

NLWKN.
Für Mensch und Umwelt.
Für Niedersachsen.

Bestimmung der Reaktionszeiten und Fließstrecken nach LAWA



Niedersachsen

Inhalt

1 Einleitung.....	1
2 Methodik	2
2.1 Kurzbeschreibung des Verfahrens	2
2.2 Datengrundlage	2
2.3 Messstellen	3
2.4 Praktische Umsetzung.....	4
2.5 Szenarien	6
3 Ergebnisse und Diskussion	8
3.1 Verweilzeiten in der ungesättigten Zone	8
3.2 Fließzeiten im Grundwasser	12
3.2.1 Ergebnisse.....	12
3.2.2 Abgleich mit Fachdaten.....	12
3.3 Reaktionszeiten der Grundwassermessstellen	15
3.3.1 Ergebnisse.....	15
3.3.2 Abgleich mit Fachdaten.....	17
3.4 Fließstrecken	17
3.5 Szenarienauswertung	19
3.5.1 Einfluss des Strukturfaktors.....	19
3.5.2 Einfluss der effektiven Porosität.....	20
3.5.3 Einfluss der hydraulischen Leitfähigkeit	23
3.6 Nitratkonzentrationen an Grundwassermessstellen mit kurzen Reaktionszeiten	25
3.7 Diskussion zur Anwendbarkeit des Verfahrens und zu methodischen Besonderheiten	26
4 Zusammenfassung und Fazit	27
Literatur- und Quellenverzeichnis	29

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Schema zu Verweil- und Fließzeiten vom Ort der Grundwasserneubildung (GWN) zur Grundwassermessstelle (GWM) mit kürzerer Fließbahn zur Filteroberkante (FOK) und längerer Fließbahn zur Filterunterkante (FUK) (bearbeitet nach (Hansen et al., 2018)). 2

Abbildung 2: Übersicht über die Ansätze zur Ermittlung der Verweil- und Fließzeiten in der ungesättigten Zone und im Grundwasser nach LAWA (2018a). 3

Abbildung 3: Lage der Grundwassermessstellen der Grundwassermessstellengruppen a) und b) (Kreise) in Niedersachsen. Die Nitratkonzentrationen entsprechen dem Mittelwert der Jahresmaxima 2015-2019. Die Kulisse der Gewässerschutzberatung besteht in diesem Umfang seit 2019. Die WRRL-Bewertung der GWK (Grundwasserkörper) beruht auf Daten aus dem Jahr 2021. 5

Abbildung 4: Lage der Grundwassermessstellen der Grundwassermessstellengruppen c) (Kreise) in Niedersachsen. Die Kulisse der Gewässerschutzberatung besteht in diesem Umfang seit 2019. Die WRRL-Bewertung der GWK (Grundwasserkörper) beruht auf Daten aus dem Jahr 2021. 5

Abbildung 5: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen an denen die Fließstrecken berechnet möglich war, bzw. nicht möglich war und Grundwassergleichen der HUEK200. 6

Abbildung 6: Verteilung der Grundwassermessstellen auf die verschiedenen Verweilzeit-Klassen 8

Abbildung 7: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen mit ihren zugehörigen Verweilzeiten in der ungesättigten Zone (UGZ). 9

Abbildung 8: Scatterplots der Verweilzeit in der ungesättigten Zone (UGZ) aufgetragen über der Grundwasserneubildung (GWN) (links) und über dem Flurabstand (rechts). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet. 9

Abbildung 9: Verteilung der Grundwassermessstellen auf die verschiedenen Fließzeit-Klassen abhängig von Filteroberkante, -unterkante oder -mitte. 13

Abbildung 10: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen mit ihren zugehörigen

Fließzeiten des Grundwassers (GW) vom Ort der Grundwasserneubildung zur Filtermitte. 13

Abbildung 11: Scatterplots der Fließzeit des Grundwassers (GW) aufgetragen über der Tiefe der Filteroberkante (FOK) (links) und über der Filterüberdeckung (rechts). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet. 13

Abbildung 12: Scatterplots der Fließzeit des Grundwassers der Messstellengruppen a) und b) aufgetragen über der Altersdatierung (links) und Fließzeit des Grundwassers der Messstellengruppen c) aufgetragen über der Altersdatierung (rechts). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet. 14

Abbildung 13: Balkendiagramm der Altersdatierungen (orange) an 29 Messstellen (NLWKN Messkampagne Okt. 2017) im Vergleich zu ihren berechneten Fließzeiten (blau) aufgetragen vom ältesten Grundwasser bis zum jüngsten von oben nach unten. Fließzeiten < 1 Jahr werden hier mit 0,5 Jahren dargestellt. 14

Abbildung 14: Verteilung der Grundwassermessstellen auf die verschiedenen Reaktionszeit-Klassen. 15

Abbildung 15: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen mit ihren zugehörigen Reaktionszeiten des Grundwassers (GW) vom Ort der Grundwasserneubildung zur Filtermitte. 16

Abbildung 16: Scatterplots der Reaktionszeit aufgetragen über der Tiefe der Filteroberkante (FOK) (links) und über der Filterüberdeckung (rechts). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet. 16

Abbildung 17: Scatterplot der Reaktionszeit berechnet nach dem LAWA-Verfahren aufgetragen über der Reaktionszeit MTA nach Wriedt (2017). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet. 17

Abbildung 18: Verteilung der Grundwassermessstellen auf die verschiedenen Fließstrecken-Klassen abhängig von Filteroberkante, -unterkante oder -mitte. 18

Abbildung 19: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen mit ihren zugehörigen Fließstrecken vom Ort der Grundwasserneubildung bis zur Filtermitte. 18

Abbildung 20: Scatterplots der Fließstrecken aufgetragen über der Tiefe der Filteroberkante (FOK) (links) und über der Filterüberdeckung (rechts). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet.	19	hinsichtlich des Einflusses der effektiven Porosität im Lockergestein.....	22
Abbildung 21: Scatterplots der Differenz der Fließstrecke zwischen Filterober- und Filterunterkante (FOK-FUK) aufgetragen über der Filtermächtigkeit (links) und der Fließstrecke zur Filtermitte (rechts). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet.	19	Abbildung 30: Prozentuale Anteile der in die Berechnung eingegangenen hydraulischen Leitfähigkeiten (kf-Werte) in Szenario 1, 4, 5, 6 und 7 im Lockergestein.	24
Abbildung 22: Prozentuale Anteile der berechneten Verweilzeiten der Szenarien 1, 8 und 9 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses des Strukturfaktors.....	20	Abbildung 31: Prozentuale Anteile der berechneten Fließstrecken (Filtermitte) der Szenarien 1, 4, 5, 6 und 7 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses der hydraulischen Leitfähigkeit (kf-Werte) im Lockergestein.....	24
Abbildung 23: Prozentuale Anteile der berechneten Reaktionszeiten der Szenarien 1, 8 und 9 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses des Strukturfaktors.....	20	Abbildung 32: Entwicklung der Nitratkonzentration an Grundwassermessstelle 100000864.*	25
Abbildung 24: Prozentuale Anteile der in die Berechnung eingegangenen effektiven Porosität (neff) in Szenario 1 und 2 im Festgestein.....	21	Abbildung 33: Entwicklung der Nitratkonzentration an Grundwassermessstelle 40000237.*	25
Abbildung 25: Prozentuale Anteile der berechneten Fließzeiten (Filtermitte) der Szenarien 1 und 2 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses der effektiven Porosität im Festgestein.	21	Abbildung 34: Entwicklung der Nitratkonzentration an Grundwassermessstelle 9610839.*	25
Abbildung 26: Prozentuale Anteile der berechneten Reaktionszeiten der Szenarien 1 und 2 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses der effektiven Porosität im Festgestein.	21	Abbildung 35: Entwicklung der Nitratkonzentration an Grundwassermessstelle 500002799.*	26
Abbildung 27: Prozentuale Anteile der in die Berechnung eingegangenen effektiven Porosität (neff) in Szenario 1 und 2 im Lockergestein.....	22	Abbildung 36: Entwicklung der Nitratkonzentration an Grundwassermessstelle 120900003.*	26
Abbildung 28: Prozentuale Anteile der berechneten Fließzeiten (Filtermitte) der Szenarien 1 und 2 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses der effektiven Porosität im Lockergestein.	22	Abbildung 37: Entwicklung der Nitratkonzentration an Grundwassermessstelle 139501560.*	26
Abbildung 29: Prozentuale Anteile der berechneten Reaktionszeiten der Szenarien 1 und 2 im Vergleich		Tabelle 1: Datengrundlage und Herkunftsquellen	3
		Tabelle 2: Eingangsdaten (effektive Porosität, hydraulische Leitfähigkeit, Strukturfaktor) in die Berechnung der einzelnen Szenarien SZ01 – SZ09 unterteilt nach Einflussbereich (Fließzeit, Fließstrecke, Verweilzeit).	7
		Tabelle 3: Verweil-, Fließ-, Reaktionszeiten und Fließstrecken an den Grundwassermessstellen sowie die Parameter Gesteinstyp, Flurabstand, Daten zum Filter und der Grundwasserneubildung	10
		Tabelle 4: Übersicht über die Quellen der eingesetzten hydraulischen Leitfähigkeiten (kf-Werte) pro Szenario	23

Abkürzungsverzeichnis

EG-WRRL	- EG-Wasserrahmenrichtlinie
d	- Schichtmächtigkeit
dL	- Fließstrecke
F	- Filtertiefe
F _{Struktur}	- Strukturwert
FG	- Festgestein
FK	- Feldkapazität
FOK	- Filteroberkante
FUK	- Filterunterkante
GOK	- Geländeroberkante
grad	- hydraulischer Gradient
GrwV	- Grundwasserverordnung
GW	- Grundwasser
GWL	- Grundwasserleiter
GWM	- Grundwassermessstelle
GWN	- Grundwasserneubildung
GWO	- Gewässeroberfläche
k _f	- hydraulische Leitfähigkeit
LAWA	- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LG	- Lockergestein
n _{eff}	- effektive Porosität
nFK	- nutzbare Feldkapazität
P	- Punktwert
P _{SW}	- Sickerwasserfaktor
P _{Gestein}	- Gesteinswert
Q _{SW}	- Sickerwasserrate
t _{BO}	- Verweilzeit im Boden
t _{GWd,LG}	- Verweilzeit in der Grundwasserdeckschicht des Lockergesteins
t _{GWd,FG}	- Verweilzeit in der Grundwasserdeckschicht des Festgesteins
t _{GW}	- Fließzeit im Grundwasser
WHG	- Wasserhaushaltsgesetz

1 Einleitung

Mit dem Inkrafttreten der EG-WRRL im Jahr 2000 wurden verbindliche Umweltziele für Oberflächengewässer und Grundwasser über europäische Ländergrenzen hinweg festgelegt. Die übergeordneten Ziele für das Grundwasser zielen auf den Erhalt und die Wiederherstellung eines guten mengenmäßigen und chemischen Zustands. Ein wichtiger Aspekt dabei ist es, die in zahlreichen Gebieten steigenden Nähr- und Schadstofftrends umzukehren. Das implementierte Verschlechterungsverbot stellt zudem fest, dass keine anthropogenen Eingriffe zu einer Verschlechterung des Grundwasserkörperzustandes führen dürfen. Dieses kann über die Festsetzung von Maßnahmen erreicht werden, deren Ziel es ist die Einleitung von Schadstoffen ins Grundwasser zu verhindern oder zu begrenzen. Die Frist für das Erreichen der Umweltziele wurde auf das Jahr 2015 festgelegt. Bestimmte Voraussetzungen ermöglichten eine zweimalige Fristverlängerung um jeweils 6 Jahre.

Neben der Erstbewertung der Oberflächenwasser- und der Grundwasserkörper galt es innerhalb der ersten 9 Jahre die ersten Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme zu erstellen. Der aktuelle nunmehr dritte Bewirtschaftungsplan und Maßnahmenprogramm führt fort, entwickelt und optimiert das Monitoring und die wasserwirtschaftlichen Vorgaben und Aktivitäten. Zusätzlich zu den grundlegenden Maßnahmen bietet das Land Niedersachsen seit vielen Jahren unterschiedliche ergänzende Maßnahmen zum Grundwasserschutz an. Zu diesen freiwilligen Angeboten gehören die Gewässerschutzberatung und die Agrar-Umwelt-Maßnahmen, deren Ziel die Reduktion der Nitratreinträge ist. Zu der Kulisse gehören insbesondere die besonders gefährdeten Teilgebiete der Grundwasserkörper außerhalb von Wasserschutzgebieten, deren Zustand nach EG-WRRL als *chemisch schlecht* bewertet wurde (Eden et al., 2017).

Außerhalb der Zielkulisse der Gewässerschutzberatung gibt es weitere Teilflächen von Grundwasserkörpern im *guten chemischen Zustand* nach EG-WRRL, in denen sich Grundwassermessstellen befinden, deren Wasser erhöhte Nitratgehalte aufweist. Nach WRRL und in der nationalen Umsetzung der Richtlinie, der GrwV, liegt der Schwellenwert für Nitrat bei 50 mg/L. Dieser Wert wurde ebenfalls in der Tochterrichtlinie der EG-WRRL, der EG-Grundwasserrichtlinie (2006/118/EG) aufgegriffen und dadurch abermals europaweit als einheitlich geltende Qualitätsnorm festgelegt.

Ein weiteres wichtiges Instrument, die Wasserverunreinigung durch Nitrat zu verringern und zu verhindern, stellt die EU-Nitratrichtlinie dar. In ihr werden Gebiete, in denen die Nutzungseinflüsse der Landwirtschaft dominieren und in denen eutrophe Gewässer vorliegen oder der Schwellenwert von 50 mg/L überschritten wird, als nitratgefährdete Gebiete definiert. Bis zur Änderung der Düngeverordnung (DüV) 2020 wurde das Aktionsprogramm der EU-Nitratrichtlinie auf dem gesamten deutschen Staatsgebiet angewendet und wies damit keine gefährdeten Gebiete im Sinne der EU-Nitratrichtlinie aus. Mit der Änderung der DüV 2020 und der

Einführung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung von mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebieten (AVV GeA, 2022) wird die Neuausweisung der Gebiete umgesetzt. Gebiete, in denen ein erkennbares Potential zur Überschreitung der Kriterien besteht, sind demnach ebenfalls als gefährdete Gebiete auszuweisen. In den nun verpflichtend auszuweisenden gefährdeten Gebieten werden dann Aktionsprogramme mit verstärkten Maßnahmen zur Reduktion von Nitrat aufgestellt und umgesetzt, während die bisherigen Aktionsprogramme weiterhin auf dem restlichen Staatsgebiet Anwendung finden.

Der Zustand des Grundwassers wird mithilfe einer Vielzahl von Grundwassermessstellen überwacht, die nach festgelegten Kriterien ausgewählt und zweckmäßigen Messnetzen zugeteilt werden. Jede Messstelle hat ein begrenztes Einzugsgebiet aus dem das Grundwasser der Grundwassermessstelle zufließt. Die Zeitspannen zwischen der Grundwasserneubildung und dem Erreichen der Grundwassermessstelle (Reaktionszeit) können wenige Jahre bis Jahrhunderte umfassen, wie auch die Fließstrecke vom Ort der Grundwasserneubildung zur Messstelle wenige Meter bis mehrere Kilometer annehmen kann. Verantwortlich dafür sind unter anderem natürliche Standortfaktoren wie die Höhe der Grundwasserneubildung, die hydraulischen Verhältnisse auf dem Fließweg oder die Tiefe der Filterlage.

Die Reaktionszeit der Grundwassermessstellen kann ein Grund dafür sein, dass trotz zielführender und effizient umgesetzter Grundwasserschutzmaßnahmen auch zum Ende der ersten Fristverlängerung im Gesamtbild der Messstellen der Monitoringmessnetze kein Rückgang der Nitratkonzentrationen im Grundwasser zu verzeichnen ist (Eden et al., 2017; LAWA, 2020). Um weitere Fristverlängerungen nach § 29 und § 47 Absatz 2 WHG (Art. 4 Abs. 4 WRRL) zu erwirken oder abweichende Bewirtschaftungsziele nach § 30 und § 47 Absatz 3 Satz 2 WHG (Art. 4 Abs. 5 WRRL) zu begründen, müsste die zeitliche Verzögerung des potentiellen Rückgangs der Nitratkonzentrationen durch die Reaktionszeit der Grundwassermessstellen plausibel dargelegt werden.

Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung liegen für die Grundwassermessstellen der niedersächsischen Messnetze keine öffentlich zugänglichen Daten zu den Reaktionszeiten der Grundwassermessstellen oder den Fließstrecken vom Neubildungsgebiet zu den Messstellen vor. Im Zuge der Charakterisierung von Messstellen aus der Maßnahmenkulisse Nitratreduktion konnten Kenntnisse zu Transportstrecken und -zeiten gewonnen werden, die dem NLWKN intern vorliegen (Wriedt, 2017). Zusätzlich wurden Altersdatierungen an einzelnen Grundwassermessstellen (NLWKN Messkampagne Okt. 2017) durchgeführt, deren Daten ebenfalls für interne Auswertungen Verwendung finden.

In einem Abschlussbericht der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) wurde 2018 eine Arbeitshilfe zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie zur Ermittlung von Reaktionszeiten und Fließstrecken vorgestellt (i. F. LAWA-Verfahren) (LAWA, 2018a). Sie bietet eine Hilfestellung für die

Abschätzung dieser Parameter und kann damit Anhaltspunkte für einen Zeithorizont für die Reaktion der Messstellen hinsichtlich durchgeführter Maßnahmen liefern (LAWA, 2020). In diesem Bericht findet das LAWA-Verfahren Anwendung für einen Messstellenpool von 79 Messstellen. Die Ergebnisse werden soweit möglich mit den Reaktionszeiten bzw. Grundwasseraltern der vorangegangenen Untersuchungen verglichen.

Für die Bearbeitung standen folgende Leitfragen im Mittelpunkt:

- Wie groß sind die Reaktionszeiten und Fließstrecken der betrachteten Grundwassermessstellen?
- Gibt es Messstellen, bei denen eine Veränderung der Nitrattrends als Folge umgesetzter Grundwasserschutzmaßnahmen zeitnah sichtbar sein könnte?
- Welche Unsicherheiten bezüglich der berechneten Zeitspannen und Fließstrecken ergeben sich?
- Ist die vorliegende Datengrundlage für die Anwendung des LAWA-Verfahrens ausreichend?
- Ist das LAWA-Verfahren ein praktisches Tool zur plausiblen Abschätzung von Reaktionszeiten und Fließstrecken?

2 Methodik

2.1 Kurzbeschreibung des Verfahrens

Die Reaktionszeiten von Grundwassermessstellen nach dem LAWA-Verfahren ergeben sich aus der Addition der Verweilzeiten im Boden und in den Grundwasserdeckschichten und der Fließzeit des Grundwassers vom Ort der Neubildung bis zur Messstelle (Abbildung 1). Außerdem kann mithilfe des Verfahrens die Fließstrecke vom Neubildungsgebiet bis zur Messstelle kalkuliert werden. Laut Verfahren können die Ergebnisse Hinweise zur Wirksamkeit durchgeführter Maßnahmen im Einzugsgebiet der Messstelle liefern, da es auf einer punktbezogenen Betrachtung beruht (LAWA, 2018b).

Abbildung 2 bietet einen Überblick über die einzelnen Ansätze, die in die Ermittlung der Reaktionszeit und Fließstrecke eingehen. Die Verweilzeit im Boden (bis 2 m unter Geländeoberkante) wird nach dem Überschlagansatz der DIN 19732 ermittelt. Die Verweilzeit in der Grundwasserdeckschicht, welche als die ungesättigte Zone zwischen Boden und Grundwasseroberfläche definiert ist, wird unterteilt nach Locker- und Festgestein entweder ebenfalls nach DIN 19732 oder nach dem Schätzverfahren von Hölting et al. (1995) bestimmt. Die Fließzeit und Fließstrecke im Grundwasser werden nach dem durch die LAWA entwickelte Teufe-Neubildungs-Verfahren berechnet. Das pragmatische Schätzverfahren stellt eine Möglichkeit zur einfachen Einordnung der Fließzeiten dar. Es basiert auf einem Wasserbilanzansatz in Kombination mit dem Darcy-Gesetz (LAWA, 2018a).

Es wird jedoch explizit betont, dass mit der Einfachheit des Verfahrens ein Kompromiss in Bezug auf die erreichbare Genauigkeit und den Grad der Unsicherheit der Ergebnisse einhergeht (LAWA, 2018b). In den Anwendungskriterien wird darauf hingewiesen, dass die betrachteten Grundwasserleiter weitgehend homogen aufgebaut und hydraulisch unbeeinflusst sein sollten. Die Grundwasseroberfläche sollte ungespannt sein. Außerdem werden Grundwasserneubildungsraten von mindestens 25 mm/a bei im Festgestein verfilterten Grundwassermessstellen und 50 mm/a bei im Lockergestein verfilterten Grundwassermessstellen vorausgesetzt (LAWA, 2018b). Weiterführende Informationen zu den einzelnen Verfahren sind im Abschlussbericht der LAWA zur Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten enthalten (LAWA, 2018a).

2.2 Datengrundlage

Die für die Verfahren benötigten Daten umfassen sowohl messstellenbezogene Stammdaten und Messwerte, sowie regionale Kenngrößen und abgeleitete Parameter. Tabelle 1 enthält eine Übersicht über die Datengrundlage und ihrer Herkunftsquellen.

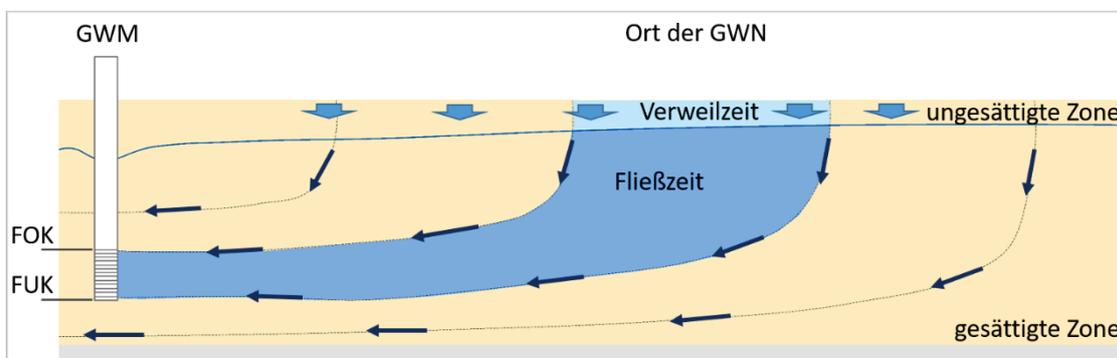
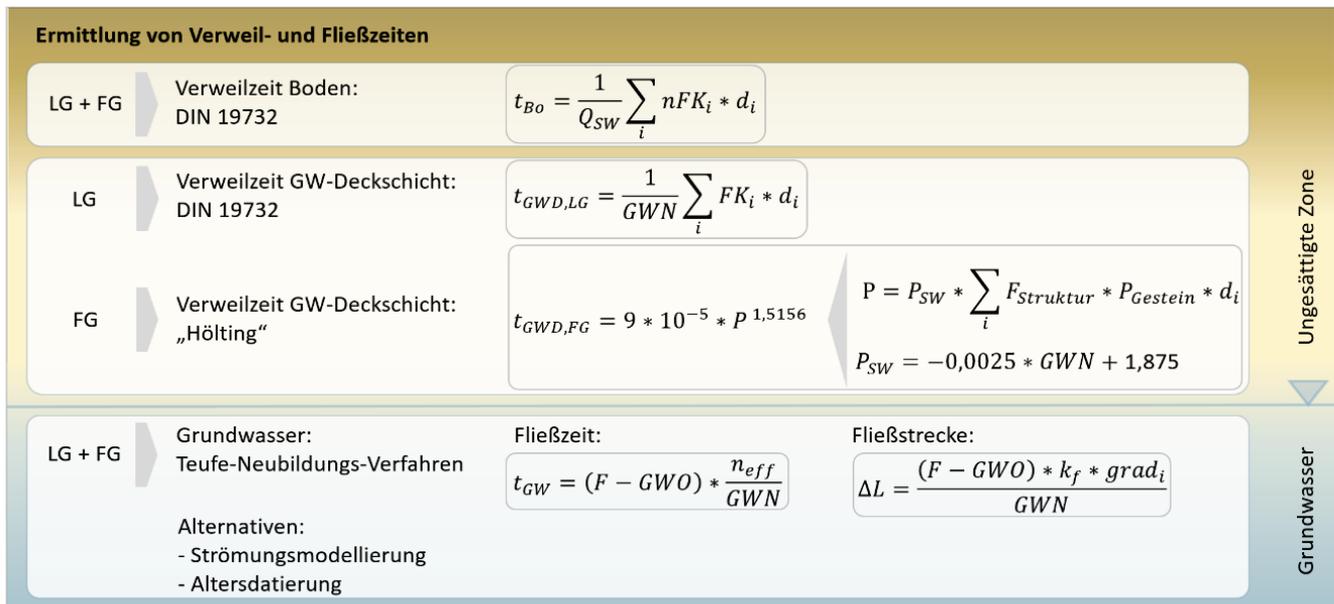


Abbildung 1: Schema zu Verweil- und Fließzeiten vom Ort der Grundwasserneubildung (GWN) zur Grundwassermessstelle (GWM) mit kürzerer Fließbahn zur Filteroberkante (FOK) und längerer Fließbahn zur Filterunterkante (FUK) (bearbeitet nach (Hansen et al., 2018)).



LG: Lockergestein, FG: Festgestein
 t_{Bo} : Verweilzeit Boden [a], Q_{SW} : Sickerwasserrate [mm/a], nFK_i : nutzbare Feldkapazität [mm/d], d_i : Schichtmächtigkeit [dm]
 $t_{GWD, LG}$: Verweilzeit Grundwasserdeckschicht [a], GWN: Grundwasserneubildung [mm/a], FK_i : Feldkapazität [mm/d], d_i : Schichtmächtigkeit [dm]
 $t_{GWD, FG}$: , P: Punktwert, P_{SW} : Sickerwasserfaktor, $F_{Struktur}$: Strukturwert, $P_{Gestein}$: Gesteinswert, d_i : Schichtmächtigkeit [m], GWN: Grundwasserneubildung [mm/a]
 t_{GW} : Fließzeit Grundwasser [a], F: Filtertiefe [m], GWO: Grundwasseroberfläche [m], n_{eff} : effektive Porosität [-], GWN: Grundwasserneubildung [mm/a]
 ΔL : Fließstrecke [m], k_f : hydraulische Leitfähigkeit [m/s], $grad_i$: hydraulischer Gradient [-]

Abbildung 2: Übersicht über die Ansätze zur Ermittlung der Verweil- und Fließzeiten in der ungesättigten Zone und im Grundwasser nach LAWA (2018a).

Tabelle 1: Datengrundlage und Herkunftsquellen

Daten	Quellen
Stamm- und Abstichsdaten der Messstellen	AqualInfo-Datenbank des NLWKN
Schichtenverzeichnisse der Messstellen	AqualInfo-Datenbank des NLWKN, NLWKN-Betriebsstellen, NIBIS Kartenserver (LBEG)
Mittlere Grundwasserneubildung (1983 – 2005)	GROWA-Modellergebnisse (FZ Jülich, AGRUM Niedersachsen, Ackermann et al., 2015)
Grundwassergleichenpläne HK50 und HUEK200	NIBIS Kartenserver (LBEG)
(nutzbare) Feldkapazität	Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005)
Festgesteinsfaktoren	Hölting et al. (1995)
Hydraulische Leitfähigkeit	Funktionsprüfungen der NLWKN-Betriebsstellen, Zusammenstellung des LAWA-Verfahrens (DIN 18130-1; Domenico and Schwartz, 1990; Matthes and Ubell, 1983; Schäfer, 2021), weitere Literatur (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005; Hölting and Coldewey, 2013), HUEK250 (BGR, 2019)
Effektive Porosität	Zusammenstellung des LAWA-Verfahrens (Kuhr et al., 2014; Kunkel, 1994; Kunkel and Wendland, 1999), ergänzt durch weitere Literatur (Hölting and Coldewey, 2013)

2.3 Messstellen

Zum Zeitpunkt dieser Auswertung im Zuge der Neuausweisung mit Nitrat belasteter Gebiete nach AVV GeA (2022)

waren 79 Messstellen von besonderem Interesse für die Bestimmung der Reaktionszeiten und Fließstrecken nach LAWA-Verfahren. Der Messstellenpool umfasst niedersachsenweit 76 Beobachtungsbrunnen, 2 Förderbrunnen und eine Quelle (Abbildung 3) und lässt sich in zwei Messstellengruppen aufteilen:

- a) Messstellen mit Überschreitung des Schwellenwertes (50 mg/L) oder steigendem Trend bei Konzentrationen > 37,5 mg/L in Typflächen/Teilräumen, die nach Risikoabschätzung als *nicht signifikant gefährdet* eingestuft wurden und sich in Grundwasserkörper im *schlechten chemischen Zustand* nach Zustandsbewertung der EG-WRRL für den Parameter Nitrat befinden
- b) Messstellen mit Überschreitung des Schwellenwertes (50 mg/L) oder steigendem Trend bei Konzentrationen > 37,5 mg/L und sich in Grundwasserkörpern im *guten chemischen Zustand* nach WRRL nach Zustandsbewertung der EG-WRRL für den Parameter Nitrat befinden

Die betrachteten Nitratkonzentrationen entsprechen dem Mittelwert der Jahresmaxima der Jahre 2015-2019. Im Messstellenpool liegt die Nitratkonzentration bei 6 % der Messstellen zwischen 37,5 mg/L und 50 mg/L, der Großteil von 73 % zwischen 50 mg/L und 100 mg/L und bei 19 % der Messstellen sogar > 100 mg/L, was mehr als dem Doppelten des Schwellenwerts entspricht.

Darüber hinaus wurden zusätzlich die Verweil-, Fließ- und Reaktionszeiten für 29 weitere Grundwassermessstellen (Messstellengruppe c) berechnet (Abbildung 4), darunter zwei Messstellen, die in unterschiedlichen Tiefen verfiltert sind und nebeneinander liegen. Die Messstellen der Gruppe c) fanden Berücksichtigung in einer Altersdatierungskampagne, die im Rahmen des GLD Monitorings im Oktober 2017 stattfand. Die ermittelten Grundwasseralter bieten potentiell die Möglichkeit die Ergebnisse der berechneten Fließzeit des LAWA-Verfahrens zu plausibilisieren.

- c) Messstellen, für die im Rahmen des GLD Monitorings das Grundwasseralter mittels Altersdatierung ermittelt wurden

2.4 Praktische Umsetzung

Die Stammdaten der Messstellen sowie die anderen Grundlagendaten wurden in eine neu angelegte Datenbank (Microsoft Access) eingespeist. Die Zuordnung und Zusammenstellung der Eingangsdaten der einzelnen Messstellen für die Berechnung, sowie die Berechnung der Reaktionszeiten und Fließstrecken und die Auswertung der Ergebnisse wurden innerhalb dieser Datenbank realisiert. Zur graphischen Darstellung und weiterführenden Auswertung der Ergebnisse wurden die Software-Produkte R (R Core Team, 2020), ArcGIS (ArcMap 10.5.1) sowie Grapher™ (Golden Software) verwendet.

Die Berechnungen der Verweilzeiten im Boden und der Grundwasserdeckschicht im Lockergestein erfolgen nach derselben DIN (DIN 19732). Sie unterscheiden sich hinsichtlich zweier Eingangsparameter. Während in die Berechnung der Verweilzeit in der Grundwasserdeckschicht die Feldkapazität und die Grundwasserneubildung eingehen, sind für die

Berechnung der Verweilzeit im Boden die nutzbare Feldkapazität und, sofern vorhanden, die örtliche Sickerwasserrate vorgesehen. Unter der vereinfachten Annahme, dass 100 % des Sickerwassers in Grundwasser umgesetzt wird, wurde als Sickerwasserrate die Grundwasserneubildung nach GROWA (Ackermann et al., 2015) eingesetzt.

Die mittlere Grundwasserneubildung wurde mithilfe der Software ArcGIS aus den Rasterdaten der Grundwasserneubildung des Wasserhaushaltsmodells GROWA (Ackermann et al., 2015) entlang identifizierter Grundwasserfließpfade oder, falls kein Fließpfad bestimmt werden konnte, in einem Umkreis von 500 m um die Grundwassermessstelle ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass durch diese regionale Eingrenzung eine charakteristische Grundwasserneubildung für das relevante Fließsystem erfasst werden kann.

Die Fließzeiten des Grundwassers vom Grundwasserneubildungsgebiet bis zum Filter der Grundwassermessstellen wurden jeweils für die Filteroberkante, -unterkante und -mitte kalkuliert (Abbildung 1). Nach Sichtung der Unterlagen wurden in Einzelfällen ein potentiell gespannter Grundwasserleiter festgestellt (zum Beispiel Grundwassermessstelle 40000439) oder es wurden neben grundwasserführenden Schichten auch grundwasserhemmende oder grundwasserstauende Schichten in der Filterlage der Messstellen vorgefunden (zum Beispiel Grundwassermessstelle 40003616). Diese Messstellen wurden gesondert betrachtet. War eine Berechnung hinsichtlich der Datengrundlage grundsätzlich möglich, wurde die Fließzeit für den Teil des Filters berechnet, mit dem der Grundwasserleiter erschlossen wurde. Generell ist bei der Berechnung der Fließzeit zu beachten, dass die Ergebnisse aufgrund der angesetzten maximalen effektiven Porosität Mindestfließzeiten darstellen.

Die Reaktionszeit einer Grundwassermessstelle ergibt sich aus der Summe der Verweilzeit in der ungesättigten Zone und der Fließzeit im Grundwasser. Sie wurde nur angegeben, wenn für beide Berechnungen Ergebnisse vorlagen. Entsprechend der Fließzeiten stellen die ermittelten Reaktionszeiten ebenfalls Mindestreaktionszeiten dar.

Die Fließstrecke vom Grundwasserneubildungsgebiet zur Grundwassermessstelle wurde genauso wie die Fließzeit des Grundwassers jeweils für die Filteroberkante, -unterkante und -mitte ermittelt. Das Fließgefälle (hydraulischer Gradient der Grundwasseroberfläche) am Ort der Messstelle ist einer der Eingangsparameter für die Berechnung, welcher aus den vorliegenden Grundwassergleichenplänen der HK50 oder der HUEK200 abgeleitet wurde. Für Messstellen im Bergland und im Bergvorland im Süden und Südosten von Niedersachsen (z.B. Braunschweig-Hildesheimer Lössbörde und Calenberger Lössbörde), in denen Festgesteinsgrundwasserkörper dominieren, war die Bestimmung des Gradienten größtenteils nicht möglich, da keine Grundwassergleichenpläne in diesen Bereichen vorliegen (Abbildung 5). Für einige andere Grundwassermessstellen war eine plausible Bestimmung des Fließgefälles trotz vorliegender Grundwassergleichenpläne nicht möglich aufgrund der Lage der Messstellen, zum Beispiel in einer Niederung.

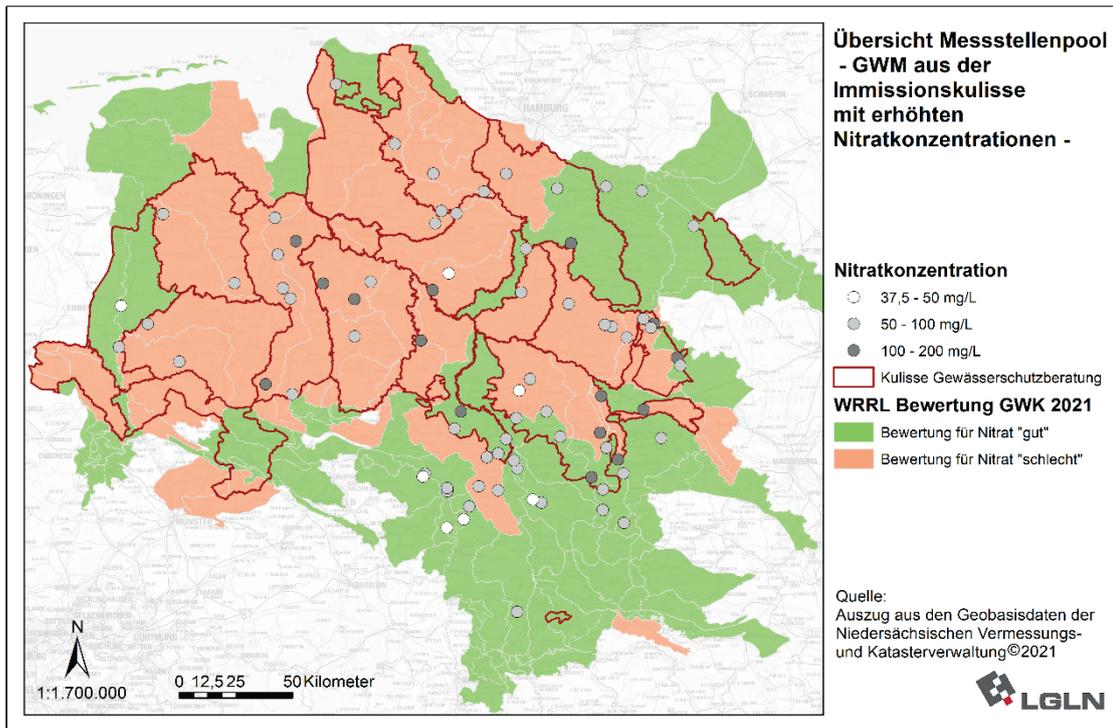


Abbildung 3: Lage der Grundwassermessstellen der Grundwassermessstellengruppen a) und b) (Kreise) in Niedersachsen. Die Nitratkonzentrationen entsprechen dem Mittelwert der Jahresmaxima 2015-1019. Die Kulisse der Gewässerschutzberatung besteht in diesem Umfang seit 2019. Die WRRL-Bewertung der GWK (Grundwasserkörper) beruht auf Daten aus dem Jahr 2021.

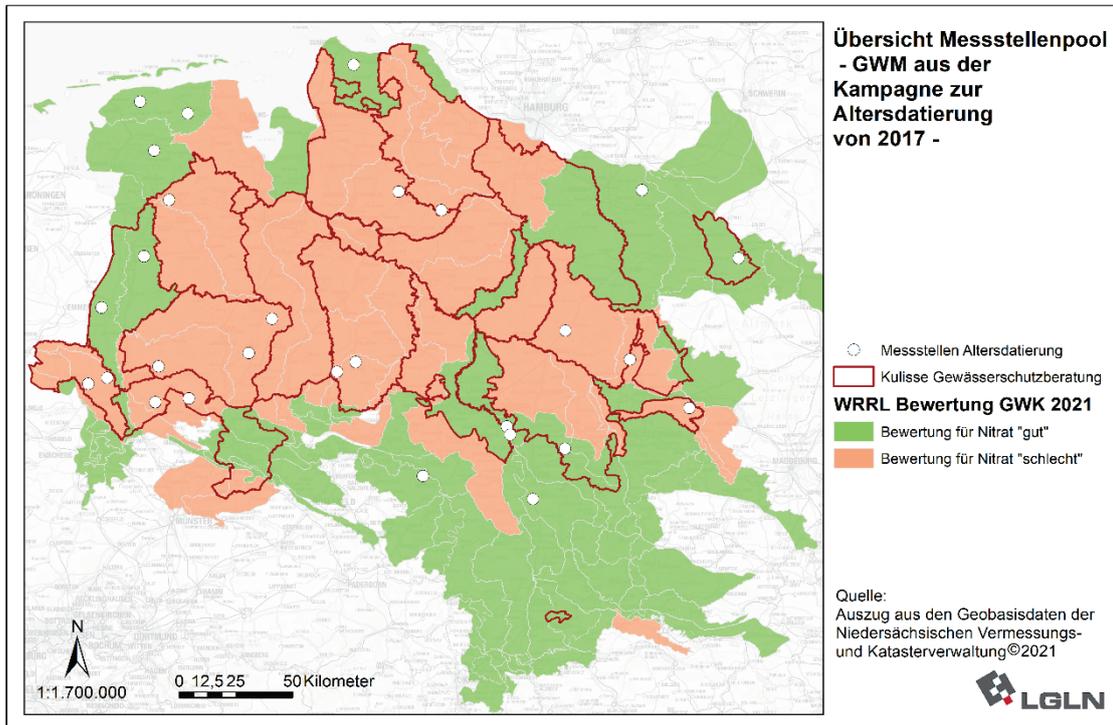


Abbildung 4: Lage der Grundwassermessstellen der Grundwassermessstellengruppen c) (Kreise) in Niedersachsen. Die Kulisse der Gewässerschutzberatung besteht in diesem Umfang seit 2019. Die WRRL-Bewertung der GWK (Grundwasserkörper) beruht auf Daten aus dem Jahr 2021.

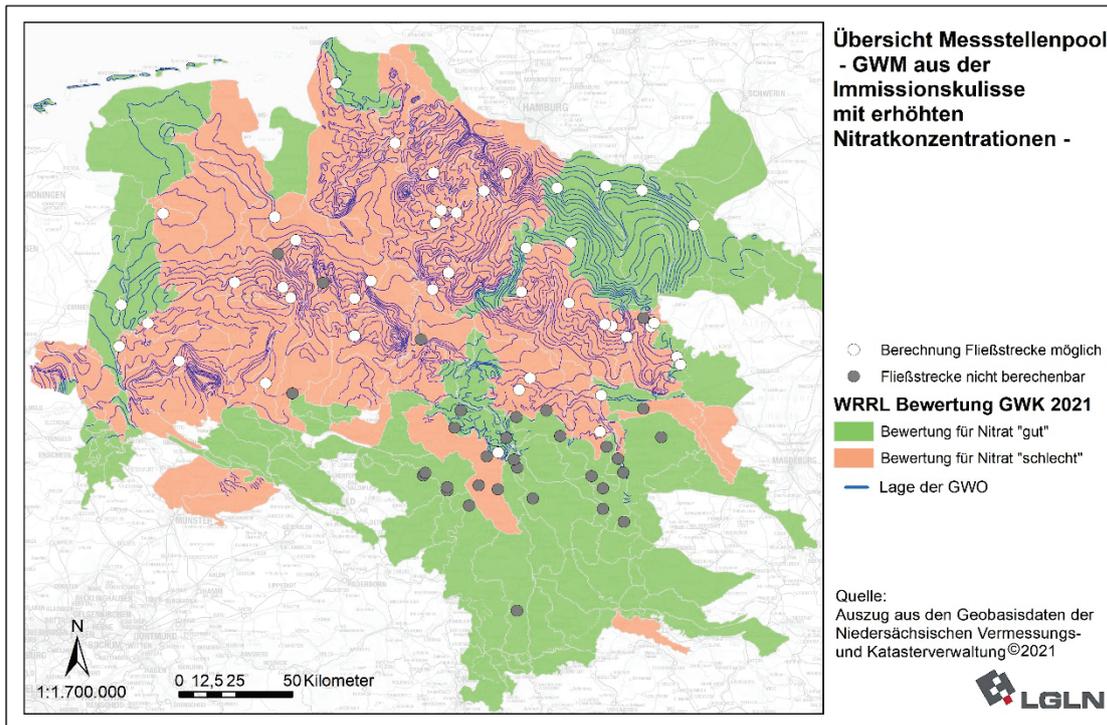


Abbildung 5: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen an denen die Fließstrecken berechnet möglich war, bzw. nicht möglich war und Grundwassergleichen der HUEK200.

Innerhalb der Datenbank werden zeitgleich zur Berechnung der Reaktionszeiten und Fließstrecken die Anwendungskriterien des LAWA-Verfahrens (sh. Kapitel 2.1) auf Grundlage der Eingangsdaten überprüft. Solange eine Berechnung grundsätzlich mit den vorhandenen Daten möglich ist, wird sie automatisiert ausgeführt. Erfüllen die Eingangsdaten einer Messstelle eines der Anwendungskriterien nicht, gibt die Datenbank einen Hinweis aus, damit die entsprechenden Eingangsdaten und zugehörigen Ergebnisse im Anschluss einer Plausibilitätskontrolle unterzogen werden können. Diese Grundwassermessstellen, die die Anwendungskriterien des Verfahrens potentiell nicht erfüllen, wurden in der Ergebnistabelle (Tabelle 3) entsprechend markiert.

Sowohl die Verweil-, Fließ und Reaktionszeiten, als auch die Fließstrecken wurden während der Auswertung in Gruppen verschiedener Größenordnungen (Klassen) eingeteilt. Die Klassenbreite wurde progressiv gewählt, sodass sie sich mit der Größe der Werte und ihrer Unsicherheiten erhöht. Es wurde bei der Auswertung darauf verzichtet kürzere oder längere Verweil-, Fließ- und Reaktionszeiten, sowie Fließstrecken in einen regionalen Kontext zu setzen, da das Verfahren auf eine Messstellen-individuelle Betrachtungsweise setzt und daher Eingangsparameter stärker wiegen als regionale Gegebenheiten. Hydrogeologische Teilräume zu Messstellen mit markanten Ergebnissen werden zwar erwähnt, jedoch nicht weiter interpretiert.

Im Zuge der Auswertung der Ergebnisse wurde ein Datenvergleich zwischen den in die Berechnung eingehenden Parametern (Eingangsdaten) und den Ergebnissen für die Fließstrecken, bzw. Verweil-, Fließ- und Reaktionszeiten mittels

Korrelationsanalyse nach Spearman und einfacher Regressionsanalyse durchgeführt. So sollte getestet werden, ob sich ein starker, statistisch signifikanter Zusammenhang ergibt, der einerseits einen Hinweis darauf geben könnte, welche Eingangsdaten für das Ergebnis besonders ausschlaggebend sind und andererseits eine grobe Abschätzung der Ergebnisse auf der Basis nur eines Eingangsparameters erlaubt. Das Signifikanzniveau wurde mit $p < 0,05$ festgelegt. Die Stärke des Zusammenhangs nach Spearman wurde wie folgt bewertet: $\rho = 0$ – kein Zusammenhang, $\rho < 0,3$ – schwach, $\rho > 0,3$ & $\rho < 0,5$ – mäßig, $\rho > 0,6$ & $\rho < 0,8$ – stark, $\rho > 0,8$ – sehr stark (vgl. Akoglu, 2018; Chan, 2003; Cohen, 2013; Hauke and Kossowski, 2011; Nachtigall and Wirtz, 2004).

Um zu überprüfen, wie plausibel die berechneten Fließ- und Reaktionszeiten sind, wurden die berechneten Ergebnisse vergleichbaren Fachdaten gegenübergestellt. Dazu wurde ein Abgleich der berechneten Fließzeiten aus Messstellengruppe a), b) und den dafür ausgewählten Messstellen aus Gruppe c) mit datierten Grundwasseralters aus der NLWKN Messkampagne (Okt. 2017) vorgenommen. Zusätzlich wurden die berechneten Reaktionszeiten nach LAWA Vorgaben mit Reaktionszeiten aus einer vorangegangenen Analyse der Reaktionszeiten und Fließstrecken (Wriedt, 2017) verglichen. Für die berechneten Fließstrecken stehen keine Daten für eine Validierung zur Verfügung.

2.5 Szenarien

Da die verfügbaren Quellen die hydraulische Leitfähigkeit und die effektive Porosität in Wertespannen pro Gesteinsart

oder Korngröße angeben, resultiert ein Schwankungsbereich für die Ergebnisse der Reaktionszeiten und Fließstrecken. Die letztendliche Auswahl des Eingangswertes in die Berechnung hat somit einen Einfluss auf die Ergebnisse. Um zu untersuchen, wie groß dieser Einfluss sein kann und um mögliche Unsicherheiten des Verfahrens abzuschätzen, wurden verschiedene Szenarien berechnet. Zunächst wurde ein Ausgangsszenario (Szenario 01) mit im folgenden geschilderten Eingangsparametern festgelegt und berechnet.

Die Spannen der hydraulischen Leitfähigkeit können sich im potentiell sehr heterogenen Festgestein über mehrere Größenordnungen erstrecken, wohingegen sie im homogenen Lockergestein 1-2 Größenordnungen umfassen. Deshalb werden im Ausgangsszenario für Lockergesteine mittlere Werte der hydraulischen Leitfähigkeit angenommen, um mittlere Fließstrecken abzubilden, aber für Festgesteine Ma-

ximalwerte um die Mindestfließstrecke aufzuzeigen. Die effektive Porosität geht mit Minimalwerten in die Berechnung des Ausgangsszenarios ein um Mindestfließzeiten zu bestimmen. Die anderen Eingangsdaten wie Grundwasserneubildung, Gradient oder Feldkapazität wurden als „Fix-Werte“ angenommen. Zusätzlich wurde der Einfluss des Struktur factors auf die Verweil- und Reaktionszeit im Festgestein überprüft. Dieser Wert konnte anhand der vorliegenden Datengrundlage nicht eindeutig zugeordnet werden und wurde deshalb für alle Festgesteine im Ausgangsszenario auf 1: *nicht bekannt* gesetzt.

Ausgehend vom Ausgangsszenario wurden weitere Szenarien erstellt, in deren Berechnung die Minimal- und Maximalwerte der entsprechend zugeordneten Wertespannen eingehen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Eingangsdaten (effektive Porosität, hydraulische Leitfähigkeit, Strukturfaktor) in die Berechnung der einzelnen Szenarien SZ01 – SZ09 unterteilt nach Einflussbereich (Fließzeit, Fließstrecke, Verweilzeit).

	Effektive Porosität	Hydraulische Leitfähigkeit	Strukturfaktor
Ausgangsszenario			
Szenario 1 (SZ01)	aus Funktionsprüfungen oder ansonsten aus LAWA-Verfahren (Festgestein Maximalwert, Lockergestein Mittelwert)	aus LAWA-Verfahren ergänzt durch Werte aus Hölting and Coldewey (2013) für Festgesteine (Minimalwerte)	1
Einfluss der Spanne der effektiven Porosität auf die Fließzeit			
Szenario 2 (SZ02)	Maximalwerte	wie SZ01	wie SZ01
Szenario 3 (SZ03)	Minimalwerte (wie SZ01)	wie SZ01	wie SZ01
Einfluss der Spanne der hydraulischen Leitfähigkeit auf die Fließstrecke			
Szenario 4 (SZ04)	wie SZ01	aus Funktionsprüfungen oder ansonsten aus LAWA-Verfahren (Minimalwerte)	wie SZ01
Szenario 5 (SZ05)	wie SZ01	aus Funktionsprüfungen oder ansonsten aus LAWA-Verfahren (Maximalwerte)	wie SZ01
Szenario 6 (SZ06)	wie SZ01	Datengrundlage aus SZ01 erweitert durch Werte aus ergänzender Literatur (Minimalwerte)	wie SZ01
Szenario 7 (SZ07)	wie SZ01	Datengrundlage aus SZ01 erweitert durch Werte aus ergänzender Literatur (Maximalwerte)	wie SZ01
Einfluss des Struktur factors auf die Verweilzeit im Festgestein			
Szenario 8 (SZ08)	wie SZ01	wie SZ01	0,1 (Minimalwert)
Szenario 9 (SZ09)	wie SZ01	wie SZ01	25 (Maximalwert)

3 Ergebnisse und Diskussion

Das LAWA-Verfahren wurde auf 76 Grundwassermessstellen aus den Messstellengruppen a) und b) angewandt. Für 71 Grundwassermessstellen konnten Verweil-, Fließ- und Reaktionszeiten berechnet werden, darunter 65 mit Filtereinheiten im Lockergestein und 6 im Festgestein. Die Berechnung der Fließstrecke war für 44 Grundwassermessstellen im Lockergestein möglich. Zusätzlich wurden die Verweil-, Fließ- und Reaktionszeiten für alle 29 Grundwassermessstellen der Messstellengruppe c) berechnet. Details dazu finden sich in folgenden Kapiteln 3.1 bis 3.5. In diesen Kapiteln werden die ermittelten Reaktionszeiten, welche sich aus der Summe der Verweil- und Fließzeit bildet, sowie die kalkulierten Fließstrecken beschrieben und anschließend anhand der Szenarien diskutiert. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse und wichtigen Parameter der einzelnen Grundwassermessstellen aufgeführt.

Mit Sternchen versehene und farblich markierte Grundwassermessstellen werden den im Kapitel 2.1 beschriebenen Anwendungskriterien des LAWA-Verfahrens nicht gerecht. Gelbe Markierungen und Messstellen mit *¹ zeigen an, dass die Schichtfolge in der gesättigten Zone nicht homogen aufgebaut ist. Laut Verfahren gehören alle Messstellen dazu, bei denen die Varianz der k_f -Werte der Schichten mehr als eine Größenordnung beträgt, sofern diese vorhanden bzw. abschätzbar sind. Auf Basis des Schichtenverzeichnisses könnte es sich an Messstellen mit roten Markierungen und Messstellen mit *² um einen um Grundwasserleiter (GWL) handeln, die durch eine Stauschicht hydraulisch getrennt sind, wodurch die Messstelle im zweiten GWL liegen würde. Zum anderen könnte beim Bau der Messstelle eine Tonlinse oder ein entsprechendes lokales, nicht Grundwasser leitendes Element durchbohrt worden sein und ein zusammenhängender GWL vorliegen. Die eindeutige Zuordnung zu einem GWL war an diesen Messstellen aufgrund dieser Unsicherheit nicht möglich. Die blauen Markierungen mit *³ heben Messstellen hervor, an denen nach Abgleich der Schichtenverzeichnisse/Bohrprofile und der GWO gespannte oder potentiell gespannte Grundwasserverhältnisse vorliegen.

3.1 Verweilzeiten in der ungesättigten Zone

Die berechneten Verweilzeiten des Sickerwassers liegen für die untersuchten Messstellengruppen a) und b) zwischen < 1 und 28 Jahren (Abbildung 6). Dem Großteil von 71 % der Messstellen können kurze Verweilzeiten kleiner oder gleich 10 Jahren zugeordnet werden. Ungefähr ein Viertel der berechneten Verweilzeiten liegt zwischen 10 und 30 Jahren.

Die Karte in Abbildung 7 zeigt die Lage der Messstellen mit berechneten Verweilzeiten in der ungesättigten Zone. Die längsten Verweilzeiten wurden an den Grundwassermessstellen 601710231, 600120056 und 601110049 ermittelt. Diese liegen in der Lüneburger Heide. Durch die Geestlandschaft der Lüneburger Heide ziehen sich Grund- und Endmoränen aus Geschiebemergel und -lehm, welche als bindige Deckschichten mit langen Verweilzeiten eine hohe Schutzfunktion aufweisen können.

Die kürzeste Verweilzeit von weniger als einem Jahr wurde für die Grundwassermessstelle 40002959 berechnet. Das Schichtenverzeichnis zeigt hier, dass anstatt eines natürlichen Bodens Bauschutt vorliegt. Die darunterliegende Kalkschicht besitzt nur eine geringe Mächtigkeit von 0,26 m im ungesättigten Bereich. Das könnte bei lockerer Lagerung des Bauschutts eine Erklärung für die kurze Verweildauer sein. Sowohl die langen, als auch die kurzen Verweilzeiten scheinen somit plausibel.

Die Berechnung der Verweilzeiten in Festgesteinsschichten, führte bei allen vier betroffenen Messstellen zu Werten von unter einem Jahr unabhängig von der Mächtigkeit der Schichten. Der eingesetzte Strukturfaktor von 1,0 - *nicht bekannt* - entspricht dem Strukturfaktor für *mittel geklüftet/wenig verkarstet*, wodurch den Festgesteinen allgemein eine relativ gute Durchlässigkeit zugeschrieben wird und was bei der Berechnung entsprechend zu kurzen Verweilzeiten führt. Die gesamte Verweilzeit (Summe aus der Verweilzeit im Fest- und Lockergestein) an diesen Messstellen wird deshalb durch die Verweilzeit im Lockergestein bestimmt.

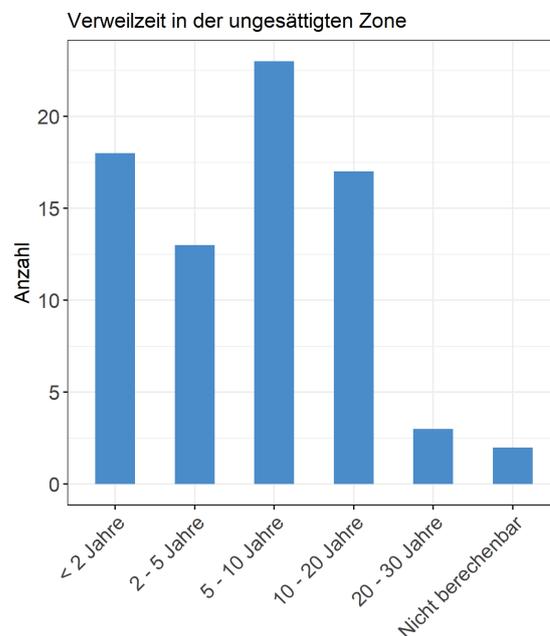


Abbildung 6: Verteilung der Grundwassermessstellen auf die verschiedenen Verweilzeit-Klassen

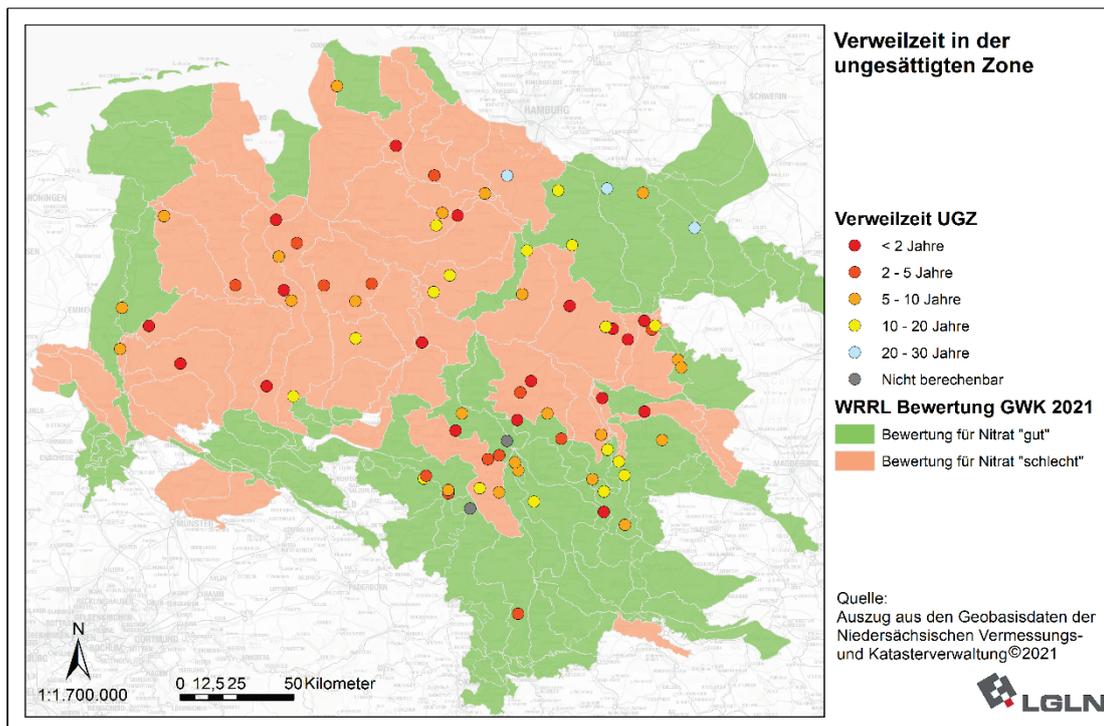


Abbildung 7: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen mit ihren zugehörigen Verweilzeiten in der ungesättigten Zone (UGZ).

Die Unterschiede in der Dauer der Versickerung werden neben der Mächtigkeit der Deckschicht, also dem Flurabstand, durch die unterschiedlichen Grundwasserneubildungsraten und die Bindigkeit der Gesteinsschichten hervorgerufen. Neben diesem bestehenden kausalen Zusammenhang wurde der statistische Zusammenhang zwischen den berechneten Verweilzeiten und der Grundwasserneubildung, sowie der Verweilzeiten und dem Flurabstand durch die Berechnung von Korrelationskoeffizienten getestet. Die Punktwerte und kalkulierten Korrelationskoeffizienten sind in den Scatterplots in Abbildung 8 dargestellt. Es ergibt sich für die betrachteten Verweilzeiten dieses Messstellenpools kein statistisch signifikanter Zusammenhang ($p < 0,05$) zwischen der

Grundwasserneubildung und der Verweilzeit (links), wohl aber ein sehr starker statistischer Zusammenhang zwischen der Verweilzeit und dem Flurabstand (rechts) mit $\rho = 0,82$ ($p < 0,05$). Trotz der Streuung der Daten kann im Durchschnitt davon ausgegangen werden, dass die nach dem LAWA-Verfahren ermittelten Verweilzeiten ca. 1 Jahr pro einem Meter Flurabstand entsprechen. Das bedeutet, dass kurze Verweilzeiten typischerweise auf geringe Flurabstände zurückzuführen sind. Diese Erkenntnisse decken sich mit Ergebnissen früherer Studien (Kunkel and Wendland, 2002; Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin, 2004).

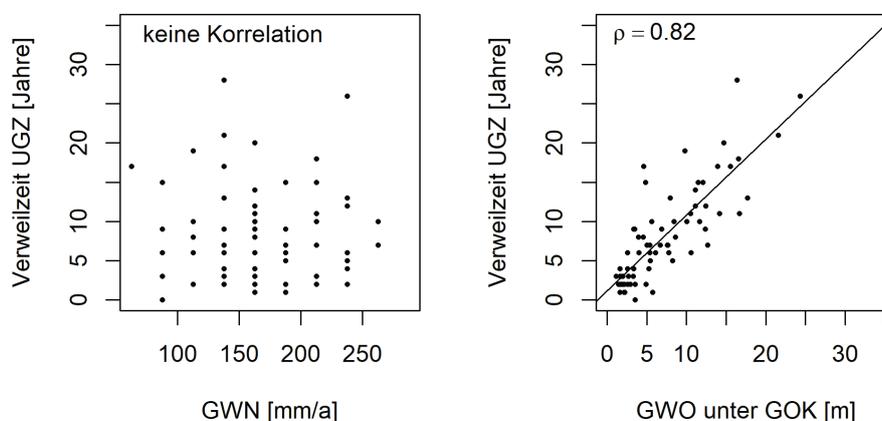


Abbildung 8: Scatterplots der Verweilzeit in der ungesättigten Zone (UGZ) aufgetragen über der Grundwasserneubildung (GWN) (links) und über dem Flurabstand (rechts). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet.

Tabelle 3: Verweil-, Fließ-, Reaktionszeiten und Fließstrecken an den Grundwassermessstellen sowie die Parameter Gesteinstyp, Flurabstand, Daten zum Filter und der Grundwasserneubildung

GWM ID	Langbezeichnung	Gesteinstyp am Filter	Flurabstand [m u GOK]	FOK [m u GOK]	Filterfläch-tigkeit [m]	Grundwas-serneubil-dung [m/mal]	Verweilzeit [Jahre]	Verweilzeit [Jahre]	Verweilzeit [Jahre]	Gesamt	FOK	Fließzeit GW [Jahre]	FUK	Reaktions-zeit [Jahre]	FOK	Fließstrecke [m]	FUK
1720021	Schattenburg SB2	LG	3,93	13	2	100-125	8,15			8	8	9	10	17	30	34	37
6110241	P 24 oben (24 FL)		6,7	7,45	2	200-225	6,85			7							
7010262	WW Varloh 26 o	LG	6,86	15,86	2	150-175	8,96			9	6	6	7	15	1161	1290	1419
9610159	Klein Bomhorst IV	LG	2,14	4	1	150-175	2,41			2	1	2	2	4	312	396	480
9610481	Thölstedt	LG	1,51	2,5	2	225-250	1,52			2	<1	<1	1	2	26	52	78
9610839	Sandersfeld I	LG	5,24	11	6	225-250	4,5			4	2	4	5	8	89	136	182
9611209	Inselbruch-Harpstedt (neu)	LG	3,31	6	2	150-175	4,27			4	2	2	3	6			
9700214	Rechterfeld	LG	5,63	7,8	2	150-175	10,11			10	1	2	3	12	348	508	669
9700246	^{*1,2} Südfelde	LG	1,5	18	2	175-200	2,48			2	13	14	15	16	8172	8667	9162
9700257	Varrelbusch	LG	2,69	21	2	200-225	2,61			3	9	10	10	13	770	812	855
1371140	Ohrte Peilbrunnen B 14.0	LG	2,02	4	1	200-225	1,89			2	1	1	1	3	417	522	628
40000237	Fuhrberg: GWM20310 (Fuhrberger Feld)	LG	2,19	5,95	0,95	150-175	1,14			1	2	2	3	3	1520	1712	1904
40000351	^{*1} Immensen I	LG	5,38	6,2	8,9	125-150	6,56			7	1	6	12	13			
40000439	^{*3} Wegensen II	FG	-0,24	16,8	80	125-150				12	1	2	2	14			
40000944	^{*1,3} Hemmendorf	LG	12,41	18,25	1,5	225-250	12,27										
40001442	Bodenwerder II+III: Brunnen 2/Zapfh. Br.	FG		30,8	20	275-300											
40001453	Brevörde: Brevörde Quelle					125-150											
40001556	Bodenburg: Bodenburg Tiefbrunnen 1	LG		17,3	14,5	200-225											
40002939	^{*1} Fuhrberg: GWM30051 (Fuhrberger Feld)	LG	1,1	4	1	125-150	3,45			3	2	2	3	5	541	634	727
40002953	^{*1} Hameln II-Hohes Feld: P 108 (Hameln-Süd)	LG	5,44	8,2	1,5	175-200	5,41			5	<1	<1	1	5			
40002955	^{*1} Tünderanger: P 170 (Hameln-Süd)	LG	12,67	19,53	8,3	250-275	6,71			7	3	4	6	11			
40002959	LHH: 020224 Krumme Str./ Sporthalle	FG	3,53	9,96	4	75-100				0,01	<1	<1	1	<1			
40003049	LK-HI: 2540204403 GMS 6	LG	5,35	4,67	3	75-100	6,42			6	<1	2	4	8			
40003052	^{*1} LK-HI: 2540264420 B 11	LG	8,6	5,2	5,5	150-175	7,56			8	<1	1	2	9			
40003079	Fuhlen-Lachem: P 50	LG	16,57	17	0,9	200-225	17,88			18	<1	<1	1	18			
40003105	Fuhlen-Lachem: P 10	LG	8,23	7,91	1	225-250	4,57			5	<1	<1	<1	5			
40003128	^{*1,3} Mittelrode: MR_4anf	LG	3,25	9	2	200-225	3,28			3	3	4	4	7			
40003416	^{*1,3} Jeinser Holz	LG	1,6	7,91	3,94	125-150	2,97			3	8	10	12	13	5007	6570	8134
40003616	^{*1} Eime	LG	8,43	10,36	1	200-225	10,18			10	1	2	-	12			
40003617	^{*1,3} Almstedt	FG	11,47	14,45	2	175-200	14,5			15	<1	<1	<1	15			
40004444	^{*1} Forst Esloh: PBE 71	LG	4,01	4,1	1	150-175	5,98			6	<1	<1	1	6			
40004448	^{*1} Landringhausen: L34	LG	1,83	3,5	2	125-150	1,82			2	1	2	2	4			
40004623	Grasdorf: Grundwassermessstellen60520					50-75											
40502181	^{*1} Klein Berßen-Loherfeld I	LG	1,42	19	2	150-175	2,46			2	11	12	12	14	786	830	875
40504012	^{*1,2} Raken II	LG	7,64	15,4	2	250-275	7,37			7	3	4	4	11	94	106	119
100000481	Heißum I	FG	5,71	8	10	150-175	1,09			0,02	<1	<1	<1	1			
100000497	Vienenburg-Süd	LG	12,38	5	12	175-200	8,89			9	<1	2	5	11			

100000644	*1 Wittingen I	LG	1,61	5,3	2	125-150	3,51	4	3	4	5	8	480	610	740
100000742	Brome I	LG	10,57	12,2	2	175-200	6,33	6	1	2	3	8	210	339	468
100000764	*1 Leiferde (GF) I	LG	3,48	5	3	125-150	2,45	2	2	4	6	6	528	1048	1569
100000840	*1 Ehmen I	LG	1,87	3,5	2	125-150	2,21	2	2	3	4	5			
100000864	Hofschwicheltd	LG	1,83	1,5	1	75-100	2,59	3	<1	<1	1	3			
100000874	*1 Bortfeld-Nord	LG	10,01	14,3	2	100-125	9,96	10	6	7	8	17	5821	7178	8535
100000886	Timmerlah I	LG	13,93	14	3	125-150	17,32	17	<1	1	2	18			
100000914	Leiferde (BS) I	LG	4,61	5	5	50-75	16,77	17	1	5	9	22			
100003862	Gebhardshagen I	FG	2,55	13,3	4	100-125	5,86	6	<1	<1	1	6			
100003864	Beinum 2	LG	7,95	13	2	125-150	13,48	13	7	8	10	21			
100003878	Allersehl 2	LG	1,59	5,7	2	150-175	1,28	1	4	5	6	6	699	870	1040
114700012	*1 Halchter-Ohrum_04A	LG	4,8	8,5	2	75-100	14,95	15	8	10	13	25			
120900003	Lenglern_LE 1	FG	2,58	9,6	3	150-175	3,8	4	<1	<1	<1	4			
121901710	*1 Lüsche_PB 10 f	LG	10,51	12,1	18	150-175	10,94	11	1	6	12	17	257	1714	3172
127800024	Puritzmuehle_B 22	LG	5,02	4,7	4	175-200	6,65	7	<1	1	2	8			
129300065	*1 Rühren_RA 43 19	LG	7,78	17,5	1,8	125-150	6,2	6	6	7	8	13	2594	2834	3074
130701410	*1 Schönewörde_NA 142 fl	LG	2,89	15,2	2	150-175	1,64	2	8	8	9	10	790	854	918
139501516	Wittingen_W3-80 fl	LG	9,81	16,3	2	100-125	19,39	19	6	7	8	26	1750	2020	2289
139501560	*1 Wittingen_Hy 02-07 fl	LG	2,53	6,1	2	125-150	1,71	2	1	2	2	4			
200000490	Gödestorf I	LG	1,67	5	8	125-150	2,91	3	2	5	8	8	523	1152	1780
200000532	Neubruchhausen I	LG	3,47	7	3	75-100	9,47	9	4	6	7	15	248	354	459
200000904	Nordsulingen I	LG	11,11	16	6	150-175	12,42	12	3	5	7	17	5534	8930	12325
200912243	WW Lemförde B 2 M 1	FG	15,56	22	4	125-150	17,21	17	<1	<1	1	17			
201010356	WW Drakenburg PB 41		1,72	2	2	100-125	1,91	2							
400080081	Im Stueh I	LG	7,56	11	8	200-225	6,63	7	2	4	5	11	26	56	87
400080491	*1 Meinstedt UE 49 FI	LG	1,96	18	2	150-175	3,2	3	15	16	17	19	7030	7468	7906
400081481	Oereleer-Moor UE 148 FI	LG	4,9	11	2	225-250	2,14	2	4	4	5	6	2151	2504	2857
405180351	*1 Wistedt-Tostedt UE 35 FI	LG	4,53	14	2	150-175	7,75	8	6	6	7	14	6513	7200	7888
500000282	NA 094 Hohenaverbergen	LG	17,67	21	2	225-250	12,69	13	2	2	3	15	2701	3512	4323
500000348	NA 170 Harmelingen	LG	14,14	20,5	2	200-225	11,38	11	3	4	4	15	4423	5118	5814
500000477	*1 UWO 018/1 Böttersen	LG	14,68	29	2	150-175	20,02	20	13	14	15	34	4834	5172	5509
500000487	UWO 026/1 Jeersdorf N	LG	1,54	6	2	225-250	1,68	2	2	2	3	4	111	136	161
500000518	*1 UWO 047/1 Abbendorf	LG	6,07	24	2	225-250	6,25	6	8	8	8	14	564	596	627
500002799	NA 120 N Lutterloh	LG	2,14	8,5	2	175-200	0,97	1	5	6	7	7	2897	3352	3808
500003024	GD 14 N 12 Becklingen	LG	11,65	15	2	250-275	9,73	10	1	2	2	12	96	125	154
500003029	LGD 009 N 12 Klein-Heins	LG	11,1	15	2	150-175	13,71	14	2	3	4	17	128	160	193
600040201	*1,3 Breetze A	LG	3,33	17	2	125-150	9,25	9	10	10	11	19	365	392	418
600041881	Wulfsoede G	LG	16,67	17,4	2	200-225	10,89	11	<1	1	2	12	103	244	386
600120056	WW Adendorf AD 5	LG	16,39	23,8	1,9	125-150	28,27	28	5	6	7	34	1418	1600	1781
600710099	WW Garstedt GA 5a	LG	12,04	13	2	200-225	15,32	15	1	2	2	17	542	1106	1670
601110049	WW Kähmen KM 18	LG	21,6	22	5	125-150	20,93	21	<1	2	4	23	275	1992	3710
601710231	Wenzendorf G1	LG	24,33	44,75	3,9	225-250	26,18	26	9	10	10	36	396	434	472

3.2 Fließzeiten im Grundwasser

3.2.1 Ergebnisse

Das Grundwasser erreicht für mehr als 50 % der Grundwassermessstellen der Messstellengruppen a) und b) die Filteroberkante nach einer Fließzeit von weniger als zwei Jahren (Abbildung 9). Mehr als ein Viertel der Grundwassermessstellen wird auch an der Filterunterkante nach weniger als 2 Jahren Fließzeit angeströmt, mehr als die Hälfte nach weniger als 5 Jahren. Für 4 (Filteroberkante) bzw. 9 (Filterunterkante) der 76 Grundwassermessstellen aus dem Messstellenpool wurden Fließzeiten zwischen 10 und 20 Jahren berechnet. Dabei ist zu beachten, dass die Ergebnisse des Ausgangsszenarios aufgrund der angesetzten maximalen effektiven Porosität Mindestfließzeiten darstellen.

Die Karte in Abbildung 10 zeigt die Lage der Grundwassermessstellen mit den berechneten Fließzeiten des Grundwassers bis zur Filtermitte. Die längsten Fließzeiten von 14 und 16 Jahren finden sich an den untersuchten Messstellen 500000477 und 400080491. Diese liegen im Altmoränengebiet der Zevener Geest. Die berechneten Fließzeiten zu den Grundwassermessstellen, die in einer stratigraphischen Festgesteinseinheit verfiltriert sind, liegen alle unter einem Jahr.

So wie für die Verweilzeiten wurden auch für die Fließzeiten Korrelationen zwischen dem Ergebnis und seinen Eingangsparametern berechnet. Für die Gesamttiefe (gesättigter und ungesättigter Bereich über der FOK) konnte nur ein mäßig starker Zusammenhang mit $\rho = 0,43$ ($p < 0,05$) festgestellt werden, während für die Filterüberdeckung (wasser-gesättigter Bereich über der Filteroberkante) ein statistisch

signifikanter starker Zusammenhang mit $\rho = 0,76$ ($p < 0,05$) festgestellt wurde (Abbildung 11). Je größer also der Abstand zwischen der Filteroberkante und der Grundwasseroberfläche ist, desto länger wird die Fließzeit. Zwischen der Fließzeit und der Grundwasserneubildung sowie der Fließzeit und der effektiven Porosität konnte kein statistisch signifikanter Zusammenhang festgestellt werden (nicht abgebildet). Entsprechend scheint die Mächtigkeit der gesättigten Zone über der FOK die ausschlaggebende Größe bei der Berechnung der Fließzeit zu sein.

3.2.2 Abgleich mit Fachdaten

Der Abgleich der berechneten Fließzeiten (bis zur Filtermitte) mit datierten Grundwasseraltern aus der NLWKN Messkampagne (Okt. 2017) wurde für die Messstellen der Messstellengruppen a), b) und den dafür ausgewählten Messstellen aus Gruppe c) vorgenommen. Die vier Messstellen der Messstellengruppen a) und b), für die ein Abgleich mit vorhandenen Altersdatierungen möglich war, sind ebenfalls in Messstellengruppe c) enthalten.

Für die Grundwassermessstellen der Gruppe a) und b) wurden Fließzeiten zwischen <2 und 10 Jahren berechnet. Die Altersdatierung zeigt jedoch nur bei zwei der Messstellen ein Grundwasseralter in diesem Zeitrahmen an (Grundwassermessstellen 40003079 und 500000518) (Abbildung 12, links). Die anderen zwei Grundwasseralter waren mit 19 und 36 Jahren deutlich größer als die berechneten Fließzeiten an den Grundwassermessstellen 40003617 und 600040201. Aufgrund der wenigen Datenpaare wurde keine Korrelation berechnet.

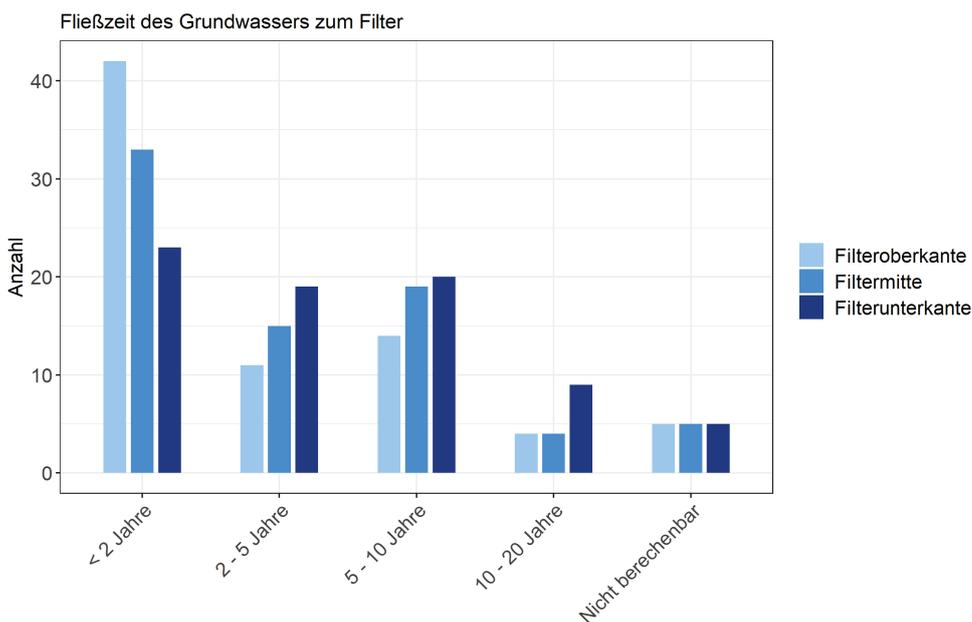


Abbildung 9: Verteilung der Grundwassermessstellen auf die verschiedenen Fließzeit-Klassen abhängig von Filteroberkante, -unterkante oder -mitte.

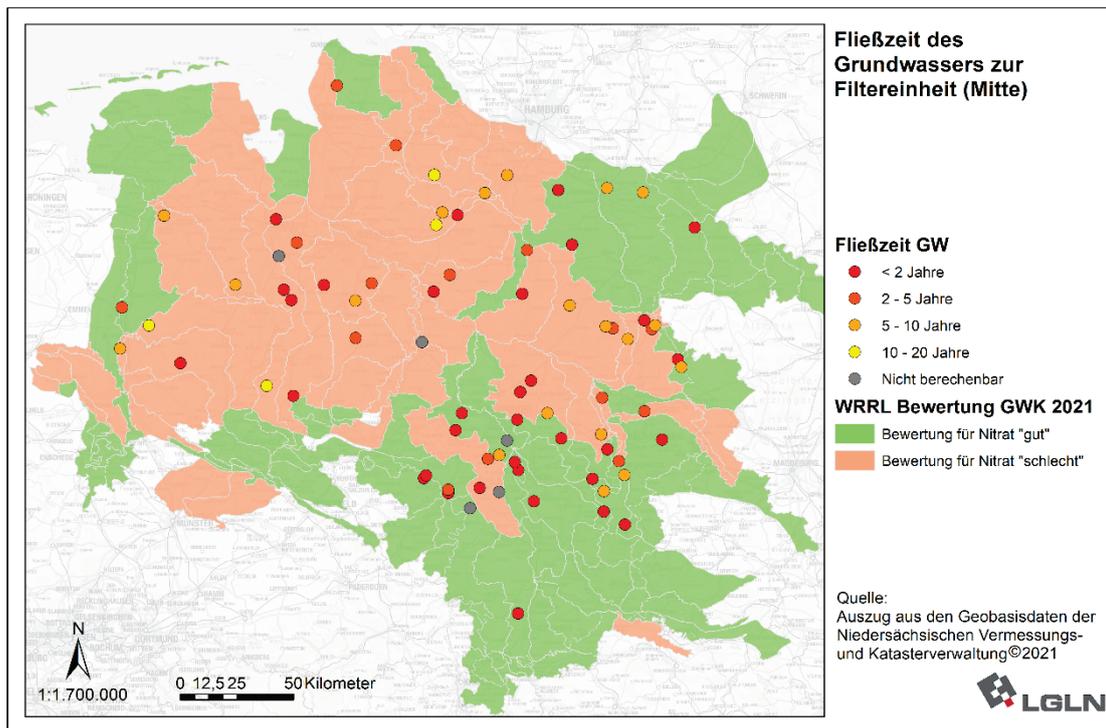


Abbildung 10: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen mit ihren zugehörigen Fließzeiten des Grundwassers (GW) vom Ort der Grundwasserneubildung zur Filtermitte.

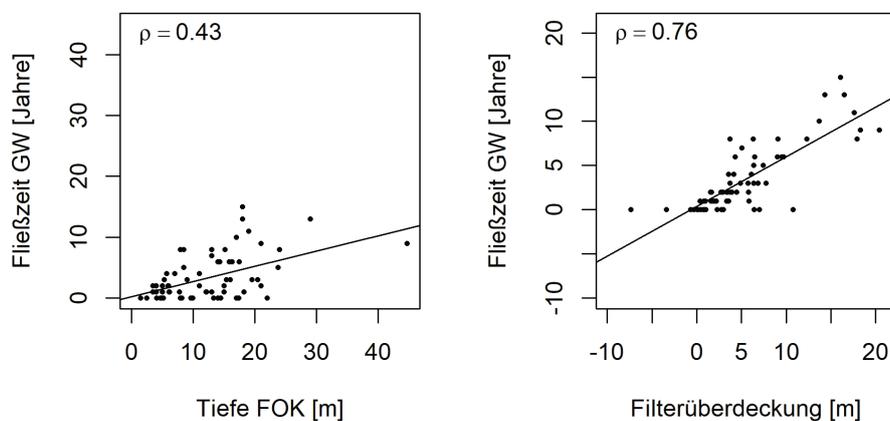


Abbildung 11: Scatterplots der Fließzeit des Grundwassers (GW) aufgetragen über der Tiefe der Filteroberkante (FOK) (links) und über der Filterüberdeckung (rechts). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet.

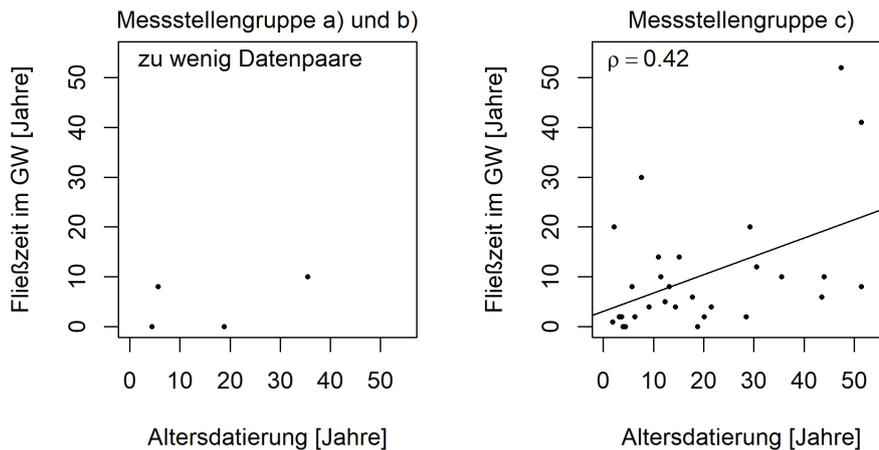


Abbildung 12: Scatterplots der Fließzeit des Grundwassers der Messstellengruppen a) und b) aufgetragen über der Altersdatierung (links) und Fließzeit des Grundwassers der Messstellengruppen c) aufgetragen über der Altersdatierung (rechts). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet.

Die berechneten Fließzeiten der 29 Messstellen der Messstellengruppe c) lagen zwischen <2 und 52 Jahren, die Altersdatierungen zwischen 2 und 60 Jahren. In der Einzelbetrachtung weichen viele der Altersdatierungen von den berechneten Fließzeiten ab (Abbildung 12, rechts). Die Abweichungen können gering sein und weniger als 5 Jahre (45 % der Messstellen) umfassen oder aber bis zu 43 Jahre groß sein. Diese Beobachtungen spiegeln sich in der Korrelation der Datensätze wider. Sie zeigt zwar einen statistisch signifikanten Zusammenhang der Daten ($p < 0,05$), allerdings beschreibt der Spearman-Koeffizient mit $\rho = 0,42$ einen Zusammenhang mit nur mäßiger Stärke.

Die berechneten Fließzeiten sind überwiegend kürzer als die ermittelten Zeiten der Altersdatierung (Abbildung 13). Nur an fünf Grundwassermessstellen wurde Grundwasser mit höherem Alter ermittelt als Fließzeiten in Jahren berechnet wurden. Die nach dem LAWA Verfahren berechneten Fließzeiten beziehen sich auf theoretische, geradlinige Fließbahnen vom Grundwasserneubildungsgebiet bis zur Messstelle, während in der Realität Mischungsprozesse verschieden alter Wasser im Grundwasserleiter vorliegen und bei der Altersdatierung entsprechend zusammengesetzte Alter ermittelt werden könnten (Süldenfuß and Massmann, 2004). Außerdem wurden bei der Kalkulation der Fließzeiten die Eingangsparameter so gewählt, dass Mindestfließzeiten berechnet werden (vgl. 2.5). So können die überwiegend kleineren Fließzeiten im Vergleich zum Grundwasseralter erklärt werden.

Trotz des oben erwähnten Zusammenhangs der Daten können die berechneten Fließzeiten nicht vollständig durch die Altersdatierungen plausibilisiert werden. Besonders an Messstellen, die eine unvollständige Datenlage aufweisen, können die großen Schwankungsbereiche abgeleiteter Eingangsparameter (wie z.B. der effektiven Porosität) zu großen Unsicherheiten bei der Berechnung führen, sodass hier empfohlen wird zusätzlich Altersdatierungen durchzuführen.

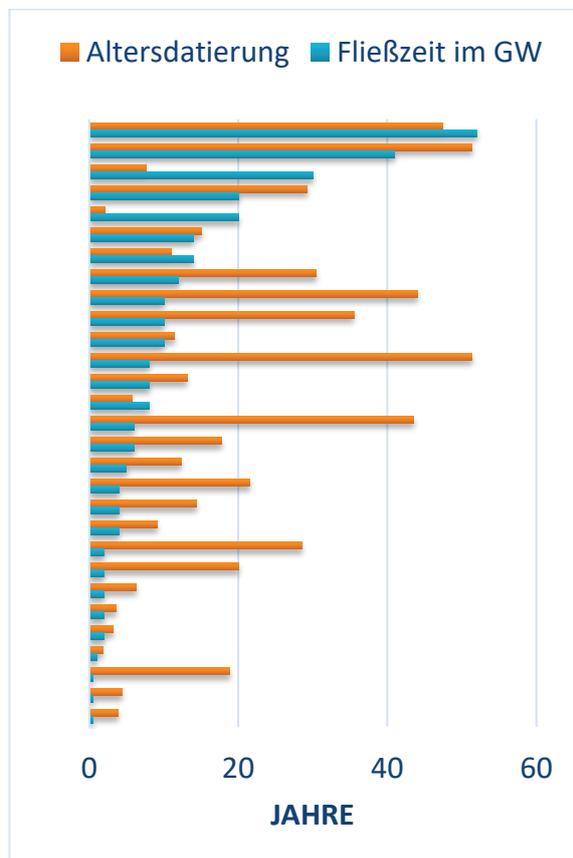


Abbildung 13: Balkendiagramm der Altersdatierungen (orange) an 29 Messstellen (NLWKN Messkampagne Okt. 2017) im Vergleich zu ihren berechneten Fließzeiten (blau) aufgetragen vom ältesten Grundwasser bis zum jüngsten von oben nach unten. Fließzeiten <1 Jahr werden hier mit 0,5 Jahren dargestellt.

3.3 Reaktionszeiten der Grundwassermessstellen

3.3.1 Ergebnisse

Durch Addition der Verweil- und Fließzeiten ergaben sich Reaktionszeiten für 71 Grundwassermessstellen. Davon waren 6 Grundwassermessstellen in einer stratigraphischen Festgesteinseinheit verfiltert und 65 im Lockergestein. Während rund 40 % der Grundwassermessstellen eine Reaktionszeit von weniger oder gleich 10 Jahren aufweisen, wurden für fast ebenso viele Grundwassermessstellen Reaktionszeiten zwischen 10 und 20 Jahren kalkuliert (Abbildung 14). Für einen geringeren Anteil von rund 10 % ergeben sich Reaktionszeiten von 20 bis 40 Jahren und die restlichen 7 % waren nicht berechenbar.

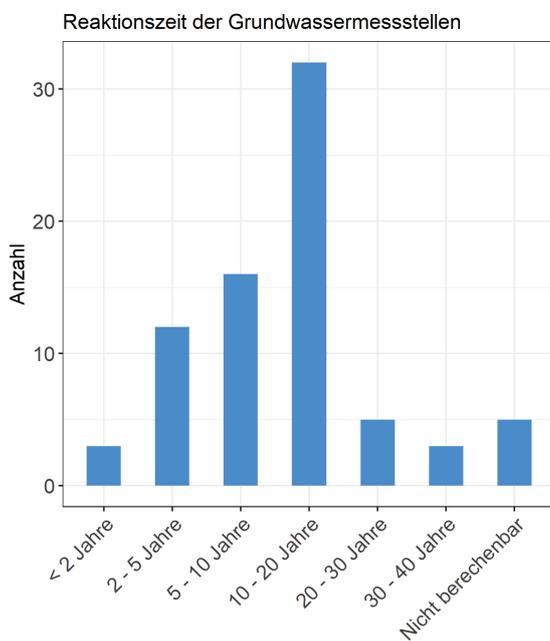


Abbildung 14: Verteilung der Grundwassermessstellen auf die verschiedenen Reaktionszeit-Klassen.

Abbildung 15 zeigt die räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen mit ihren berechneten Reaktionszeiten. Die

längsten Reaktionszeiten von mehr als 30 Jahren sind an den untersuchten Messstellen im Norden der Lüneburger Heide und der Zevenener Geest anzutreffen. Verhältnismäßig lange Reaktionszeiten zwischen 20 und 30 Jahren wurden an den untersuchten Messstellen in der Region um die Braunschweig-Hildesheimer Lössbörde und der Oker Talaue ermittelt. Von den 3 Grundwassermessstellen, deren Reaktionszeiten unter zwei Jahren liegt, sind zwei (Grundwassermessstellen 40002959 und 100000481) in stratigraphischen Festgesteinseinheiten verfiltert. Die dritte Grundwassermessstelle 9610481 liegt in der Cloppenburgener Geest. Ihre Filteroberkante liegt nur 2,5 m unter der Geländeroberkante und der Flurabstand bei 1,5 m unter GOK.

Abbildung 16 zeigt die Reaktionszeit aufgetragen über der Filtertiefe und über der Filterüberdeckung. Die Reaktionszeit der Messstellen hängt statistisch signifikant von den beiden Faktoren (Filtertiefe und Filterüberdeckung) ab. Die Korrelation zwischen der Reaktionszeit und der Filterüberdeckung lieferte nur einen schwachen Zusammenhang mit $\rho = 0,29$ (Abbildung 16, rechts). Demgegenüber beschreibt der Spearman-Korrelationskoeffizient zwischen Reaktionszeit und Filtertiefe von $\rho = 0,69$ einen stark positiven Zusammenhang (Abbildung 16, links). Dieser Zusammenhang sagt aus, dass die Reaktionszeit der Grundwassermessstellen länger wird, je tiefer die Grundwassermessstellen verfiltert sind. Der Bereich von der GOK bis zur FOK gliedert sich in die ungesättigte und die gesättigte Zone. In der ungesättigten Zone zeigten die Verweilzeit und der Flurabstand (GOK bis GWO) einen sehr starken statistischen Zusammenhang (Abbildung 8). In der gesättigten Zone konnte ein starker statistischer Zusammenhang zwischen der Fließzeit und der Filterüberdeckung (GWO bis FOK) festgestellt werden (Abbildung 11). Bei den Einzelberechnungen für die ungesättigte und gesättigte Zone zeigt sich damit, dass die jeweilige Mächtigkeit der Bereiche besonders ausschlaggebend für das Ergebnis ist. Entsprechend zeigt auch die Reaktionszeit als zusammengesetzte Größe den stärksten Zusammenhang zur Gesamtmächtigkeit bzw. der Filtertiefe und nur einen schwachen Zusammenhang zur Filterüberdeckung, die ja nur den gesättigten Bereich repräsentiert.

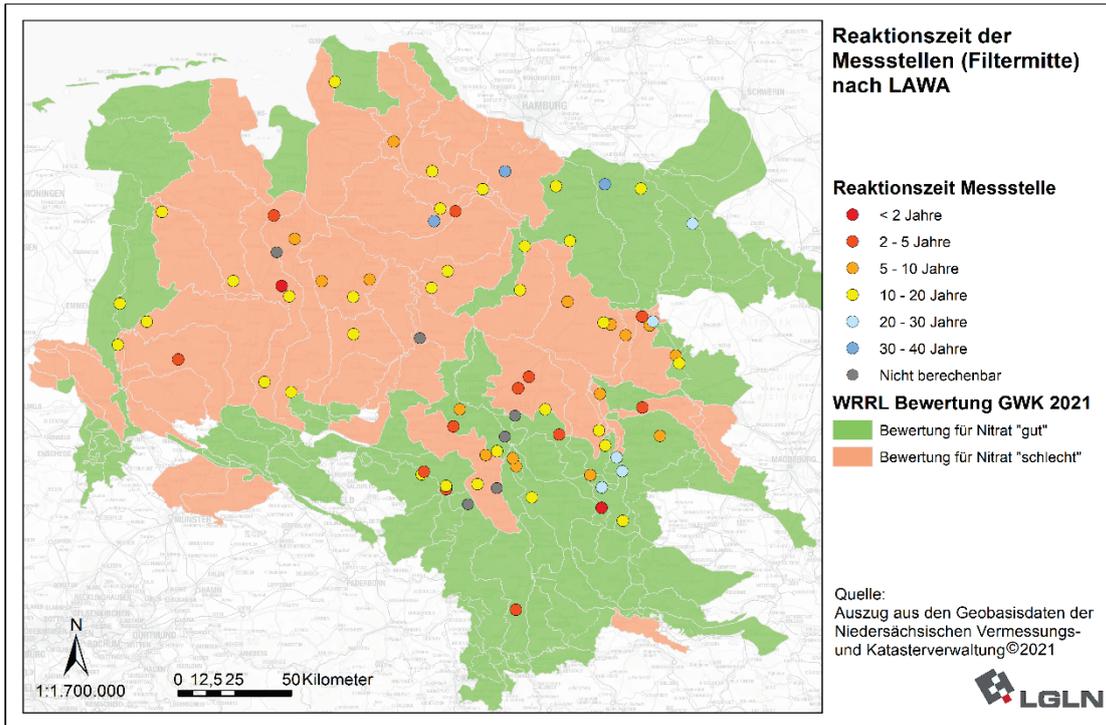


Abbildung 15: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen mit ihren zugehörigen Reaktionszeiten des Grundwassers (GW) vom Ort der Grundwasserneubildung zur Filtermitte.

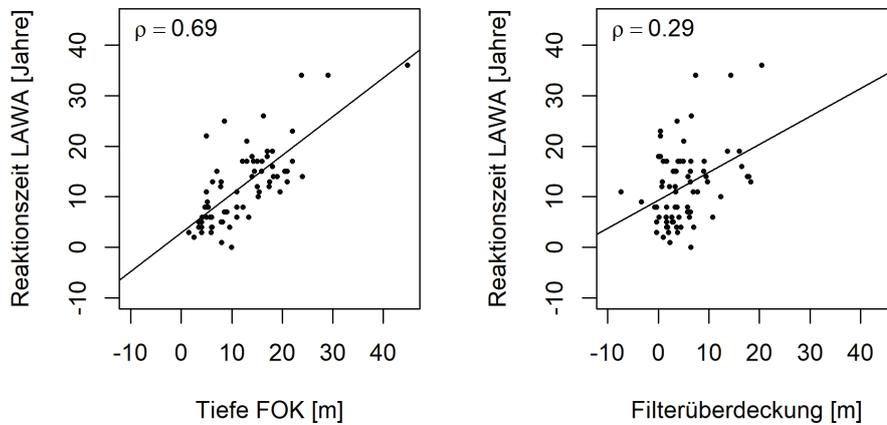


Abbildung 16: Scatterplots der Reaktionszeit aufgetragen über der Tiefe der Filteroberkante (FOK) (links) und über der Filterüberdeckung (rechts). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet.

3.3.2 Abgleich mit Fachdaten

Der Vergleich der hier ermittelten Reaktionszeiten mittels LAWA Verfahren mit den im Zuge der Charakterisierung von Messstellen ermittelten Transportzeiten nach Wriedt (2017) ergab, dass die mit dem LAWA Verfahren ermittelten Reaktionszeiten im Durchschnitt kürzer und an einigen Messstellen deutlich kürzer ausfallen. Im Scatterplot in Abbildung 17 (links) ist ein statistisch signifikanter, mäßig starker Zusammenhang ($\rho = 0.41$) erkennbar.

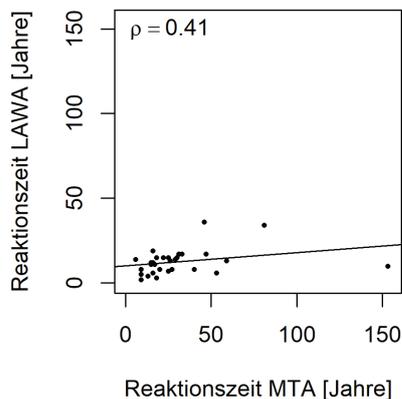


Abbildung 17: Scatterplot der Reaktionszeit berechnet nach dem LAWA-Verfahren aufgetragen über der Reaktionszeit MTA nach Wriedt (2017). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet.

Obwohl beide Verfahren analytische Lösungsansätze darstellen, unterscheiden sich die Methoden in ihrer Berechnung. Zum Beispiel wird die hydraulische Leitfähigkeit in der Methode nach Wriedt (2017) abgeschätzt und im Nachgang kalibriert um ein möglichst plausibles Modell der Grundwasserströmungsverhältnisse zu entwickeln, während im LAWA Verfahren die effektive Porosität ausgehend von den Verhältnissen an der GWM abgeleitet wird, der für den gesamten GWL stehen soll. Zudem wird wie unter 2.5 beschrieben hier die Mindestreaktionszeit der Grundwassermessstellen berechnet. Methodische Unterschiede führen dazu, dass die hier ermittelten Reaktionszeiten im Durchschnitt kürzer ausfallen und sich die Ergebnisse nicht durch den Vergleich mit den Ergebnissen der Analyse der Reaktionszeiten nach Wriedt (2017) bestätigen lassen.

3.4 Fließstrecken

Die Berechnung der Fließstrecke war für 44 Grundwassermessstellen im Lockergestein möglich (Abbildung 18). Die Hälfte der berechneten Fließstrecken weist Längen unter 1 km auf. Die kürzeste Fließstrecke von nur 34 m (Filtermitte) wurde für die Grundwassermessstelle 1720021 in der Hunte-Leda Moorniederung ermittelt, wohingegen die

längste Fließstrecke von etwa 9 km für die Grundwassermessstelle 200000904 in der Syker Geest berechnet wurde. Abbildung 19 zeigt die räumliche Verteilung der Messstellen und ihre berechneten Fließstrecken. Für den hydrogeologischen Teilraum Lüneburger Heide West findet sich zum Beispiel eine Fließstrecke von 125 m (Grundwassermessstelle 500003024), als auch eine Fließstrecke von etwa 5 km Länge (Grundwassermessstelle 500000348).

Wie auch bei der Berechnung der Verweil- und Fließzeiten gehen in die Berechnung der Fließstrecken verschiedene Eingangsgrößen ein. Es wurde geprüft, ob die Eingangsgrößen mit den Ergebnissen der Fließstreckenbestimmung korreliert sind und wie stark. Im Ergebnis konnten maximal mäßige Zusammenhänge zu den Parametern Filtertiefe und Filterüberdeckung (Abbildung 20), zur hydraulischen Leitfähigkeit und dem Gradienten der Grundwasseroberfläche an der Messstelle festgestellt werden (nicht abgebildet). Die Korrelation der Fließstrecken mit der Grundwasserneubildung lieferte keine statistisch signifikanten Ergebnisse ($p > 0,05$) (nicht abgebildet). Im Unterschied zu den Verweil-, Fließ- und Reaktionszeiten sticht für die Fließstrecken nach dieser Auswertung kein Eingangsparameter hervor, der besonders ausschlaggebend sein könnte für das Ergebnis.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, sind die Fließbahnen vom Ort der Grundwasserneubildung zur Filteroberkante bzw. zur Filterunterkante unterschiedlich lang. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass teilweise große Differenzen von bis zu 7 km zwischen den Ergebnissen der Fließstrecken zur FOK und zur FUK auftreten. Grundsätzlich sollte diese Differenz größer sein, je länger die Filterstrecke ist. Zusätzlich sollte sie mit dem Abstand oder der mittleren Fließstrecke zwischen dem Ort der GWN und der Messstelle zunehmen. Mit den berechneten Parametern könnte für jede Messstelle ein Neubildungsgebiet entsprechender Größe (bis zu einer Länge von 7 km) abgebildet werden.

Die Scatterplots in Abbildung 21 zeigen den Zusammenhang zwischen der Fließstreckendifferenz FOK-FUK und der Filtermächtigkeit (links) sowie abermals dieser Differenz und der mittleren Fließstrecke (rechts). Während die Punktpaare in der linken Abbildung kein bestimmtes Muster zeigen, obwohl ein kausaler Zusammenhang gegeben ist, ist eine lineare Korrelation in der rechten Abbildung erkennbar, die mit einem Korrelationskoeffizienten von $\rho = 0,87$ (sehr stark) untermauert werden kann. Der Zusammenhang zur Filterlänge könnte durch den sehr starken Einfluss der mittleren Fließstrecke auf das Ergebnis überlagert werden. Je länger die Fließstrecke vom Grundwasserneubildungsgebiet zur Filtermitte ist, desto größer ist die Differenz der Fließstrecken zur Ober- und Unterseite des Filters. Diese Differenz entspricht der Länge des Grundwasserneubildungsgebiets. Sie nimmt im Schnitt um etwa 35 m pro 100 m Fließstrecke zu.

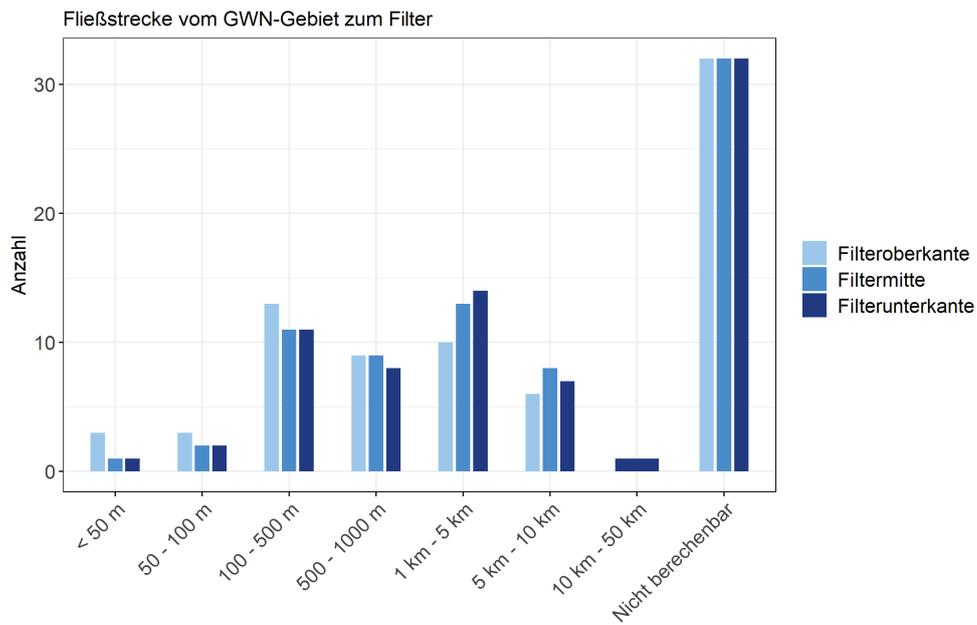


Abbildung 18: Verteilung der Grundwassermessstellen auf die verschiedenen Fließstrecken-Klassen abhängig von Filteroberkante, -unterkante oder -mitte.

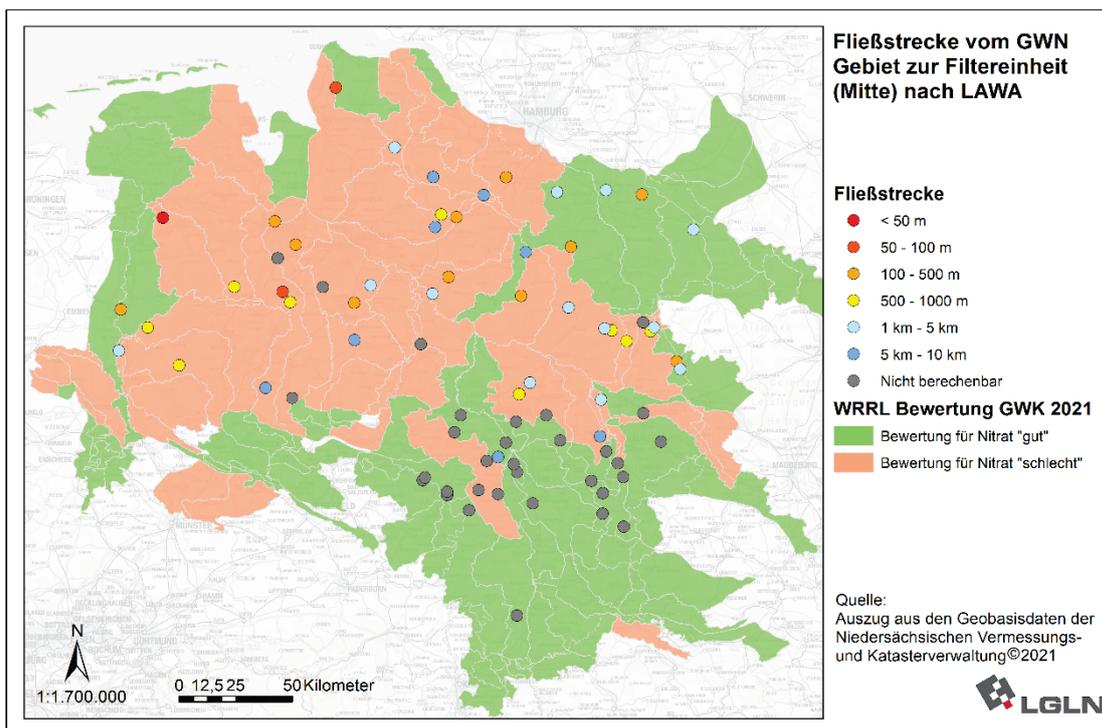


Abbildung 19: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen mit ihren zugehörigen Fließstrecken vom Ort der Grundwasserneubildung bis zur Filtermitte.

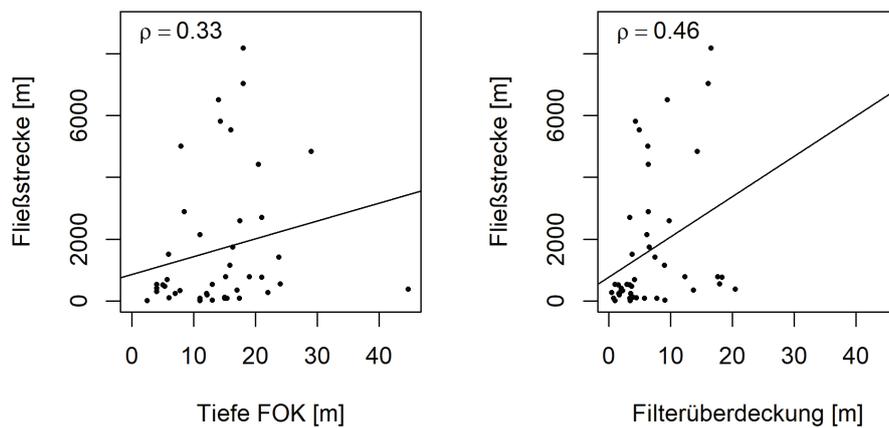


Abbildung 20: Scatterplots der Fließstrecken aufgetragen über der Tiefe der Filteroberkante (FOK) (links) und über der Filterüberdeckung (rechts). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet.

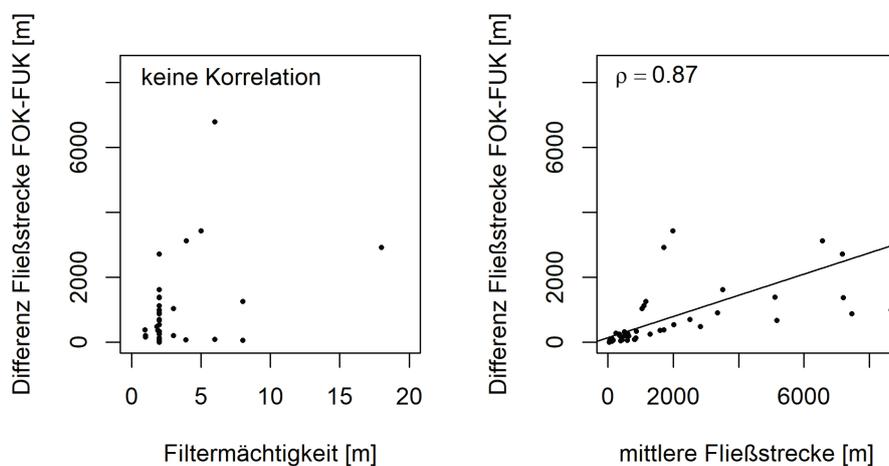


Abbildung 21: Scatterplots der Differenz der Fließstrecke zwischen Filterober- und Filterunterkante (FOK-FUK) aufgetragen über der Filtermächtigkeit (links) und der Fließstrecke zur Filtermitte (rechts). Gibt es einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($p < 0,05$) wird der Korrelationskoeffizient ρ nach Spearman angegeben und eine Regressionsgerade gezeichnet.

3.5 Szenarienauswertung

3.5.1 Einfluss des Strukturfaktors

Im Festgestein geht der Strukturfaktor in die Berechnung der Verweilzeit in der ungesättigten Zone ein. Der Strukturfaktor beschreibt die Klüftung der Gesteine, welche unter anderem von ihrer tektonischen Belastung, dem Material der Gesteinspakete und der Ordnung der Klüfte im Raum abhängt. Er bildet zusammen mit dem Gesteinswert die Klüftungsneigung der Gesteine ab (LAWA, 2018a). Die Bewertungsskala reicht von 25: *ungeklüftet* bis 0,1: *stark geklüftet, zerrüttet, stark verkarstet*. Da anhand der vorliegenden Datengrundlage keine belastbare Zuordnung möglich war, wurde für die Berechnung der Verweilzeit in Festgesteinsschichten der Wert 1: nicht bekannt eingesetzt. Um den Einfluss des Strukturfaktors auf die Verweilzeit und die Reaktionszeit abschätzen zu können, wurden der Minimalwert und der Maximalwert anstatt 1 in die Gleichung eingesetzt und in Szenario 08 und Szenario 09 neu berechnet.

Abbildung 22 zeigt die prozentualen Anteile der berechneten Verweilzeiten der Szenarien 08 und 09 und des Ausgangsszenarios 01 für die sechs Grundwassermessstellen, deren Schichtenverzeichnisse in der ungesättigten Zone teilweise oder komplett Festgesteinsschichten aufweisen. Die Verweilzeit an diesen Messstellen ist folglich die Summe der berechneten Verweilzeiten in Fest- und Lockergesteinsschichten in der ungesättigten Zone. Im Ausgangsszenario nahm die Verweilzeit in den Festgesteinsschichten bei allen dieser 6 Messstellen Werte < 1 Jahr an, wohingegen die Verweilzeit in den Lockergesteinsschichten dieser Messstellen Werte bis 28 Jahre annahm und damit den Großteil der aufsummierten Verweilzeit ausmachte. Deshalb wirkt sich das Einsetzen des Minimalwerts in Szenario 08 nur marginal auf die aufsummierte Verweilzeit aus. In Szenario 09 nehmen die Verweilzeiten der Festgesteinsschichten jedoch Werte zwischen 1-18 Jahren an, wodurch sich die gesamte Verweilzeit in einem Fall sogar von 17 auf 35 Jahre verdoppelt. Durch die kurzen Mindestfließen des Grundwassers im Festgestein vom Neubildungsgebiet bis zum Filter pausen sich diese Auswirkungen 1:1 auf die Reaktionszeit durch (Abbildung 23). Liegt das Festgestein also tatsächlich ungeklüftet vor (Strukturfaktor 25), aufgrund der Datengrundlage erfolgte jedoch

eine Einstufung als nicht bekannt (Strukturfaktor 1), kann die berechnete Verweilzeit stark von den realen Bedingungen abweichen.

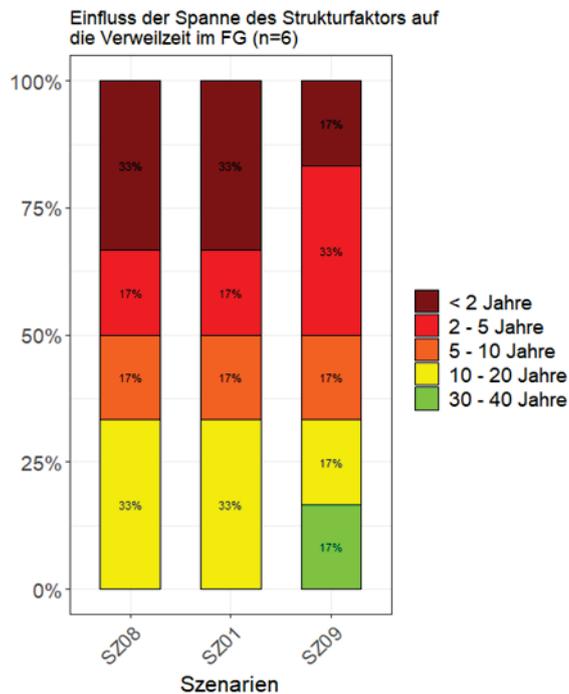


Abbildung 22: Prozentuale Anteile der berechneten Verweilzeiten der Szenarien 1, 8 und 9 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses des Strukturfaktors.

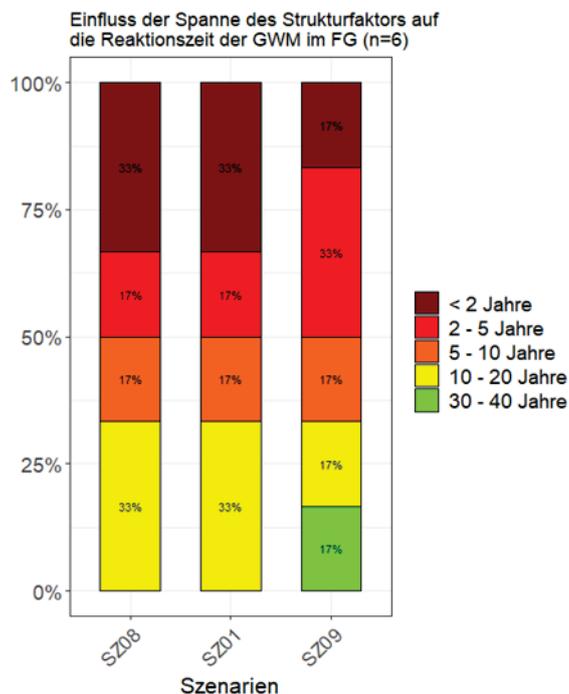


Abbildung 23: Prozentuale Anteile der berechneten Reaktionszeiten der Szenarien 1, 8 und 9 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses des Strukturfaktors.

3.5.2 Einfluss der effektiven Porosität

Die effektive Porosität ist ein Faktor der Berechnung der Fließzeit sowohl im Lockergestein, als auch im Festgestein nach dem durch die LAWA entwickelten Teufe-Neubildungs-Verfahren. Sie stellt einen durch empirische Zusammenhänge abgeleiteten Parameter dar und bezeichnet den durchflusswirksamen Porenraumanteil (Fuchs et al., 2017). In der Regel wird sie anhand der Korngröße oder Gesteinsart abgeschätzt und in Wertespannen angegeben. In das Ausgangsszenario 01 gingen Minimalwerte der zugeordneten Wertespanne der effektiven Porosität ein. Damit wurden Mindestfließzeiten vom Grundwasserneubildungsgebiet bis zum Filter der Grundwassermessstellen kalkuliert. In Szenario 02 wurden die zugeordneten Maximalwerte der effektiven Porosität angenommen. Die Fließzeiten im Festgestein und im Lockergestein verlängern sich in Szenario 02 um 0 bis 6 Jahre. Der Porenraum wird durch das Einsetzen der maximalen effektiven Porosität theoretisch vergrößert, während die durchströmende Wassermenge gleichbleibt. Durch diesen Effekt wird der laterale Fluss theoretisch verlangsamt und die Fließzeit verlängert sich.

Abbildungen 24 bis 26 visualisieren den Vergleich zwischen Szenario 01 und Szenario 02 in Festgesteinsgrundwasserkörpern. Die genutzte effektive Porosität zeigt eine geringe Erhöhung von unter 0,02 auf 0,02-0,08 bei zwei Drittel der Grundwassermessstellen, während sie für den Rest bei unter 0,02 verbleibt (Abbildung 24). Die Fließzeit zu den Grundwassermessstellen bleibt bei zwei Dritteln weiterhin <2 Jahre, während die anderen eine bis zwei Fließzeiten-Klassen aufsteigen (Abbildung 25). Für die Reaktionszeiten bedeutet das ebenfalls einen Anstieg. Reaktionszeiten unter zwei Jahren tauchen in Szenario 02 nicht mehr auf (Abbildung 26).

In Szenario 01 für das Lockergestein war ein Großteil der eingehenden effektiven Porosität von etwa 90 % zwischen 0,08 und 0,15 gelegen. Dieser Anteil schrumpft in Szenario 02 für das Lockergestein auf 60 %. Knapp 40 % nehmen in Szenario 02 Werte >0,15 an (Abbildung 27). Dadurch halbiert sich die Anzahl der Grundwassermessstellen mit Fließzeiten unter 2 Jahren in etwa von 42 % auf 25 % von Szenario 01 auf Szenario 02, während sich die Grundwassermessstellen mit Fließzeiten über 10 Jahren von 6 auf 22 % erhöhen (Abbildung 28). Durch die Verlängerung der Fließzeiten von Szenario 01 zu Szenario 02 verlagert sich auch das Verhältnis der Reaktionszeit-Klassen hin zu längeren Reaktionszeiten. Auch hier wurden keine Reaktionszeiten unter 2 Jahren mehr ermittelt und der Anteil der Reaktionszeiten von 20-30 Jahren verdoppelte sich auf 15 % (Abbildung 29).

Die aus der Spanne der effektiven Porosität resultierende Spanne in der Reaktionszeit von 0 bis 6 Jahren wird angesichts der Einfachheit des Verfahrens als vertretbar angesehen. Es wird jedoch empfohlen diesen Effekt zu berücksichtigen und als Ergebnis für die einzelnen Messstellen entweder die Spanne der Reaktionszeit anzugeben oder ihren Mittelwert +/- Anzahl der jeweiligen Jahre.

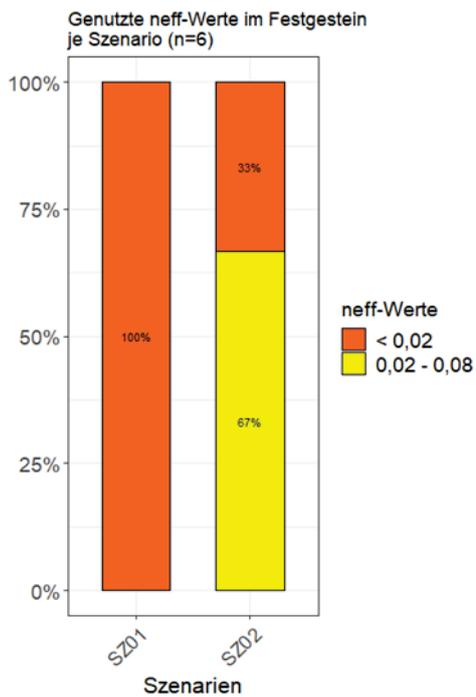


Abbildung 24: Prozentuale Anteile der in die Berechnung eingegangenen effektiven Porosität (n_{eff}) in Szenario 1 und 2 im Festgestein.

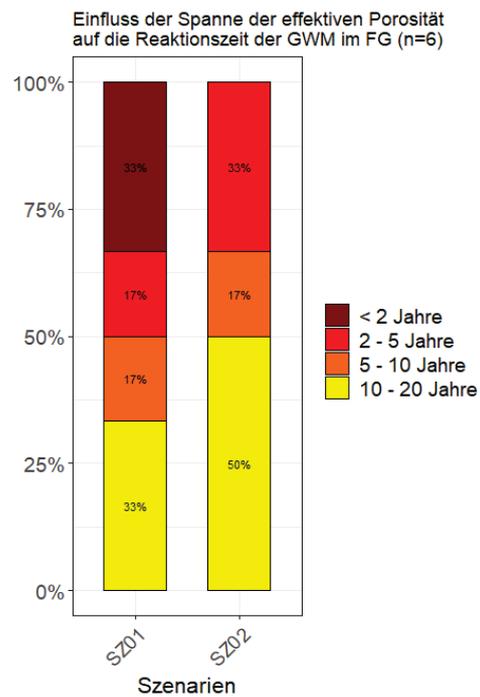


Abbildung 26: Prozentuale Anteile der berechneten Reaktionszeiten der Szenarien 1 und 2 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses der effektiven Porosität im Festgestein.

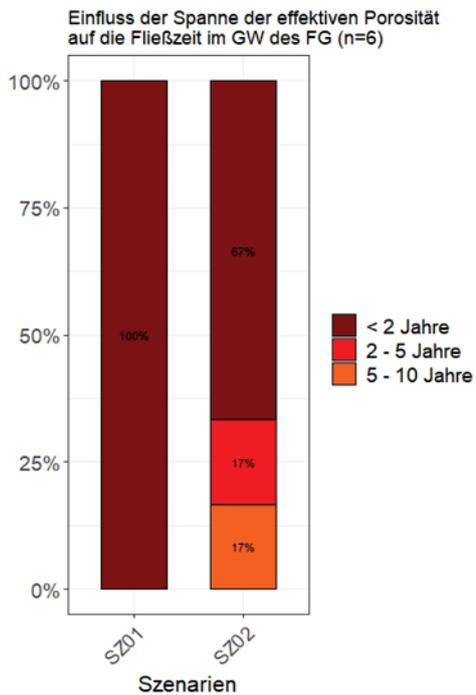


Abbildung 25: Prozentuale Anteile der berechneten Fließzeiten (Filtermitte) der Szenarien 1 und 2 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses der effektiven Porosität im Festgestein.

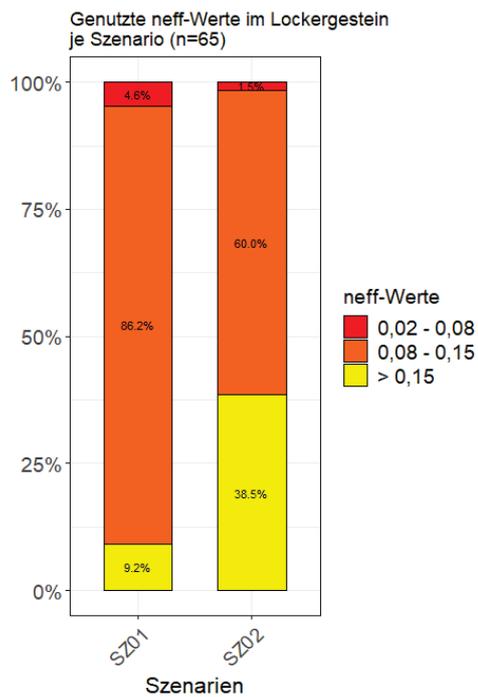


Abbildung 27: Prozentuale Anteile der in die Berechnung eingegangenen effektiven Porosität (n_{eff}) in Szenario 1 und 2 im Lockergestein.

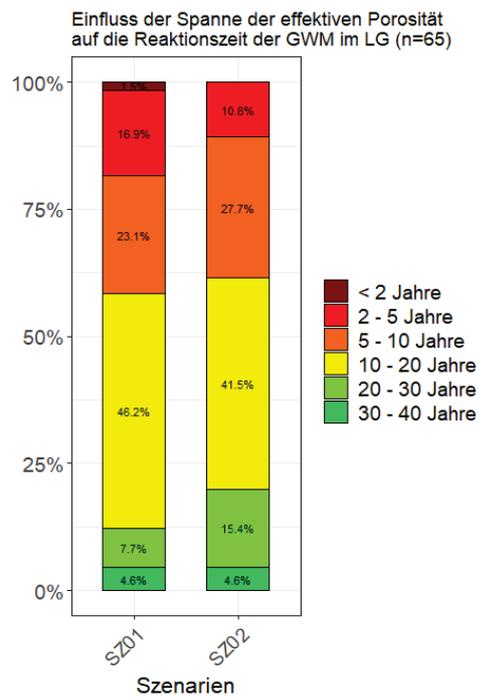


Abbildung 29: Prozentuale Anteile der berechneten Reaktionszeiten der Szenarien 1 und 2 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses der effektiven Porosität im Lockergestein.

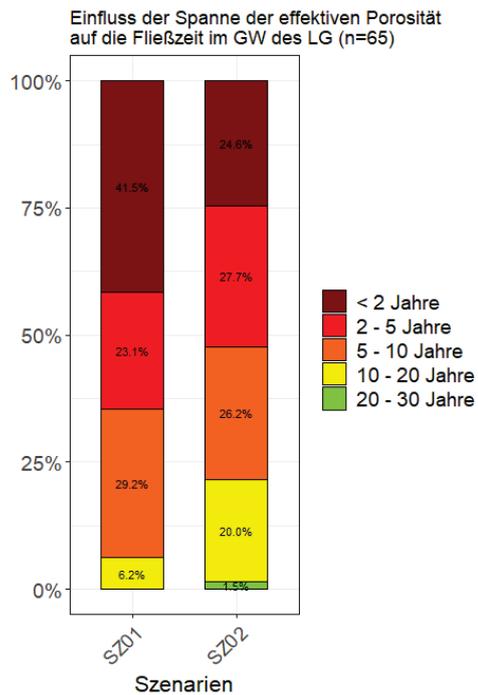


Abbildung 28: Prozentuale Anteile der berechneten Fließzeiten (Filtermitte) der Szenarien 1 und 2 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses der effektiven Porosität im Lockergestein.

3.5.3 Einfluss der hydraulischen Leitfähigkeit

In die Berechnung der Fließstrecke geht die hydraulische Leitfähigkeit der Gesteinsschichten ein, die wie die Porosität unter anderem abhängig ist von ihrer Körnung, Lagerung, chemischen Verwitterung und tektonischen Belastung. Erfolgt die Zuordnung der hydraulischen Leitfähigkeit über die Gesteinsart oder die Textur, werden Wertespanssen angegeben. Die Berechnung der Fließstrecken vom Grundwasserneubildungsgebiet zum Filter war im genutzten Messstellenpool nur für Grundwassermessstellen im Lockergestein möglich. Hier umfassen die Wertespanssen im Schnitt 1-2 Größenordnungen. Für einige Grundwassermessstellen gingen Einzelwerte ein, die bei Funktionsprüfungen gemessen wurden. Im Ausgangsszenario 01 wurden die gemessenen hydraulischen Leitfähigkeiten aus den Funktionsprüfungen und Mittelwerte der zugeordneten hydraulischen Leitfähigkeiten aus dem LAWA-Verfahren genutzt. In Szenario 04 wurden, wenn vorhanden, die Werte aus den Funktionsprüfungen eingesetzt oder aus den zugeordneten Werten aus dem LAWA-Verfahren die Minimalwerte, in Szenario 05 Maximalwerte. In Szenario 06 und 07 wurde weitere Literatur mit einbezogen und diesmal Minimal- bzw. Maximalwerte aller Quellen für die Berechnung der Fließstrecken genutzt (Tabelle 4).

Die Reihenfolge der Szenarien in Abbildung 30 von links nach rechts entspricht den eingesetzten hydraulischen Leitfähigkeiten von den niedrigsten zu den höchsten Werten. In Szenario 06 liegen die hydraulischen Leitfähigkeiten zwischen 10^{-4} – 10^{-5} m/s. Sie können Feinsanden oder schluffigen Sanden zugeordnet werden. In Szenario 04 und 01 werden diese für nur noch 40 und 30 % der Berechnungen eingesetzt und tauchen in Szenario 05 und 07 nicht mehr auf. Hier dominieren hydraulische Leitfähigkeiten zwischen 10^{-3} – 10^{-4} m/s, die für Mittelsande, aber auch Fein- und Grobsande stehen. Ein geringer Prozentsatz der Messstellen nimmt in den Szenarien 04, 01, 05 und 07 Werte $>10^{-3}$ m/s an, welche typischerweise in Grobsanden und Kiesen vorkommen.

Die Verschiebung der prozentualen Anteile der hydraulischen Leitfähigkeiten in den Szenarien spiegelt sich deutlich

in den Ergebnissen der Fließstrecken wider (Abbildung 31). Während in Szenario 06 alle ermittelten Fließstrecken <1 km Länge aufweisen, sind es in Szenario 04 nur noch etwa 60 %, in Szenario 01 etwa 50 %, in Szenario 05 etwa 40 % und nur noch etwa 25 % in Szenario 07. In den Szenarien 05 und 07 dominieren Fließstrecken zwischen 1 und 10 km. Allerdings liegen die berechneten Maximalwerte zwischen 10 und 500 km Länge, was in Anbetracht der geringen Filtertiefen der Grundwassermessstellen unrealistisch erscheint.

Unter Einbeziehung der gemessenen hydraulischen Leitfähigkeiten aus den Funktionsprüfungen und der vom LAWA-Verfahren vorgeschlagenen Spannen ergeben sich Spannen für die berechneten Fließstrecken zwischen 0 und 12 km. Dieses Ergebnis soll anhand der Beispiele Grundwassermessstellen 100000874 und Grundwassermessstellen 405180351 erläutert werden. In Szenario 01 wurden für beide Grundwassermessstellen Fließstrecken von etwa 7 km kalkuliert. Die Filterlage von Grundwassermessstellen 100000874 befindet sich in einer Grobsandschicht, für die laut LAWA-Verfahren Werte von 10^{-3} m/s (keine Spanne) angenommen werden können. Somit ergibt sich auch keine Spanne für die Fließstrecke an der Grundwassermessstelle. Zusätzlich muss keine Spanne angegeben werden, wenn ein gemessener Wert aus Funktionsprüfungen vorliegt und keine hydraulische Leitfähigkeit abgeschätzt werden muss. Die Filterlage von Grundwassermessstellen 405180351 befindet sich in einer Mittelsand-dominierten Schicht, der eine hydraulische Leitfähigkeit zwischen 10^{-3} – 10^{-4} m/s zugeordnet wird. Daraus berechnet sich für den Minimalwert eine Fließstrecke von etwa 1,3 km und für den Maximalwert eine Fließstrecke von etwa 13 km – genau eine Zehnerpotenz Unterschied, die eine ungefähre Spanne von 12 km ausmacht. Unter Einbeziehung weiterer Literatur können die Spannen zwischen der minimalen und maximalen Fließstrecke pro Grundwassermessstellen, berechnet mit den minimalen und maximalen gefundenen hydraulischen Leitfähigkeiten, sogar zwischen 300 m und etwa 420 km liegen. Derartige Größenordnungen sind mit Blick auf die hydraulische und hydrogeologische Gliederung der Grundwasserleiter Niedersachsens als unrealistisch einzustufen.

Tabelle 4: Übersicht über die Quellen der eingesetzten hydraulischen Leitfähigkeiten (k_f -Werte) pro Szenario

Szenarien	Funktionsprüfungen	LAWA-Verfahren	Weitere Literatur	
01	x	x		Funktionsprüfung, andernfalls LAWA-Mittelwerte
04	x	x		Funktionsprüfung, andernfalls LAWA-Minima
05	x	x		Funktionsprüfung, andernfalls LAWA-Maxima
06	x	x	x	Minima
07	x	x	x	Maxima

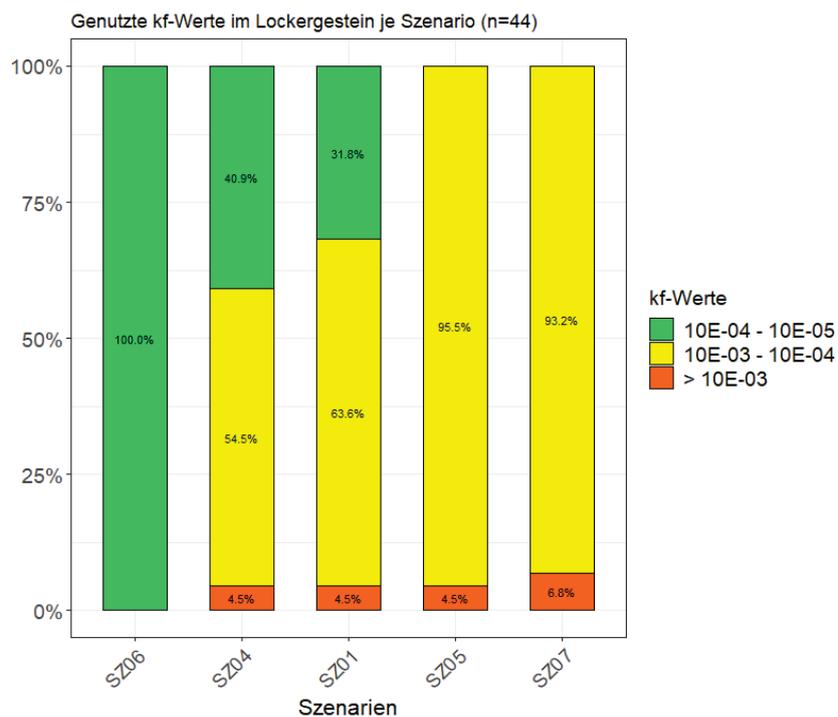


Abbildung 30: Prozentuale Anteile der in die Berechnung eingegangenen hydraulischen Leitfähigkeiten (k_f -Werte) in Szenario 1, 4, 5, 6 und 7 im Lockergestein.

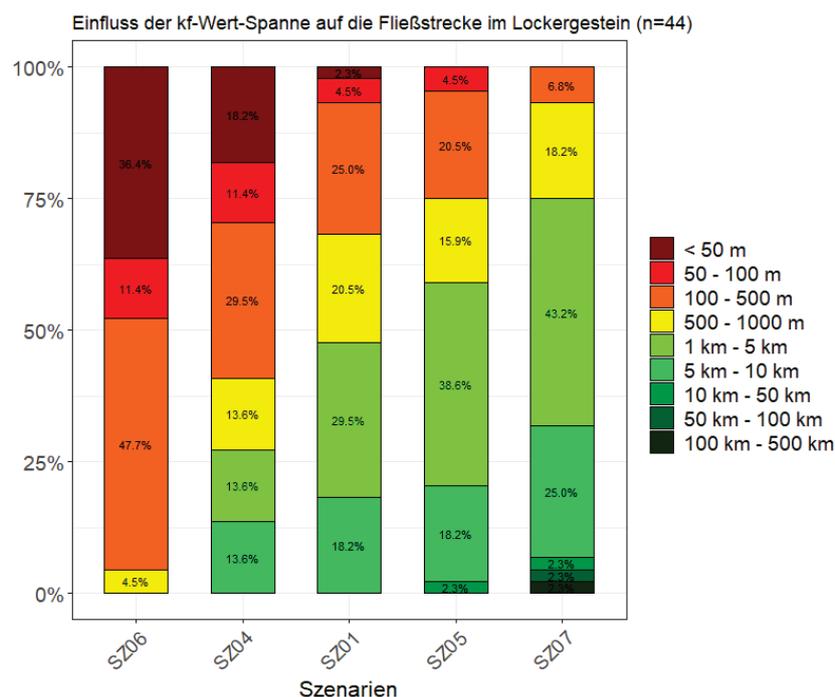


Abbildung 31: Prozentuale Anteile der berechneten Fließstrecken (Filtermitte) der Szenarien 1, 4, 5, 6 und 7 im Vergleich hinsichtlich des Einflusses der hydraulischen Leitfähigkeit (k_f -Werte) im Lockergestein.

Im Vergleich zum Ausgangsszenario wurden durch die Ausreizung der Spannen der hydraulischen Leitfähigkeit deutlich kürzere oder längere Fließstrecken ermittelt, vor allem unter Einbeziehung weiterer Literaturwerte. Wenn die mittlere berechnete Fließstrecke aus Szenario 01 relativ groß war (>500 m) und eine Spanne für die hydraulische Leitfähigkeit angegeben wurde, betrug die Spanne zwischen minimaler und maximaler Fließstrecke in mehr als 70 % der Fälle über

1 km. Die Ermittlung der Fließstrecken war nur für Grundwassermessstellen im Lockergestein möglich. Da die Spannen der hydraulischen Leitfähigkeit des Festgesteins größer ausfallen, ist mit noch deutlicheren Unterschieden in der Berechnung der Minimal- und Maximalwerte der Fließstrecken zu Grundwassermessstellen in Festgestein zu rechnen. Zusätzlich muss noch die Spanne zwischen der Fließstrecke zur Filteroberkante und -unterkante berücksichtigt werden, die

mit Länge der mittleren Fließstrecke größer wird und in diesem Messstellenpool überwiegend Werte zwischen 0,1 – 1 km und im Extremfall Werte bis etwa 7 km annahm.

3.6 Nitratkonzentrationen an Grundwassermessstellen mit kurzen Reaktionszeiten

An 31 Grundwassermessstellen wurden Reaktionszeiten kleiner oder gleich 10 Jahren ermittelt (Abbildung 14). Potentiell könnten an diesen Grundwassermessstellen Erfolge der ergänzenden Maßnahmen der WRRL zum Grundwasserschutz, die seit 2010 Anwendung finden, sichtbar sein. Zur Überprüfung dieser Annahme wurden die Nitratkonzentrationen pro Grundwassermessstellen über die Zeit (seit 2000) aufgetragen (Abbildung 32-37). Nitrat gilt als praktisch nicht sorbierend und sollte daher mit näherungsweise gleicher Geschwindigkeit wie das Wasser transportiert werden. Der Zeitraum, in dem die ergänzenden Maßnahmen theoretisch Einfluss auf die Nitratkonzentration haben könnten, ist gelb hinterlegt. Zusätzlich wurden der Start der ergänzenden Maßnahmen (2010) sowie die Schwellenwerte der Nitratkonzentration im Grundwasser (37,5 und 50 mg/l) durch Linien markiert.

Die Hälfte der 31 Grundwassermessstellen zeigt keine eindeutige Entwicklung in eine Richtung an, sondern stagniert oder unterliegt größeren Schwankungen, wie beispielsweise an der Grundwassermessstelle 100000864 (Abbildung 32). Allerdings ist für 4 dieser Grundwassermessstellen erst seit frühestens 2018 eine mögliche Trendänderung mit Bezug zur Gewässerschutzberatung zu erwarten, da ihre berechneten Reaktionszeiten mindestens 8 Jahre betragen. An 11 Grundwassermessstellen wurde eine günstige Entwicklung festgestellt, die durch eine Abnahme der Nitratkonzentration (Abbildung 33) oder durch eine Unterbrechung des Anstiegs der Nitratkonzentrationen (Abbildung 34) gekennzeichnet ist. Für 5 dieser 11 Grundwassermessstellen ist zwar eine günstige Entwicklung in dem Zeitraum, in dem die ergänzenden Maßnahmen theoretisch Einfluss auf die Nitratkonzentration haben könnten, zu sehen, allerdings sind die Veränderungen der Konzentrationen nicht größer als Konzentrationsschwankungen im Zeitraum zuvor oder es wurde vorher schon ein abnehmender Trend verzeichnet (Abbildung 35). In 5 Fällen stieg die Nitratkonzentration in besagtem Zeitraum an (Abbildung 36). Diese ungünstige Entwicklung war an 3 Grundwassermessstellen jedoch nicht viel stärker als andere Konzentrationsschwankungen zuvor (Abbildung 37). Insgesamt konnte ein möglicher zeitlicher Zusammenhang mit dem Beginn der Maßnahmenumsetzung in den hier betrachteten Messstellen nicht identifiziert werden. Da keine flächenscharfen Daten zu den Maßnahmen vorliegen (Datenschutz), ist auch eine Überprüfung, ob in den betreffenden Zeiträumen auch eine Reduktion der Nitratreinträge durch ergänzende Maßnahmen im Zustromgebiet stattgefunden hat, nicht möglich.

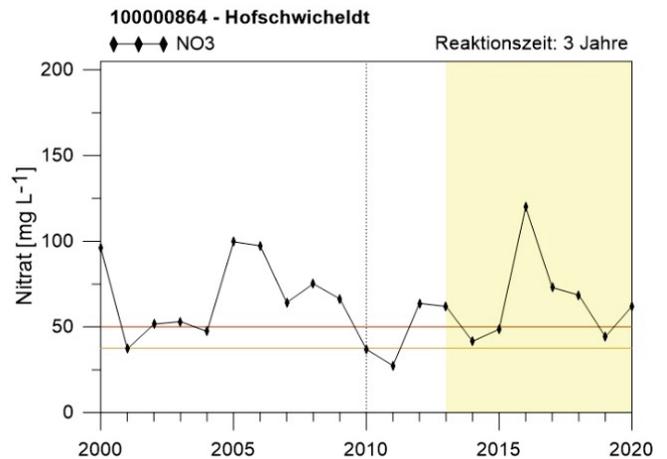


Abbildung 32: Entwicklung der Nitratkonzentration an Grundwassermessstelle 100000864.*

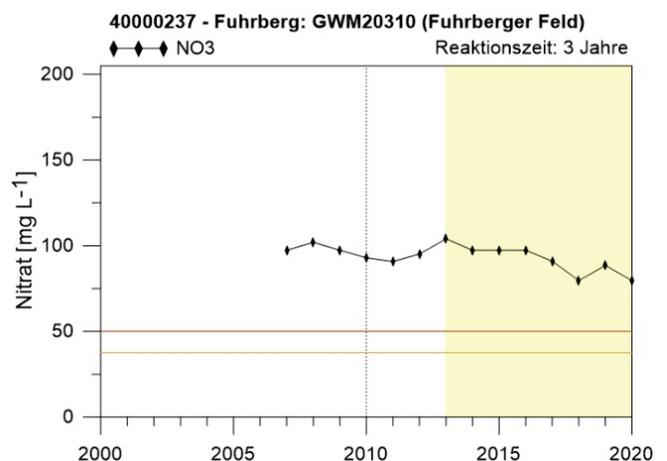


Abbildung 33: Entwicklung der Nitratkonzentration an Grundwassermessstelle 40000237.*

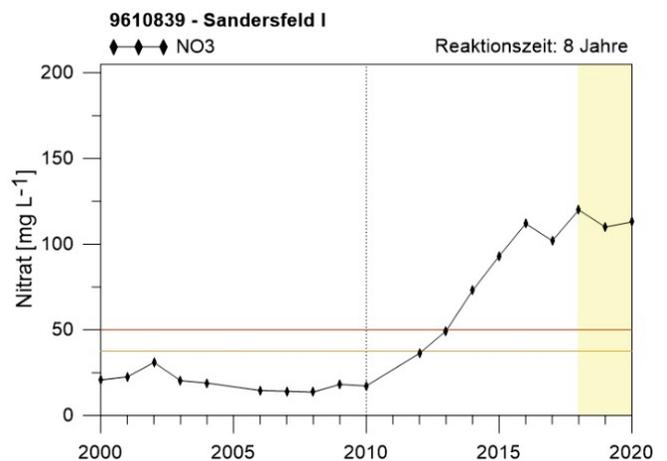


Abbildung 34: Entwicklung der Nitratkonzentration an Grundwassermessstelle 9610839.*

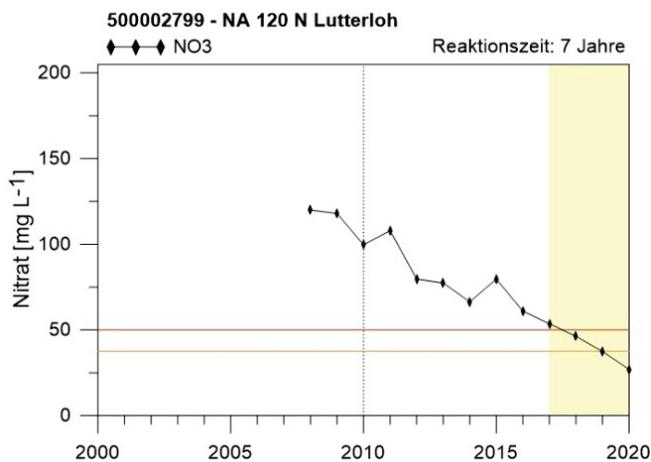


Abbildung 35: Entwicklung der Nitratkonzentration an Grundwassermessstelle 500002799.*

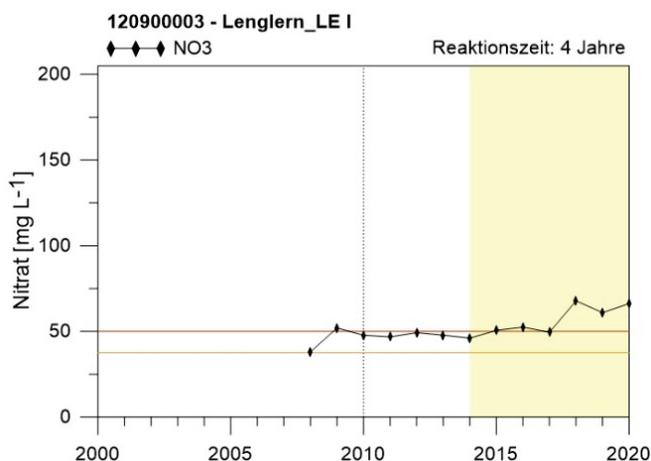


Abbildung 36: Entwicklung der Nitratkonzentration an Grundwassermessstelle 120900003.*

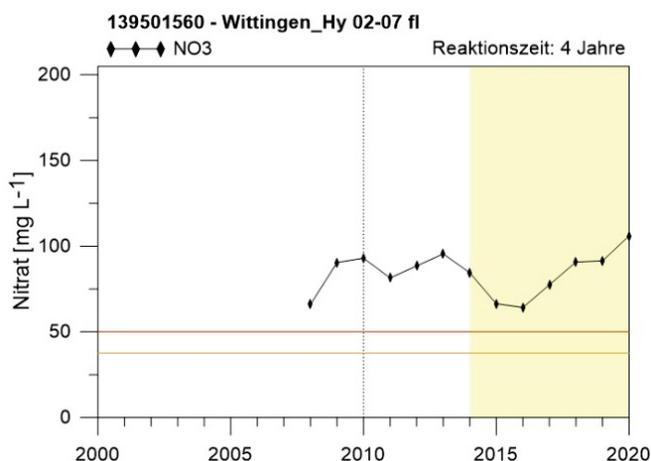


Abbildung 37: Entwicklung der Nitratkonzentration an Grundwassermessstelle 139501560.*

* Der gelbe Bereich markiert den Zeitraum, in dem ein Einfluss der ergänzenden Maßnahmen potentiell sichtbar sein könnte. Die gestrichelte senkrechte Linie markiert den Start der ergänzenden Maßnahmen 2010. Die rote Linie markiert den Nitratgrenzwert von 50 mg/L im Grundwasser, die orangefarbene 37,5 mg/L.

3.7 Diskussion zur Anwendbarkeit des Verfahrens und zu methodischen Besonderheiten

Insgesamt war für 71 Grundwassermessstellen der Messstellengruppen a) und b) sowie für alle 29 Grundwassermessstellen der Messstellengruppe c) die Berechnung der Reaktionszeiten nach LAWA-Verfahren möglich. Die Fließstrecken konnten an 44 Grundwassermessstellen der Messstellengruppen a) und b) bestimmt werden (Bestimmung für Messstellengruppe c) war nicht vorgesehen). Für die restlichen Messstellen lagen bestimmte Eingangsdaten nicht vor oder konnten nicht abgeleitet werden. Zum Beispiel wurden für die zwei Förderbrunnen und die Quelle keine Reaktionszeiten und Fließstrecke berechnet. In das dafür vorgesehene Berechnungsverfahren gehen zusätzliche Informationen wie die Kenntnisse zu Förderraten bzw. zu ihrer Schüttung mit ein (LAWA, 2020), welche jedoch nicht aus dem vorliegenden Datensatz des NLWKN hervorgehen.

Generell war die vorliegende Datengrundlage zur Anwendung des LAWA-Verfahrens für einen Großteil der Grundwassermessstellen ausreichend. Nur für wenige Grundwassermessstellen lagen keine detailscharfen Unterlagen vor. Vor allem konnten Grundwassermessstellen in Bereichen von Grundwasserkörpern, in denen kein Gleichenplan zur Verfügung stand, für die Ermittlung der Fließstrecken nicht berücksichtigt werden. Das betrifft vor allem Grundwassermessstellen im Bereich von Festgesteins-Grundwasserkörpern. Weiterhin existieren für einige Eingangsparameter, wie zum Beispiel für die Grundwasserneubildung, aktuellere Datensätze als die hier genutzten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich die generelle Größenordnung der Ergebnisse durch das Einsetzen aktuellerer Datensätze nicht merklich ändert, sodass dieser Faktor zumindest für die Bewertung des Verfahrens unerheblich ist.

Die Verweilzeiten im Boden und der Grundwasserdeckschicht im Lockergestein werden nach DIN 19732 berechnet, wobei in die Berechnung der Verweilzeit in der Deckschicht die Grundwasserneubildung eingeht, während für die Berechnung der Verweilzeit im Boden die örtliche Sickerwasserrate genutzt werden sollte. Unter der vereinfachten Annahme, dass 100 % des Sickerwassers in Grundwasser umgesetzt werden, wurde für die Berechnung der Verweilzeiten im Boden ebenfalls die Grundwasserneubildung nach GROWA (Ackermann et al., 2015) für die Sickerwasserrate eingesetzt. Die beiden Größen sind methodisch voneinander abhängig. Wird nicht das gesamte Sickerwasser in Grundwasser umgesetzt, sondern nur ein Teil, müsste der Eingangswert für die Sickerwasserrate entsprechend größer werden und die Verweilzeit in der Bodenzone kürzer. Der Einfluss wurde überprüft indem die Sickerwasserrate verdoppelt wurde, also nur die Hälfte des Sickerwassers in Grundwasser umgesetzt wird. Die Verweilzeit verkürzte sich dadurch im Mittel um 1 Jahr und um maximal 3 Jahre. Dieser Fehler wird in Anbetracht der allgemeinen Unsicherheiten der Methode für vernachlässigbar gehalten.

Ein weiterer Aspekt spricht für die Nutzung der Grundwasserneubildung nach GROWA (Ackermann et al., 2015) bei der Berechnung der Verweilzeit im Boden. Die mittlere Grundwasserneubildung wurde aus Rasterdaten entlang identifizierter Grundwasserfließpfade bestimmt, da angenommen wird, dass durch diese regionale Eingrenzung eine charakteristische Grundwasserneubildung für das relevante Fließsystem erfasst werden kann. Durch die im LAWA-Verfahren vorgeschlagene iterative Ermittlung der Grundwasserneubildung wird kein Genauigkeitsgewinn unter Anbetracht der geschilderten Unsicherheiten bei der Bestimmung der Fließstrecken erwartet. Eine Bestimmung der Sickerwasserrate am Ort der Messstelle oder nach der hier genutzten Methode für die Bestimmung der Grundwasserneubildung könnte dazu führen, dass die Sickerwasserrate einen kleineren Wert annimmt als die Grundwasserneubildung. Das ist jedoch nicht möglich. Eine exakte Bestimmung der Sickerwasserrate kann hier somit methodisch nicht aufgelöst werden.

Im Abschlussbericht der LAWA wird ausdrücklich daraufhin gewiesen, dass das Verfahren aufgrund seiner Einfachheit ein Maß der Genauigkeit der Ergebnisse einbüßt. Durch die angegebenen Anwendungskriterien können vorab Grundwassermessstellen von der Berechnung ausgeschlossen werden, für die das Verfahren laut eigenen Angaben nicht geeignet ist. In dieser Auswertung wurde grundsätzlich eine Berechnung der Reaktionszeiten und Fließstrecken durchgeführt, wenn sie mit den vorhandenen Daten möglich war. Die Kriterien wurden geprüft und die Ergebnisse mit einer Notiz versehen. Können zum Beispiel Grundwassermessstellen aufgrund von verschiedenen Interpretationsansätzen keinem Grundwasserleiter präzise zugeordnet werden, sollten sie deshalb nicht von vornherein von der Berechnung ausgeschlossen werden. Laut LAWA Verfahren werden außerdem alle Messstellen bei denen die Varianz der k_f -Werte der Schichten mehr als eine Größenordnung beträgt als heterogen definiert und von der Berechnung ausgeschlossen. So kann ein Sandboden, laut Schichtenverzeichnis eine Folge aus Fein- und Grobsandschichten, vom Verfahren ausgeschlossen werden, da die abgeleiteten k_f -Werte aufgrund ihrer Wertespanssen mehr als eine Größenordnung auseinanderliegen. Ein Ausschluss der Messstellen, die die Kriterien des Verfahrens nicht erfüllen, ist also nicht in jedem Fall nötig, jedoch bedarf es im Nachgang einer Einzelbetrachtung der Ergebnisse und Eingangsdaten dieser Messstellen.

4 Zusammenfassung und Fazit

Das angewendete Verfahren zur Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten beruht auf einer Arbeitshilfe zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie, die 2018 von der LAWA veröffentlicht wurde. Darin werden zum einen Methoden zur Ermittlung von Verweilzeiten in der ungesättigten Zone und Fließzeiten im Grundwasser vorgestellt, welche dann zu Reaktionszeiten zusammengefasst werden, und zum anderen wird ein Ansatz zur Ermittlung des Grundwasserneubildungsgebiets durch die Berechnung der Fließstrecke darge-

stellt. Dabei soll die Abschätzung der Reaktionszeit einen Anhaltspunkt für das Eintreten potentieller Erfolge durchgeführter Maßnahmen liefern.

Das LAWA-Verfahren wurde auf drei Messstellengruppen angewandt. Messstellengruppen a) und b) umfassten zusammen 76 Messstellen. Für diese Messstellen wurden alle Auswertungen vorgenommen. In Messstellengruppe c) finden sich 29 Messstellen, für deren berechnete Fließzeit ein Abgleich mit Altersdatierungen vorgenommen wurde. Für die Messstellengruppen a) und b) erfolgte die Ermittlung der Reaktionszeit für 71 Grundwassermessstellen. Die Ergebnisse lagen zwischen 1 und 36 Jahren. Für Messstellengruppe c) lagen die ermittelten Reaktionszeiten zwischen 2 und 73 Jahren. Für 44 Grundwassermessstellen der Messstellengruppen a) und b) konnten Fließstrecken zwischen 34 m und 9 km ermittelt werden. Die Hälfte der Grundwassermessstellen wird nach dieser Berechnung aus einer Entfernung von unter einem Kilometer angeströmt.

Die Ergebnisse weisen sowohl für die Reaktionszeiten aber insbesondere für die Fließstrecken große Spannweiten auf. Diese Spannweiten ergeben sich aufgrund der Bandbreite der natürlichen Standortfaktoren wie den hydraulischen und geologischen Verhältnissen, der Höhe der Grundwasserneubildung oder der Einbautiefe des Filters. Um zu untersuchen, wie groß die aus den Wertespanssen resultierenden Unterschiede in den Ergebnissen sein können, wurden verschiedene Szenarien berechnet. Die Auswertung der Szenarien zeigte, dass die Wahl der Datengrundlage einen deutlich sichtbaren Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Die durch die Spannweiten der Literaturwerte verursachten Unsicherheiten lassen sich im Allgemeinen jedoch durch die Verwendung von Vor-Ort-Daten, insbesondere gemessenen Daten, erheblich reduzieren.

Die Szenarienauswertung zeigte, dass die Ergebnisse der Reaktionszeit sowohl vom Eingangswert für die effektive Porosität abhängig sind als auch vom gewählten Strukturfaktor. Die für die Festgesteinsschichten ermittelten Reaktionszeiten können stark von den realen Bedingungen abweichen, da die Datengrundlage eine belegbare Zuordnung des Strukturfaktors nicht zulässt und für die Zuordnung ein mittlerer Wert angenommen werden muss. Das Ausreizen der Spannen der effektiven Porosität resultierte in Unterschieden zum Ausgangsszenario von 0 bis 6 Jahren in den Reaktionszeiten der Grundwassermessstellen des betrachteten Messstellengruppen a) und b). Bei der Verwendung der Ergebnisse für weiterführende Analysen oder Auswertungen hinsichtlich der Maßnahmenumsetzung sollten diese Effekte berücksichtigt und die Reaktionszeiten gegebenenfalls als Spannen angegeben werden. Insgesamt zeigen die berechneten Reaktionszeiten jedoch einen signifikanten und plausiblen Zusammenhang zur Tiefe der Filteroberkante. Als grobe Schätzung kann im niedersächsischen Raum davon ausgegangen werden, dass im Mittel vom Ort der Grundwasserneubildung bis zum Erreichen der Grundwassermessstelle pro Tiefenmeter ungefähr ein Jahr benötigt wird.

Die Ergebnisse der Fließstrecken ergaben nach Auswertung der Szenarien große, zum Teil sogar unrealistische Spannweiten sowohl im Vergleich der Fließstrecken zur Filteroberkante mit den Fließstrecken zur Filterunterkante, als auch durch das Einsetzen von Minimal- und Maximalwerte der Spannen der hydraulischen Leitfähigkeiten aus verschiedenen Literaturangaben. Es wird deshalb zwingend empfohlen, falls keine gemessene hydraulische Leitfähigkeit vorliegt, die Fließstrecken in Spannen anzugeben und auf die vorliegenden Unsicherheiten hinzuweisen. Eine Verortung der Neubildungsgebiete zur Identifikation von Herkunftsgebieten für Grundwasserbelastungen ist mit diesem Verfahren nicht sicher durchführbar.

Etwa 45 % der Grundwassermessstellen weisen Reaktionszeiten von weniger als 10 Jahren auf, weitere knapp 40 % zwischen 10 und 20 Jahren. Für die restlichen etwa 15 % der Grundwassermessstellen wurden Reaktionszeiten größer als 20 Jahre berechnet. Von Beginn der ergänzenden Maßnahmen im Jahr 2010 bis 2020 hätten entsprechend an 45 % der Grundwassermessstellen des betrachteten Messstellenpools potentielle Erfolge messbar sein können. Deshalb wurden die 31 Grundwassermessstellen der Messstellengruppen a) und b), deren ermittelte Reaktionszeit weniger als 10 Jahre beträgt, im Hinblick auf die Entwicklung der Nitratkonzentration betrachtet. Für etwa 35 % der 31 Grundwassermessstellen konnte eine abnehmende Entwicklung der Nitratkonzentration festgestellt werden, die Hälfte der Grundwassermessstellen zeigte keine eindeutige Entwicklung und etwa 15 % sogar einen Anstieg der Nitratkonzentration. Da keine flächenscharfen Daten zu den Maßnahmen vorliegen (Datenschutz), ist eine Überprüfung, ob die abnehmenden Trends tatsächlich auf ergänzende Maßnahmen im Zustromgebiet zurückgeführt werden können, nicht möglich.

Bei 40 % der Messstellen könnten potentielle Erfolge der ergänzenden Maßnahmen zwischen 2020 und 2030 in Erscheinung treten. Im Jahr 2027 endet der 3. Bewirtschaftungszyklus der EG-WRRl. Das heißt für die restlichen 15 %

der Grundwassermessstellen des hier betrachteten Messstellenpools ist ein Erreichen der Ziele der EG-WRRl durch die Umsetzung von ergänzenden Maßnahmen ab dem Jahr 2010 im geplanten Zeitraum nicht möglich. Der Zeitraum bis zum Jahr 2027 scheint demnach zu kurz gegriffen um für alle Grundwasserkörper in Niedersachsen einen guten chemischen Zustand herbeizuführen. Zusätzlich entsprechen die berechneten Reaktionszeiten den Mindestreaktionszeiten der Messstellen und dienen laut Verfahren einer ersten Abschätzung. So können die tatsächlichen Reaktionszeiten wie in den Szenarien dargestellt deutlich darüber liegen.

Die berechneten Fließ- und Reaktionszeiten wurden vorhandenen Fachdaten gegenübergestellt. Der Abgleich der berechneten Fließzeiten mit gemessenen Grundwasseraltern ergab einen statistisch signifikanten Zusammenhang der Datensätze. Allerdings fielen die berechneten Fließzeiten aufgrund methodischer Unterschiede überwiegend kleiner aus. Auch im Falle des Abgleichs der berechneten Reaktionszeiten mit den Transportzeiten nach Wriedt (2017) ergab einen statistisch signifikanten Zusammenhang. Hier fallen die berechneten Reaktionszeiten kürzer und teilweise deutlich kürzer aus als die Vergleichsdaten. Auch diese Abweichungen werden auf methodische Unterschiede zurückgeführt. Somit können die Ergebnisse des LAWA-Verfahrens bis auf weiteres nicht vollständig durch vorhandene Fachdaten bestätigt werden.

Auf Grundlage der dargestellten Ergebnisse und Auswertungen lässt sich ableiten, dass mithilfe des LAWA-Verfahrens eine grobe Abschätzung der Reaktionszeiten von Grundwassermessstellen möglich ist. Die Ergebnisse stellen Mindestreaktionszeiten dar, die als Orientierungswerte für die Charakterisierung der Messstellen dienen können. In Anbetracht der Bandbreite der hydraulischen Leitfähigkeiten wird das Verfahren jedoch als unsicher für die Bestimmung eindeutiger Fließstrecken eingestuft. Die Unsicherheiten nehmen mit der Entfernung zwischen dem Ort der Grundwasserneubildung und der Messstelle zu. Die Identifizierung von Eintragsflächen ist nicht möglich.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- Ackermann, A., Heidecke, C., Hirt, U., Kreins, P., Kuhr, P., Kunkel, R., Mahnkopf, J., Schott, M., Tetzlaff, B., Venohr, M., Wendland, F., 2015. Der Modellverbund AGRUM als Instrument zum landesweiten Nährstoffmanagement in Niedersachsen. Thünen Report 37. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, 314 pp.
- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (Ed.), 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany.
- Akoglu, H., 2018. User's guide to correlation coefficients. Turkish journal of emergency medicine 18 (3), 91–93.
- AVV GeA, 2022. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung von mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebieten vom 15.06.2022. Drucksache 275/22. Bundesanzeiger Verlag GmbH, Köln, 1–8.
- Chan, Y.H., 2003. Biostatistics 104: correlational analysis. Singapore medical journal 44 (12), 614–619.
- Cohen, J., 2013. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Routledge.
- DIN 18130-1. Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche.
- DIN 19732. Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotenzials von nichtsorbierbaren Stoffen. Beuth Verlag, Berlin.
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W., 1990. Physical and chemical hydrogeology. Wiley, New York, NY.
- Eden, T., Melzer, O., Quirin, M., Rathig, F., 2017. Gewässerschutzberatung nach EG-Wasserrahmenrichtlinie: Bericht über den ersten Bewirtschaftungszeitraum 2010 bis 2015. Band 11.
- EG-Nitratrichtlinie, 1991. Richtlinie 91/676/EWG des Rates vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen: Amtsblatt Nr. L 375 vom 31/12/1991, 1–8.
- EG-WRRL, 2000. 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, 1–73.
- Ertl, G., Bug, J., Elbracht, J., Engel, N., Herrmann, F., 2019. Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen: Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18. Geoberichte 36, Hannover.
- Fuchs, S., Ziesche, M., Nillert, P., 2017. Empirische Verfahren zur Ableitung verschiedener Porositätsarten aus Durchlässigkeitsbeiwert und Ungleichkörnigkeitszahl – ein Überblick. Grundwasser 22 (2), 83–101.
- GrwV, 2010. Verordnung zum Schutz des Grundwassers - Grundwasserverordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 12. Oktober 2022 (BGBl. I S. 1802) geändert worden ist.
- Hansen, C., Kübeck, C., Kunkel, R., Wendland, F., 2018. Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten: Arbeitshilfe zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. Grundwassermonitoring und -probenahme 2018, 28 September 2018, Schloss Hartenfels, Torgau.
- Hauke, J., Kossowski, T., 2011. Comparison of Values of Pearson's and Spearman's Correlation Coefficients on the Same Sets of Data. Quaestiones Geographicae 30 (2), 87–93.
- Hölting, B., Coldewey, W.G., 2013. Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 8. Auflage ed. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 438 pp.
- Hölting, B., Haertlé, T., Hohberger, K.-H., Nachtigall, K.H., Villinger, E., Weinzierl, W., Wrobel, J.-P., 1995. Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. Schweizerbart.
- Kuhr, P., Kunkel, R., Tetzlaff, B., F. Wendland, 2014. Räumlich differenzierte Quantifizierung der Nährstoffeinträge in Grundwasser und Oberflächengewässer in Sachsen-Anhalt unter Anwendung der Modellkombination GROWA-WEKU-MEPHos. FZ Jülich, Jülich.
- 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. FZ Jülich - Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung, Jülich.
- Kunkel, R., Wendland, F., 1999. Das Weg-/Zeitverhalten des grundwasserbürtigen Abflusses im Elbeinzugsgebiet. Schriften des Forschungszentrums Jülich Bd. 19. Forschungszentrum Zentralbibliothek, Jülich, 122 pp.
- Kunkel, R., Wendland, F., 2002. The GROWA98 model for water balance analysis in large river basins—the river Elbe case study. Journal of Hydrology 259 (1-4), 152–162.
- LAWA, 2018a. Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten: G 1.17 - Arbeitshilfe zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie.
- LAWA, 2018b. Kurzanleitung für die messstellenbezogene Ermittlung von Fließ- und Verweilzeiten: G 1.17 - Anlage 1 zum Abschlussbericht.

LAWA, 2020. Empfehlungen für die Schätzung des Zeithorizonts für die Zielerreichungsprognose zur Reduzierung der Nitratbelastung im Grundwasser bei der Begründung von Fristverlängerungen auf Grund von „natürlichen Gegebenheiten“.

Matthess, G., Ubell, K., 1983. Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt. Lehrbuch der Hydrogeologie. Borntraeger, Berlin, 575 pp.

Nachtigall, C., Wirtz, M.A., 2004. Wahrscheinlichkeitsrechnung und Inferenzstatistik. Juventa-Verlag Weinheim.

R Core Team, 2020. R 4.0.3: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Schäfer, W., 2021. Modellierung der Grundwasserströmung: Grundwassermodellierung. http://www.schaefer-gwm.de/downloads/mod_gws.pdf. Accessed 2021.

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin, 2004. 02.16 Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone. <https://www.berlin.de/umweltatlas/wasser/sickerwasser/2003/zusammenfassung/>.

Sültenfuß, J., Massmann, G., 2004. Datierung mit der ^3He -Tritium-Methode am Beispiel der Uferfiltration im Oderbruch. Grundwasser 9 (4), 221–234.

Wriedt, G., 2017. Transportstrecken und Transportzeiten im Anstrom von Grundwassermessstellen in der Kulisse Gewässerschutzberatung: Unveröffentlichter Bericht, Norden/Cloppenburg.

Impressum



Herausgeber

Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

NLWKN Direktion
Am Sportplatz 23
26506 Norden
Telefon: (04931) 947 – 249
E-Mail: pressestelle@nlwkn.niedersachsen.de
www.nlwkn.niedersachsen.de

Autorin

Dr. Anne Mehrrens, NLWKN Betriebsstelle Cloppenburg

Unter Mitwirkung von

Dr. G. Wriedt, NLWKN Betriebsstelle Cloppenburg
C. Karfusehr, NLWKN Betriebsstelle Cloppenburg
Dr. R. Bury, NLWKN Betriebsstelle Cloppenburg

Gestaltung

Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz,
Anne Mehrrens

Stand

09.01.2024

Gedruckt auf 100% Recyclingpapier

Online verfügbar unter www.nlwkn.niedersachsen.de -> Service ->
Veröffentlichungen -> Webshop bzw.
http://www.nlwkn.niedersachsen.de/service/veroeffentlichungen_webshop/

1. Auflage: Dezember 2023, 150 Stück