

Förderprogramm der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)

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

Anlage 1 zum Abschlussbericht

Kurzanleitung für die messstellenbezogene Ermittlung von Fließ- und Verweilzeiten

Förderprogramm und Förderkennzeichen des Mittelgebers

**Länderfinanzierungsprojekt
Wasser-Boden-Abfall G 1.16 / G1.17**

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

Prof. Dr. Frank Wendland (FZJ)
Tel: 02461 613 165
Email: f.wendland@fz-juelich.de

Dr. Ralf Kunkel (FZJ)
Tel: 02461 613 262
Email: r.kunkel@fz-juelich.de



1 Vorbemerkungen

Die Bewertung gemäß Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) weist für ca. ein Drittel der Grundwasserkörper in Deutschland aufgrund zu hoher Nitratkonzentrationen einen schlechten chemischen Zustand aus. Gemäß WRRL und Wasserhaushaltsgesetz (WHG) war es Ziel das Grundwasser so zu bewirtschaften, dass ein guter chemischer Zustand bis zum 22. Dezember 2015 erreicht werden sollte. Auch in den nitratbelasteten Grundwasserkörpern sollte dieses Ziel, durch von den Bundesländern aufgestellte Maßnahmenprogramme, erreicht werden.

In den Grundwasserkörpern, in denen die Bewirtschaftungsziele auf Grund natürlicher Gegebenheiten nicht fristgerecht erreicht werden konnten, ist eine höchstens zweimalige Fristverlängerung bis Ende 2027 zulässig. Diese Fristverlängerung ist jedoch zu begründen.

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 Kenngrößen zu den Verweil- und Fließzeiten mit vergleichsweise geringem Aufwand abgeleitet werden können. Vor diesem Hintergrund lag der Schwerpunkt des von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramm Boden – Wasser geförderten Projektes G1.16 / G1.17 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 werden kann.

Zur Ableitung der Verweilzeiten des Sickerwassers (ungesättigte Zone) wird für den durchwurzelten Bodenbereich und die Grundwasserdeckschichten in Lockergesteinsregionen das Verfahren nach DIN 19723 zur Anwendung empfohlen. Für die Verweilzeitenermittlung in den Grundwasserdeckschichten von Festgesteinsregionen ist dagegen in der Regel nur das Schätzverfahren nach Hölting et al. (1995) anwendbar.

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 erlaubt als punktbezogener Ansatz eine einfache Abschätzung der Fließzeiten des Grundwassers für Grundwasserbeobachtungsmessstellen und Monitoringmessnetze. Auch für Entnahmebrunnen und Quellen wird ein einfacher Ansatz vorgestellt.

Die Fließzeit bei den punktbezogenen Verfahren bezieht sich immer auf die Zeit, die das Grundwasser vom Ort der Neubildung bis zum Erreichen des Bezugspunktes benötigt. Zusammen mit den Verweilzeiten erlauben diese Verfahren eine begründete quantitative Einschätzung zur Reaktionszeit eines Messnetzes im Hinblick auf Eintragsänderungen.

Als flächenhafter Ansatz erlaubt das WEKU-Verfahren 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.

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.

In der dem Abschlussbericht angelegten Kurzanleitung werden die wesentlichen Arbeitsschritte zur Ermittlung der Verweil- und Fließzeiten in Kurzform beschrieben. Für eine einfache und effiziente Bearbeitung ist eine Excel-Datei beigefügt, in der die Berechnungsverfahren hinterlegt sind.



Inhalt

1	Vorbemerkungen	2
2	Überblick zur Vorgehensweise	5
3	Verfahrensbeschreibung	6
3.1	Relevanzprüfung	6
3.2	Betrachtungsmaßstab - Klärung der Fragestellung	6
3.3	Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten - Grundwassermessstellen	6
3.3.1	<i>Ermittlung der Verweilzeit</i>	6
3.3.1.1	Verweilzeit Boden (Lockergestein und GW-Deckschichten)	7
3.3.1.2	Verweilzeit Grundwasserdeckschichten (Lockergestein)	7
3.3.1.3	Verweilzeit Grundwasserdeckschichten (Festgestein)	8
3.3.2	<i>Ermittlung der Fließzeit</i> <i>(punktbezogener Ansatz / messstellenscharfe Betrachtung)</i>	8
3.3.2.1	Teufe –Neubildungsverfahren: Ermittlung des Orts der Neubildung	9
3.3.2.2	Teufe-Neubildungsverfahren: Ermittlung der Fließzeit	10
3.3.2.3	Hinweise zur Vorgehensweise und Anwendbarkeit des Teufe-Neubildungserfahrens	10
3.4	Ermittlung der Verweil- und Fließzeit – Brunnen und Quellen	11
3.4.1	<i>Abschätzung der Verweilzeit</i>	12
3.4.2	<i>Abschätzung der Fließzeit (mittlere Aufenthaltszeit)</i>	12
4	Aggregieren der Ergebnisse	12
5	Nutzung und Risiken bei der Anwendung punktbezogener Verfahren	13
6	Ergänzende Erläuterungen und Tabellenwerte	14
6.1	Tabellenwerte, Kennwertdiagramme	14
6.2	Weiterführende Angaben zum Hölting-Verfahren	17



2 Überblick zur Vorgehensweise

Kernbegriffe des Verfahrens

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 bzw. Quellaustritt für ein Einzugsgebiet

Abkürzungen:

GWK: Grundwasserkörper

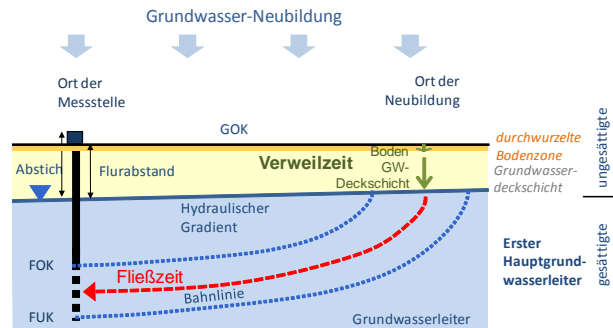
GOK: Geländeoberkante [m NHN];

GWO: Grundwasseroberfläche [m NHN];

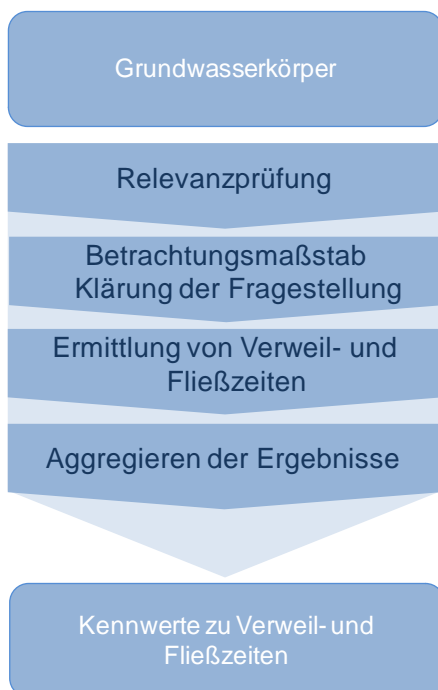
FOK: Filteroberkante [m unter GOK],

FUK: Filterunterkante [m u GOK]

EZG: Einzugsgebiet



Grundlegende Arbeitsschritte

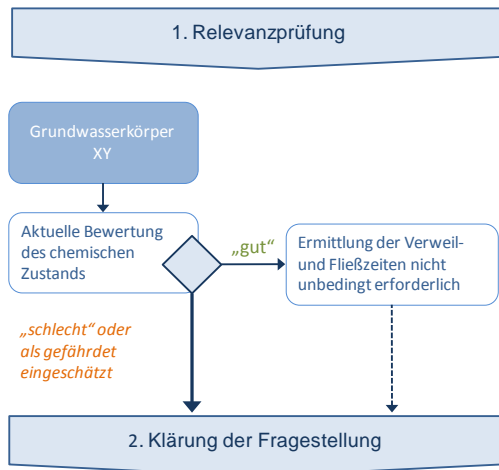


1. Die Relevanzprüfung dient der Prüfung, ob eine Bearbeitung des GWKs erforderlich ist.
2. Anschließend sind der Betrachtungsmaßstab und die dahinterstehende Fragestellung zu klären. Grundsätzlich ist zwischen einer messstellenbezogenen Betrachtung und einer flächenbezogenen Betrachtung zu unterscheiden. Über die messstellenbezogene Betrachtung wird die Reaktionszeit des Messnetzes hinsichtlich von Eintragsänderungen – z.B. durch Grundwasserschutzmaßnahmen ermittelt. Flächenhafte Verfahren geben die großräumige Verteilung von Verweil- und Fließgeschwindigkeiten an. Fließzeiten im Grundwasser sind hier aber auf den Vorfluter und nicht auf einzelne Messstellen bezogen.
3. Anhand definierter Verfahren werden dann die Verweilzeiten im Boden und in den Grundwasserdeckschichten sowie die Fließzeiten ermittelt
4. Abschließend werden die Ergebnisse zu Kennwerten aggregiert.



3 Verfahrensbeschreibung

3.1 Relevanzprüfung

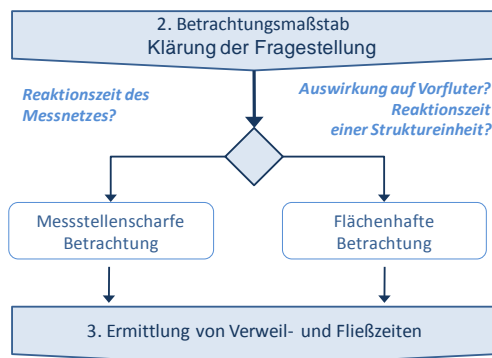


Für eine zügige landesweite Bearbeitung sollte das Verfahren zunächst für die hinsichtlich ihres chemischen Zustands bereits als „schlecht“ eingestuft und ggf. auch für als gefährdet eingeschätzte GWK angewendet werden.

Die Einschätzung einer Gefährdung ist nach Kenntnislage durch den Sachbearbeiter zu treffen. Beispiel: Steigende Konzentrationen die in absehbarer Zeit zu einer schlechten Bewertung führen

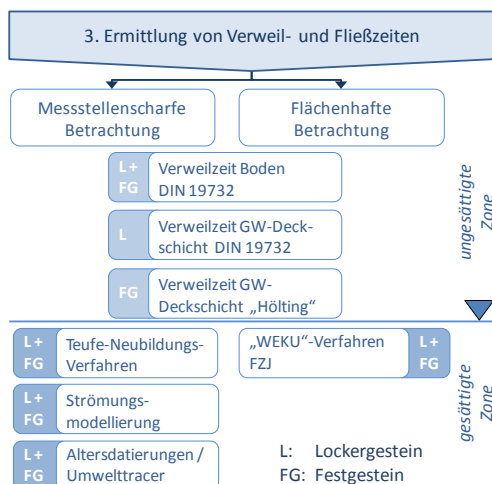
Typischer Anwendungsfall sind GWK, deren schlechter chemischer Zustand aufgrund zu hoher Nitratkonzentrationen im Grundwasser festgestellt wurde. Prinzipiell ist die Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten aber unabhängig von der Art der Zustands und den Parametern einer schlechten Bewertung durchführbar.

3.2 Betrachtungsmaßstab - Klärung der Fragestellung



Je nach Fragestellung ist durch den Sachbearbeiter der Betrachtungsmaßstab (flächenbezogen / messstellenscharf) zu wählen. Auswirkungen von Flächeneinträgen bzw. Eintragsänderungen auf die Vorfluter können anhand von Karten des FZJ bewertet werden. Für die Ermittlung der Reaktionszeit des Messnetzes ist eine messstellenscharfe (punktbezogene) Betrachtung erforderlich. Ergebnisse des messstellenscharfen Ansatzes sind tabellierte Verweil- und Fließzeiten für die Bewertungsmessstellen des GWK

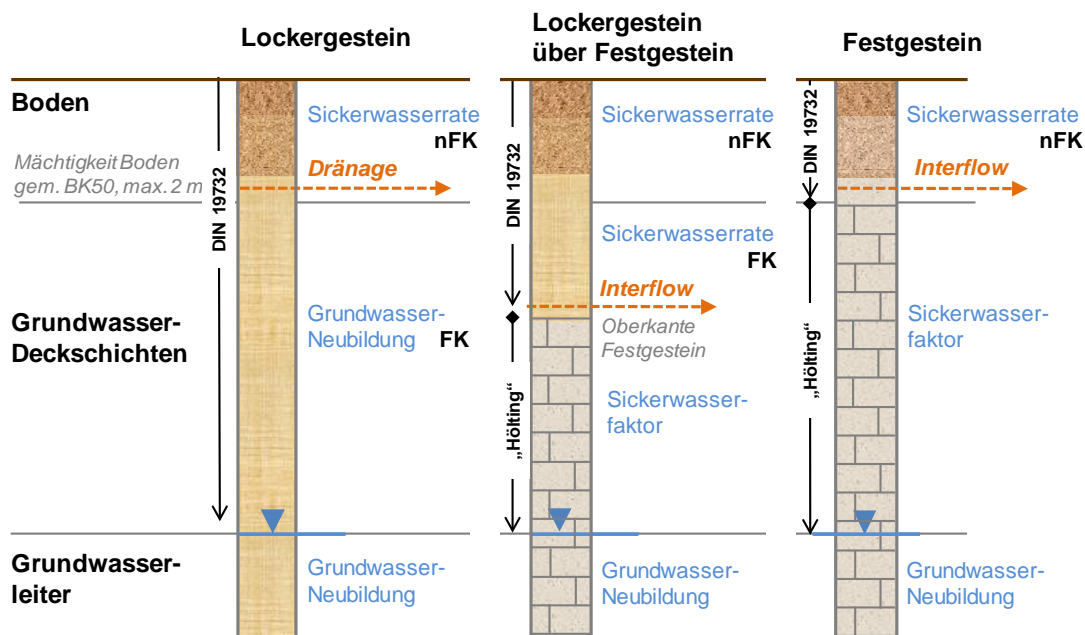
3.3 Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten - Grundwassermessstellen



Die nebenstehende Abbildung listet die Verfahren für die Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten auf.

3.3.1 Ermittlung der Verweilzeit

Für die Ermittlung der Verweilzeiten sind entsprechend des lithologischen Untergrundaufbaus verschiedene Fälle zu unterscheiden. Das jeweils empfohlene Verfahren ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.



Für den Boden wird – unabhängig vom Untergroundaufbau – die Verweilzeit entsprechend DIN 19732 ermittelt. In den Grundwasserdeckschichten (ungesättigte Zone zwischen Boden und Grundwasseroberfläche) wird für Lockergesteine die Verweilzeit ebenfalls in Anlehnung an DIN 19732 ermittelt, wobei anstelle der Sickerwasserrate aber die Grundwasserneubildung eingesetzt wird. Für Festgesteine wird die Verweilzeit anhand des Hölting-Verfahren ermittelt.

3.3.1.1 Verweilzeit Boden (Lockergestein und GW-Deckschichten)

$$t_{Bo} = \frac{1}{Q_{SW}} \sum_i nFK_i \cdot d_i$$

mit:

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

Ermittlung in Anlehnung an DIN 19732; empfohlene Vorgehensweise:

1. Werte können – sofern vorhanden – aus den entsprechenden Karten (z.B. FZJ) für den Ort der Messstelle übernommen werden oder
2. Eigenständige messstellenscharfe Berechnung in Anlehnung an die DIN 19732

Datengrundlagen bei eigenständiger Ermittlung:

- Lage und Höhe (Messstellenkataster)
- Schichtprofil
- nutzbare Feldkapazität (siehe Kap. 5.1)
- Mächtigkeit des Bodens (BÜK 50)
- Sickerwasserrate
- Grundwasseroberfläche

3.3.1.2 Verweilzeit Grundwasserdeckschichten (Lockergestein)

$$t_{GWD} = \frac{1}{Q_{GWN}} \sum_i FK_i \cdot d_i$$

mit:

- t_{GWD} Verweilzeit GW-Deckschichten [a]
- Q_{GWN} Grundwasser-Neubildung [mm/a]
- FK_i Feldkapazität [mm/dm]
- d_i Schichtmächtigkeit [dm]

Ermittlung in Anlehnung an DIN 19732; empfohlene Vorgehensweise:

1. Übernahme aus Kartenwerken oder
2. Eigenständige messstellenscharfe Berechnung in Anlehnung an die DIN 1973 gemäß lithologischem Profil

Datengrundlagen bei eigenständiger Ermittlung wie bei 3.3.1, aber nutzbare Feldkapazität und Grundwasser-Neubildungsrate

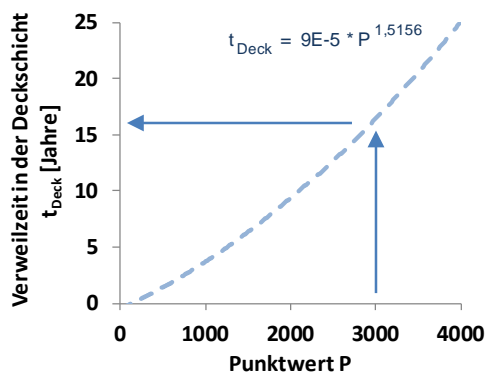


3.3.1.3 Verweilzeit Grundwasserdeckschichten (Festgestein)

$$P = P_{sw} \cdot \sum_i F_{Strukt} \cdot P_{gest} \cdot M_i$$

mit

P	Punktwert
P_{sw}	Sickerwasserfaktor
F_{Strukt}	Strukturwert
P_{gest}	Gesteinswert
M_i	Schichtmächtigkeit [m]



Ermittlung nach Hölting et al. 1995¹; empfohlene Vorgehensweise:

1. Übernahme der Daten aus flächenhaft vorhandenen Karten oder
2. Eigenständige Anwendung des Hölting-Verfahrens für die jeweilige Grundwassermessstelle

Das Verfahren basiert auf der Umrechnung der Punktwerte aus der Schutzfunktionsbewertung der Grundwasserüberdeckung in Anhaltswerte für Verweilzeiten (nähere Erläuterungen siehe Kap. 5). Hierbei wird nur der Verfahrensteil für Festgesteine unterhalb des Bodens verwendet.

Der Punktwert wird summarisch für die Schichten des lithologischen Profils zwischen Boden und Grundwasseroberfläche berechnet. In den Punktwert gehen über den Sickerwasserfaktor die Grundwasser-Neubildungsrate, die Mächtigkeit und gesteinsabhängige Faktoren ein.

¹: Hölting, B., Haertle, T., Hohberger, K.H., Nachtigall, K.H., Villinger, E., Weinzierl, W. & J.P. Wrobel (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. – Geol. Jb. C63, 5-24.

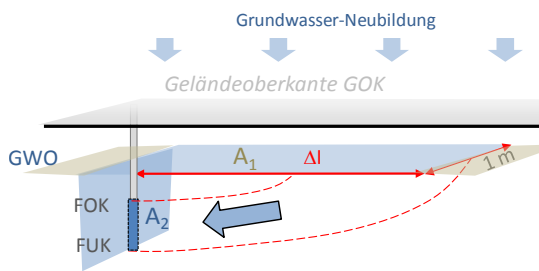
3.3.2 Ermittlung der Fließzeit (punktbezogener Ansatz / messstellenscharfe Betrachtung)

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:

- Teufe/Neubildungsverfahren (Grundwassermessstellen)
- Ermittlung der mittleren Verweilzeit (Quellen und Entnahmebrunnen)
- Strömungsmodellierung
- Altersdatierung mittels Tracern

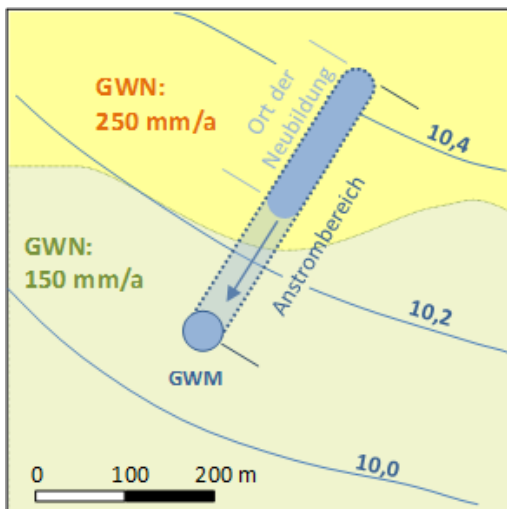
Die ersten beiden Verfahren erlauben eine einfache und praxisorientierte Ermittlung punktbezogener Fließzeiten. Anders als Altersdatierungen oder Strömungsmodellierungen sind hierfür keine erweiterten Kenntnisse und kein gesonderter Aufwand (Expertenwissen, vorhandene Modelle und Modellierkenntnisse, Aufwand für Probenahme und Spezialanalytik) erforderlich. Beide Verfahren stellen zwangsläufig einen Kompromiss bezüglich der erreichbaren Genauigkeit, der Aussagekraft bzw. der damit verbundenen Unsicherheiten dar. Letztlich sind beide Verfahren als Schätzverfahren einzustufen, die eine nachvollziehbare Ermittlung von Fließzeiten erlauben. Die Anwendung der beiden Verfahren wird im Folgenden kurz beschrieben.



$$\Delta L = \frac{(FUK - GWO) \cdot k_f \cdot grad_i}{GWN}$$

mit

- ΔL Fließstrecke [m]
- GWO Grundwasseroberfläche [m u GOK]
- FUK Filterunterkante [m u GOK]
- Grad_i hydraulischer Gradient
- GWN Grundwasserneubildung [m³/(m² s)]



Ergebnis Anwendungsbeispiel:
Fließstrecken vom Ort der Neubildung:
- bis FOK: 172 m
- bis FUK: 344 m

3.3.2.1 Teufe –Neubildungsverfahren: Ermittlung des Ortes der Neubildung

Die Berechnung der Fließzeit basiert auf dem Verhältnis zwischen Porosität des Grundwasserleiters und der mittleren Grundwasserneubildung im Anstrombereich der Grundwassermessstelle.

Da die Neubildung im Zustrombereich einer Messstelle unterschiedliche Werte aufweisen kann, muss zunächst der Ort der Neubildung ermittelt werden. Dieser wird für FOK und FUK aus einer Kombination eines Bilanzansatzes und der Darcy-Formel berechnet.

Daten:

- Lage der Grundwasseroberfläche [m NHN]
- Hydraulischer Gradient im Bereich der Messstelle [m/m]
- Grundwasserneubildung im Zustrom, z.B. nach GROWA, Mindestwert: 25 mm
- effektive Porosität [-]
(nur bei der Fließzeitberechnung)
- Mittlerer k_f -Wert des Profilabschnittes zwischen GWO und FUK [m/s]

Aus der Literatur entnommene Diagramme zur Ermittlung typischer hydraulischer Kenngrößen für Locker- und Festgesteine können Kapitel 5 entnommen werden.

Anwendungsbeispiel

GWN: 150 – 250 mm/a

grad *i*: 0,001

k_f : 6E-4 m/s

GOK 11,1 m NHN

FOK: 4,0 m u GOK;

FUK: 6,0 m u GOK

Empfohlenes iteratives Vorgehen:

Bei unterschiedlichen Neubildungsraten im Anstrom wird zunächst eine mittlere Neubildungsrate geschätzt und mit dieser der Anstrombereich berechnet. Anschließend wird die Neubildung flächengewichtet für den Anstrombereich ermittelt und erneut in die Berechnung eingesetzt.



3.3.2.2 Teufe-Neubildungsverfahren: Ermittlung der Fließzeit

$$t = (F - \text{GWO}) \frac{n_{\text{eff}}}{\text{GWN}_{\text{Mittel}}}$$

mit

- ΔT Fließzeit [m]
- GWO Grundwasseroberfläche [m u GOK]
- F Filtertiefe [m u GOK]
- n_{eff} effektive Porosität [-]
- GWN Grundwasserneubildung [mm/a]

Ergebnis Anwendungsbeispiel

Fließzeit vom Ort der Neubildung bis

- FOK: 1,8 Jahre

- FUK: 3,6 Jahre

Für eine vorgegebene Tiefe unterhalb des Grundwasserspiegels (im Formelbeispiel FUK) wird die Fließzeit aus dem Verhältnis zwischen effektiver Porosität und Neubildungsrate berechnet.

Nach Eingabe der hydraulischen Kenngrößen wird die Fließzeit für die Filterober- und -unterkante in der Excel-Datei berechnet. Als Kenngröße kann der arithmetische Mittelwert angegeben.

Für eine einfache Berechnung liegt dem Leitfaden eine Excel-Tabelle bei (→ Tabellenblatt „GWM“)

Allgemeine Daten und Ausbaudaten						Wasserstandsdaten				
Grundwasserkörper	Grundwassermessstelle	Verfahren anwendbar?	optional RW	optional HW	GOK mNN	Messpunkthöhe m NN	FOK m u GOK	FUK m u GOK	Wert	Bezugseinheit
GWK 007	GW-M15	Ja			12,10	12,10	4,0	6,0	10,1	GWO [m NHN]

aktuelle Nitratkonzentration mg/l	Lithologie		mittlere Grundwasserneubildung 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	1,8	3,6	2,7

Hinweis:

Wasserstandsdaten können in der Excel-Tabelle in unterschiedliche Bezugseinheiten eingegeben werden: als absolute Höhe in [m NN], als Flurabstand [m u GOK] und als Abstich [m u ROK]. Die Bezugseinheit muss über ein Auswahlfeld mit angegeben werden.

3.3.2.3 Hinweise zur Vorgehensweise und Anwendbarkeit des Teufe-Neubildungsverfahrens

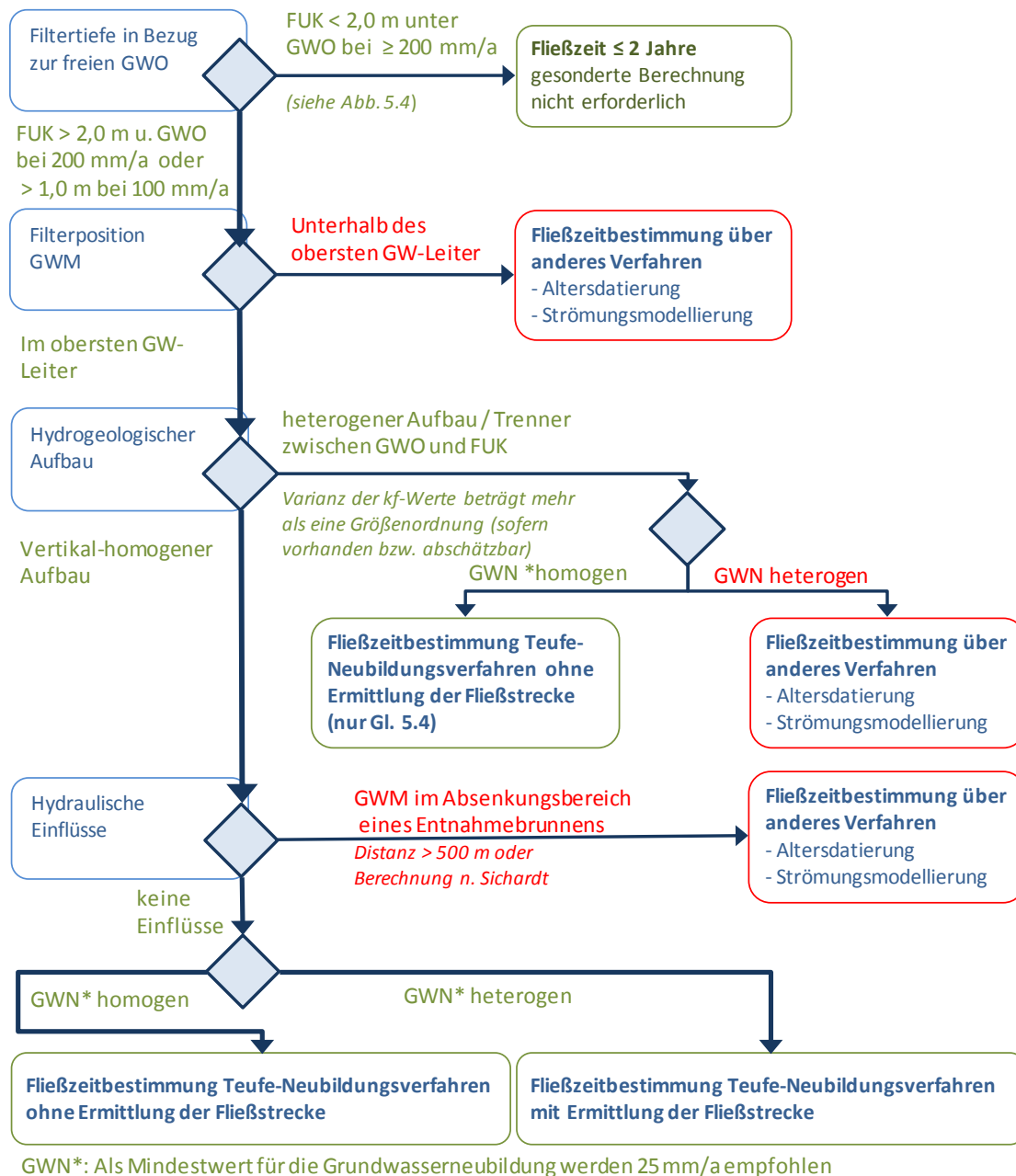
Das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Teufe-Neubildungsverfahren erlaubt eine einfache Berechnung der Fließzeit, ist aber nur bei vergleichsweise einfachen hydrogeologischen Verhältnissen anwendbar. Komplexere hydraulische oder hydrogeologische Verhältnisse erfordern numerische Strömungsmodelle oder alternativ Altersdatierungen.

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 sollte für die zu untersuchenden Messstellen eine Eignungsprüfung durchgeführt werden. Der Verfahrensgang ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



3.4 Ermittlung der Verweil- und Fließzeit – Brunnen und Quellen

Teilweise werden auch Quellwässer und Rohwässer von Wassergewinnungsgebieten (Brunnen oder Brunnengruppen) für die Bewertung des chemischen Zustands genutzt. Orientierend kann die Fließzeit über die mittlere Aufenthaltsdauer des Grundwassers im Einzugsgebiet abgeschätzt werden. Die Berechnung erfolgt für langjährig - stationäre Verhältnisse. Eine Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten ist prinzipiell möglich, aber vor allem bei stark heterogenen Strukturformationen (z.B. Karstgrundwasserleiter, Störungszonen) mit sehr hohen Unsicherheiten belastet. Bei höheren Unsicherheiten sollte eine Alterseinschätzung bevorzugt anhand von Altersdatierungen erfolgen. Hier haben sich u.a. Altersdatierungen mittels FCKW / SF6 oder Tritium/Helium etabliert.



3.4.1 Abschätzung der Verweilzeit

Die Verweilzeiten für Boden und Grundwasserdecksschichten können bei bekanntem Einzugsgebiet des Brunnens / der Brunnengalerie mittels GIS-Verschneidung und Mittelung der Rasterzellwerte ermittelt werden.

Daten:

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

3.4.2 Abschätzung der Fließzeit (mittlere Aufenthaltszeit)

Orientierend kann die Fließzeit über die mittlere Aufenthaltsdauer des Grundwassers im Einzugsgebiet abgeschätzt werden. Die Berechnung erfolgt für stationäre Verhältnisse.

$$\Gamma = \frac{\text{Grundwasservolumen_EZG}}{Q}$$

$$= \frac{A_{EZG} \cdot M_{GW} \cdot n}{Q}$$

mit

Q Förderrate, Quellschüttung [m^3/a]

A_{EZG} Fläche EZG [m^2]

M_{GW} Mittlere grundwassererfüllte Mächtigkeit [m]

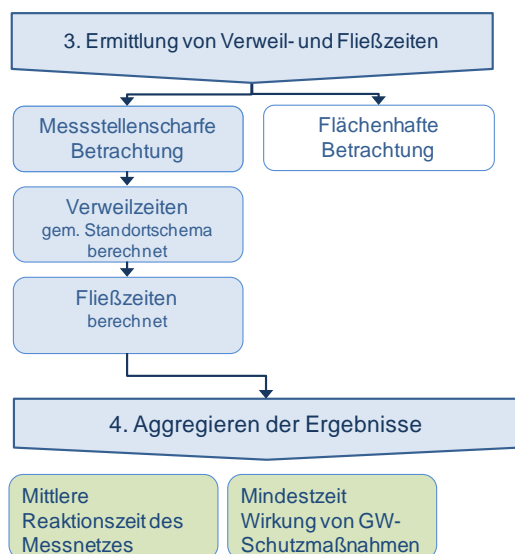
n Porosität

Folgende Daten werden benötigt:

- Mittlere Wasserentnahme bzw. Quellschüttung bei Quellen [m^3/a]
- Speichernutzbare Porosität [-]
- Mittlere grundwassererfüllte Mächtigkeit des betrachteten Grundwasserleiters im Einzugsgebiet [m]

Für eine einfache Anwendung ist in der beiliegenden Excel-Datei ein Tabellenblatt enthalten.

4 Aggregieren der Ergebnisse



Verweil- und Fließzeiten werden anschließend zu Kennzahlen für das Messnetz des Grundwasserkörpers zusammengefasst.

Die Summe von Verweil- und Fließzeiten gibt die Reaktionszeit einer Messstelle wieder. Über eine Mittelung aller Reaktionszeiten kann in einem ersten Schritt ein Kennwert für das Messnetz abgeleitet werden. Hierbei sollte anstelle des arithmetischen Mittels der gegenüber Ausreißern robustere Medianwert verwendet werden. Eine geeignete statistische Auswertung ist durch den Sachbearbeiter zu wählen.

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 das Messnetz den guten chemischen Zustand abbilden kann.

Eine einfache Aggregation ist bereits in der zur Verfügung gestellten Excel-Tabelle enthalten. Die weitere Auswertung der Daten obliegt der Sachbearbeitung.

5 Nutzung und Risiken bei der Anwendung punktbezogener Verfahren

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 Nitratreintrags ins Grundwasser, zu überprüfen. In der Praxis werden Grundwassermessstellen in einem GWK dort installiert, wo im Hinblick auf die hydrogeologische Standortssituation sowie die festgestellten Belastungen eine große Repräsentativität vorliegt.

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.



6 Ergänzende Erläuterungen und Tabellenwerte

6.1 Tabellenwerte, Kennwertdiagramme

Feldkapazität – nutzbare Feldkapazität

Petrographische Beschreibung	Feldkapazität ⁽¹⁾ mm/dm	nutzbare Feldkapazität ⁽²⁾ mm/dm
Grobsand	9	5
Mittelgrober Sand	12	6
Feinsand	17	9
Schluffig-lehmiger Sand	26	18
schluffig-lehmiger Sand	28	21
Schluffiger Sand	24	21
Sandig-lehmiger Schluff	31	22
Lehmiger Schluff	35	22
Stark lehmiger Schluff	36	21
Sandiger Lehm	32	16
Schluffiger Lehm	24	17
Toniger Lehm	38	12
Schluffig-toniger Lehm	40	15
Lehm oder schluffiger Ton	47	13
Ton	51	13
Torf	72	k. A.

(1): Zusammenstellung nach AG Bodenkunde (2002)

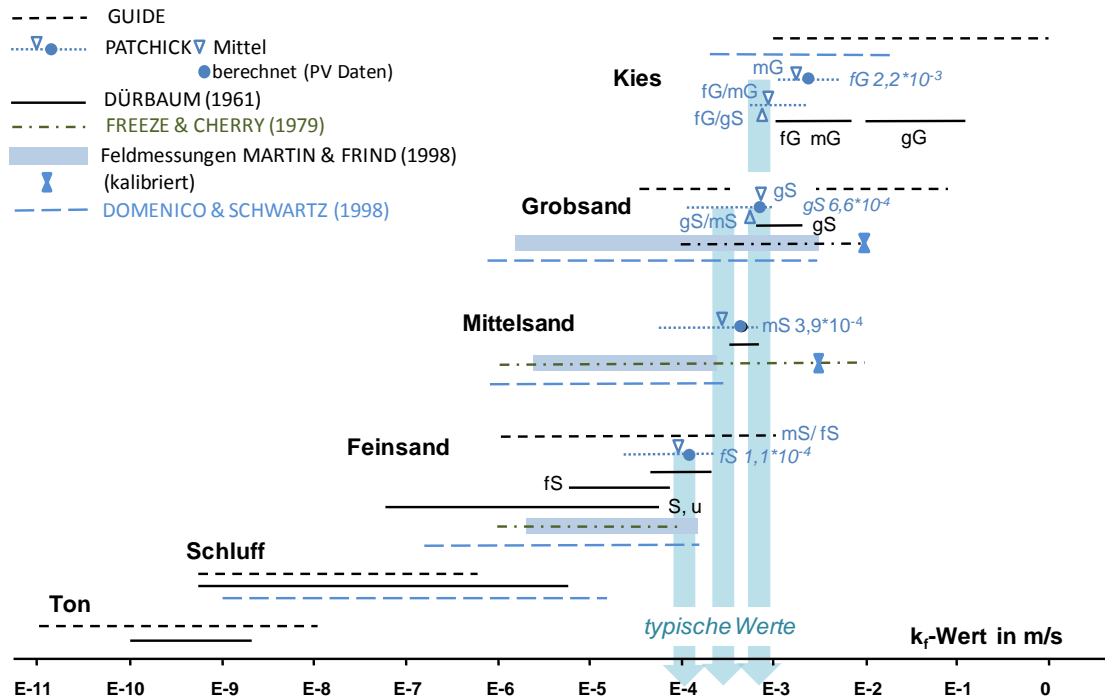
(2): Werte nach Bodenkundlicher Kartieranleitung KA 5, 2005. Jeweils für mittlere Trockenrohdichtestufe, für weitere Trockenrohdichten siehe KA 5, 2005.

Abschätzung von k_f -Werten

Körnung	Durchlässigkeitsbeiwert k_f m/s
reiner Kies	$10^{-1} - 10^{-2}$
grobkörniger Sand	$\sim 10^{-3}$
mittelkörniger Sand	$10^{-3} - 10^{-4}$
feinkörniger Sand	$10^{-4} - 10^{-5}$
schluffiger Sand	$10^{-5} - 10^{-7}$
toniger Schluff	$10^{-6} - 10^{-9}$
Ton	$< 10^{-9}$

Lockergestein

Tabelle links: Durchlässigkeitsbeiwerte der einzelnen Korngrößen nach DIN 18130-1 (Größenordnungen)



Gestein	Durchlässigkeitsbeiwert k_f m/s
Granit	$5 \cdot 10^{-13} - 2 \cdot 10^{-12}$
Kalkstein	$1 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-6}$
Kreide	$6 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-7}$
Sandstein	$1 \cdot 10^{-10} - 6 \cdot 10^{-6}$
Tonschiefer	$1 \cdot 10^{-13} - 2 \cdot 10^{-9}$
geklüftete Kristalline Gesteine	$8 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-4}$

Abb. oben: Größenordnung und Streubreite der k_f -Werte in Abhängigkeit von der Korngröße nach verschiedenen Methoden und Autoren (verändert und ergänzt nach Besenecker in Bender [Hrsg.] (1984).

Durchlässigkeitsbeiwerte ausgewählter Festgesteine (Größenordnungen) nach Domenico & Schwartz 1990 und Matthes & Ubell 1983.

Porosität in Lockergesteinen

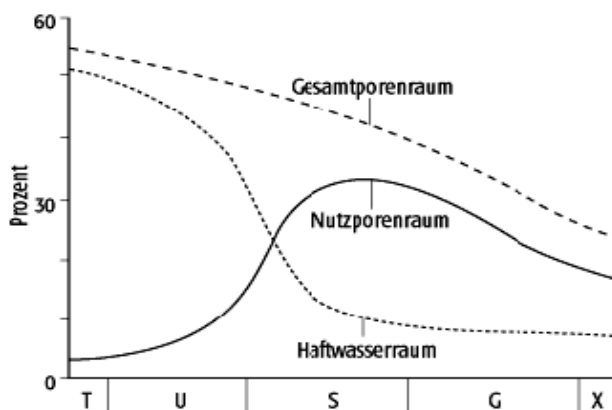


Abb. links.: Effektive Porosität in Lockergesteinen in Abhängigkeit von der Korngröße



Porosität in Festgesteinen

	effektives Kluftvolumen	effektives Porenvolumen	effektive Porosität	Mittelwert eff. Porosität
paläozoische Sedi- mentgesteine	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 Kalk- steine	1,5 - 2,0 %	< 0,1 %	1,5 - 2,0 %	1,75 %
Keupersandsteine und 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 %



6.2 Weiterführende Angaben zum Hölting-Verfahren

Im Rahmen des vorliegenden Leitfadens zur Ermittlung von Fließ- und Verweilzeiten wird das sogenannte Hölting-Verfahren nur bei der Ermittlung der Verweilzeit in den Grundwasserdeckschichten im Festgesteinsbereich eingesetzt.

Das Verfahren dient der Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung anhand von Punktwerten. Die Punktwerte aus der Schutzfunktionsbewertung der Grundwasserüberdeckung können dann in Anhaltswerte für die Verweilzeiten umgerechnet werden.

Für die einzelnen Festgesteinsschichten des lithologischen Profils der Messstelle werden die Punktwerte nach der folgenden Formel ermittelt und summiert. Aus der Gesamtpunktzahl wird dann die Verweilzeit ermittelt.

$$P = P_{sw} \cdot \sum_i F_{Strukt} \cdot P_{gest} \cdot M_i$$

mit

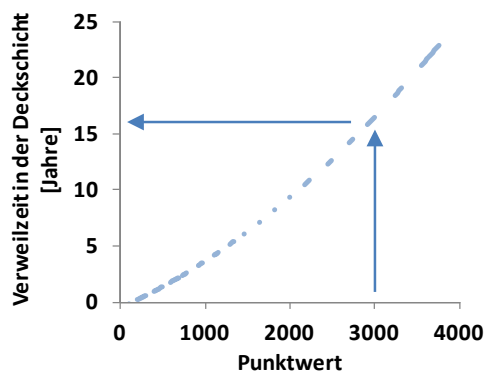
P Punktwert

P_{sw} Sickerwasserfaktor

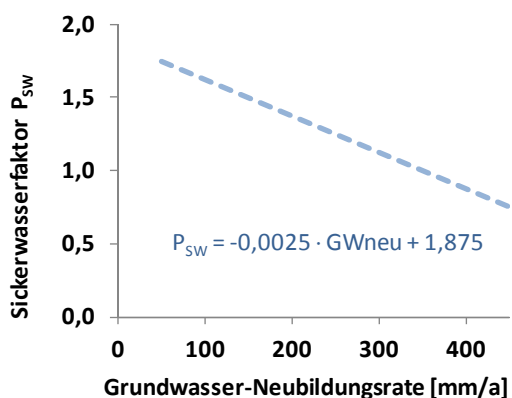
F Strukturwert

P Gesteinswert

M_i Schichtmächtigkeit [m]



Kennwertetabellen zur Ermittlung der einzelnen Punktwerte werden im Folgenden kurz aufgeführt. Für eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens wird auf die Originalliteratur verwiesen.



Sickerwasserfaktor P_{sw}

Der Sickerwasserfaktor richtet ergibt sich aus der Grundwasserneubildung. Eine Umrechnung kann anhand der im Diagramm angegebenen Formel erfolgen.

Grundwasserneubildung mm/a	P_{sw}
≤ 100	1,75
$> 100 - 200$	1,50
$> 200 - 300$	1,25
$> 300 - 400$	1,00
> 400	0,75



Strukturwert	F_{Struktur}
ungeklüftet	25
wenig geklüftet	4
Mittel geklüftet wenig verkarstet	1
Mittel verkarstet	0,5
Stark geklüftet, zerrüttet oder stark verkarstet	0,3
Nicht bekannt	1,0

Strukturwert F_{Struktur}

Die Durchlässigkeit von Festgesteinen hängt in erster Linie vom Grad der Klüftung ab. Diese wird über den Strukturwert abgebildet.

Gesteinsart	$P_{\text{Gest.}}$
Tonstein, Tonschiefer, Mergelstein, Schluffstein	20
Sandstein, Quarzit, vulkanische Festgesteine, Plutonite, Meta- morphite	15
Poröser Sandstein, poröse Vul- kanite (verfestigter Tuff)	10
Konglomerat, Brekzie Kalkstein, Kalktuff, Dolomitstein, Gipsstein	5

Gesteinswert $P_{\text{Gest.}}$

Je nach Gesteinsart werden unterschiedliche Gesteinswerte zugeordnet. Zusammen mit dem Strukturwert wird damit die Klüftbildungsneigung der Gesteine abgebildet.