlässigkeit und Wassergehalt. [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Bodenkundliche Kartieranleitung, 2005]
Grundwasserflurabstand [m]	Lotrechter Abstand zwischen einem Punkt der Erdoberfläche und der Grundwasseroberfläche des ersten Grundwasserstockwerks. [DIN-4049-3] (Diskussion: was ist mit schwebenden? Evtl. erster HauptGWL?)
Geländeoberkante (GOK) [m ü. NHN]	Die Geländeoberkante bezeichnet die Höhe der Festlandoberfläche. Sie trennt den Erdkörper von der Atmosphäre.
Boden	Der Boden ist der mit Wasser, Luft und Lebewesen durchsetzte, unter dem Einfluss der bodenbildenden Faktoren an der Erdoberfläche entstandene und im Verlauf der Zeit sich weiterentwickelnde Umwandlungsprodukte mineralischer und organischer Substanzen mit einer eigenen morphologischen Organisation in Bodenhorizonten. (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Bodenkundliche Kartieranleitung, 2005)
Wurzelraum:	Der von Pflanzenwurzeln durchdrungene Teil des Bodens (Untergrundes?). (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Bodenkundliche Kartieranleitung, 2005)
Feldkapazität (FK [-]):	Volumenanteil des Wassers im Gesteinskörper, das unter bestimmten Randbedingungen in der ungesättigten Zone maximal gegen die Schwerkraft gehalten werden kann. [DIN-4049-3]
Nutzbare Feldkapazität (nFK):	Die nutzbare Feldkapazität (nFK) ist der pflanzenverfügbare Teil der Feldkapazität.
effektive Durchwurzelungstiefe (We)	Rechnerisch bestimmte Mächtigkeit einer von Bodenart und Trockenrohdichte abhängigen Bodenzone (effektiver Wurzelraum), in der die nutzbare Feldkapazität von den Pflanzenwurzeln einjähriger landwirtschaftlicher Nutzpflanzen ausgeschöpft werden kann. [DIN 19732]
Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (FKWe):	Feldkapazität FK für die effektive Durchwurzelungstiefe We $FKWe = FK \cdot We$ [DIN 19732]



Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe):	Nutzbare Feldkapazität nFK für die effektive Durchwurzelungstiefe We $nFKWe = nFK \cdot We$
Sickerwasser:	Unterirdisches Wasser, das sich durch Überwiegen der Schwerkraft im Sickerraum abwärts bewegt, soweit es kein Grundwasser ist. [DIN 4049-3]
Sickerwasserrate (SR [mm/a]):	<p>Wasservolumen, bezogen auf eine Fläche und eine Zeit, das sich durch Überwiegen der Schwerkraft abwärts bewegt, soweit es kein Grundwasser ist. [DIN 19732, 2011]</p> <p>Die mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden (durchwurzelte Zone) ist als die Wassermenge definiert, die den Boden im langjährigen Mittel unter Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs abwärts verlässt. Das dabei gebildete Sickerwasser füllt den Grundwasserspeicher auf und/oder verlässt die Sickerzone als Direktabfluss (Dränageabfluss oder natürlicher Zwischenabfluss) (BLA-GEO, 2004).</p> <p>Während die Sickerwasserrate sich auf die Untergrenze des durchwurzelten Bodenraumes bezieht, bezeichnet der Begriff der Grundwasserneubildung nach DIN 4049-3 den Zugang von in den Boden infiltriertem Wasser durch den Sickerraum zum Grundwasser. Die eigentliche Grundwasserneubildung, d.h. der Sickerwasseranteil, der den Grundwasserleiter erreicht, findet an der Grundwasseroberfläche des obersten Grundwasserstockwerks statt.</p>
Sickerraum	Raum über der Grundwasseroberfläche, in dem das Sickerwasser transportiert wird. [DIN 19732, 2011]
Verweilzeit (t_s)	Zeit, in der sich das Sickerwasser im Sickerraum aufhält. [DIN 19732, 2011]
Hydraulische Leitfähigkeit / Durchlässigkeitsbeiwert (gesättigt k_f / ungesättigt k_u) [m/s]:	<p>Quotient aus Filtergeschwindigkeit und zugehörigem Standrohrspiegelgefälle. Der Durchlässigkeitsbeiwert als Maß für die Durchlässigkeit hängt außerdem von physikalischen Eigenschaften des Wassers und den Eigenschaften des Grundwasserleiters ab. [DIN 19732, 2011]</p> <p>Auch Durchlässigkeitsbeiwert oder k_r-Wert (gesättigte Zone) / k_u-Wert (ungesättigte Zone). Er beschreibt die hydraulische Leitfähigkeit, also die Durchlässigkeit von Gesteinen für Wasser und wird in m/s angegeben.</p>
Permeabilitätskoeffizient [m^2]:	Gesteinsspezifisches Maß der Durchlässigkeit für Flüssigkeiten und Gase. [DIN 4049-3]



Porosität (n [-]):	Quotient aus dem Volumen aller Hohlräume eines Gesteinskörpers und dessen Gesamtvolumen [DIN 4049-3]
Effektive Porosität (n_e [-])	Quotient aus dem Volumen der vom Grundwasser durchfließbaren Hohlräume eines Gesteinskörpers und dessen Gesamtvolumen [DIN 4049-3]. Für Lockergesteinsgrundwasserleiter wird häufig eine effektive Porosität von 0,2 angenommen.
nutzbare Porosität (n_f [-])	Quotient aus dem Volumen der gravitativ entleerbaren oder auffüllbaren Hohlräume eines Gesteinskörpers und dessen Gesamtvolumen [etwa wie DIN 4049-3]
Hydraulischer Gradient (i [-]):	Der hydraulische Gradient beschreibt das Gefälle der Grundwasserdruckfläche. Er ergibt sich aus dem Druckhöhenunterschied Δh entlang einer definierten Fließstrecke Δl .
Transmissivität (T [m^2):	Die Transmissivität stellt das Integral der Durchlässigkeit über die Mächtigkeit des Aquifers dar [DIN 4049-3]
(mittlere) Abstandsgeschwindigkeit (v_a [m/s):	Quotient aus der Länge eines Stromlinienschnittes und der vom Grundwasser beim Durchfließen dieses Abschnittes benötigten Zeit [DIN 4049-3]. Die Abstandsgeschwindigkeit beschreibt den Transport von Wasserteilchen oder vollständig gelösten Wasserinhaltsstoffen zwischen zwei Orten.
Filtergeschwindigkeit (v_f [m/s):	Quotient aus Grundwasserdurchfluss und der zugehörigen Fläche eines Grundwasserquerschnittes $v_f = Q/A_q = v_a \cdot n_f$ [DIN 4049-3]. Die Filtergeschwindigkeit beschreibt den flächenbezogenen Durchfluss.
Fließzeit (T_{fl} [h, min):	Zeitspanne, in der ein bestimmtes Wasserteilchen eine bestimmte Strecke zurücklegt [DIN 4049-3]
Pegel	Einrichtung zum Messen des Wasserstandes oberirdischer Gewässer [DIN 4049-3]
Grundwassermessstelle (GWM):	Anlage zur Erfassung des Grundwasserstandes und der Grundwasserbeschaffenheit.
Filterober- / Filterunterkante (FOK/FUK [m u. GOK] / [m ü. NHN]):	Parameter zur Beschreibung der Lage der Brunnenfilterstrecke in einer Grundwassermessstelle.
Unterirdisches Einzugsgebiet (A_E [km^2):	Gebiet, aus dem unterirdisches Wasser einem bestimmten Ort zufließt [DIN 4049-3]. Dieser Ort kann bspw. ein Entnahmekrönchen oder Oberflächengewässer sein.



Unterirdisches Einzugsgebiet (A_E [km²]):	Diskussion: auch oberird. EZG definieren?
Tracer	Zur Untersuchung von Transportvorgängen im Gewässer eingebrachter Markierungsstoff [DIN 4049-1] mit dem Ziel, Informationen über Herkunft, Fließwege und Bewegungsformen des Wassers sowie Eigenschaften zu erhalten.
Künstliche Tracer	Stoffe, welche gezielt in das System entlassen werden. Auf Grundlage der Wiederfindung des Stoffes an anderer Stelle, der Durchbruchskurve, wird die Aufenthaltszeit des Stoffes während der Untergrundpassage und somit die Fließzeit des Grundwassers ermittelt.
Umwelttracer	Im Naturraum vorhandene Stoffe natürlichen oder anthropogenen Ursprunges, welche insbesondere zur Altersdatierung genutzt werden können.
Numerischen Strömungsmodellierung	(Computergestütztes) Verfahren zur iterativen Lösung der Strömungsgleichung. Grundlage dazu ist die Entwicklung eines abstrakten, geologischen Modells, welches auf Beobachtungen des Erkundungsgebietes basiert.