



# Kooperationsprojekt GROWA+ NRW 2021 Teil III

Modellierung der Verweilzeiten des Sickerwassers  
in der ungesättigten Zone und der Fließzeiten  
des Grundwassers in Nordrhein-Westfalen

[LANUV-Fachbericht 110](#)



---

# **Kooperationsprojekt GROWA+ NRW 2021**

## **Teil III**

Modellierung der Verweilzeiten des Sickerwassers  
in der ungesättigten Zone und der Fließzeiten  
des Grundwassers in Nordrhein-Westfalen

[LANUV-Fachbericht 110](#)

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen  
Recklinghausen 2021

---

## IMPRESSUM

|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Herausgeber         | Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz<br>Nordrhein-Westfalen (LANUV)<br>Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen<br>Telefon 02361 305-0<br>Telefax 02361 305-3215<br>E-Mail: <a href="mailto:poststelle@lanuv.nrw.de">poststelle@lanuv.nrw.de</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Autoren             | Frank Wendland <sup>1</sup> , Sabine Bergmann <sup>2</sup> , Michael Eisele <sup>2</sup> ,<br>Frank Herrmann <sup>1</sup> , Ralf Kunkel <sup>1</sup> , Bernd Linder <sup>3</sup> , Thomas Schöbel <sup>3</sup> , Hannsjörg Schuster <sup>3</sup><br><sup>1</sup> Forschungszentrum Jülich, Institut für Bio- und Geowissenschaften (IBG-3: Agrosphäre)<br>52425 Jülich, Tel.: 02461 61-0, E-Mail: <a href="mailto:info@fz-juelich.de">info@fz-juelich.de</a><br><sup>2</sup> Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen<br>Wuhannstr. 6, 47051 Duisburg, Telefon: 02361 305-0, Telefax: 02361 305-3215<br>E-Mail: <a href="mailto:poststelle@lanuv.nrw.de">poststelle@lanuv.nrw.de</a><br><sup>3</sup> Geologischer Dienst NRW – Landesbetrieb –<br>De-Greiff-Str. 195, 47803 Krefeld, Telefon: 02151 897-0, Telefax: 02151 897-505<br>E-Mail: <a href="mailto:poststelle@gd.nrw.de">poststelle@gd.nrw.de</a> |
| Titelbild           | Fotolia/Countrypixel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Stand               | März 2021                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| ISSN                | 1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachbericht                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Informationsdienste | Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter<br>• <a href="http://www.lanuv.nrw.de">www.lanuv.nrw.de</a><br>Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im<br>• WDR-Videotext                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.



# Das Projekt GROWA+ NRW 2021

Die Abkürzung GROWA+NRW 2021 steht für:

„Regionalisierte Quantifizierung der diffusen Stickstoff- und Phosphoreinträge in das Grundwasser und die Oberflächengewässer Nordrhein-Westfalens“.

Die Laufzeit des Projekts war über vier Jahre von Anfang Dezember 2015 bis zum Ende des Jahres 2019 angesetzt. Auftraggeber für GROWA+ NRW 2021 war das nordrhein-westfälische Umweltministerium. Unter der Leitung des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) sind das Forschungszentrum Jülich, der Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen (GD), die Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK) und das auf dem Gebiet der Landwirtschaft forschende Thünen-Institut aus Braunschweig die fünf an dem Gemeinschaftsprojekt beteiligten Institutionen gewesen.



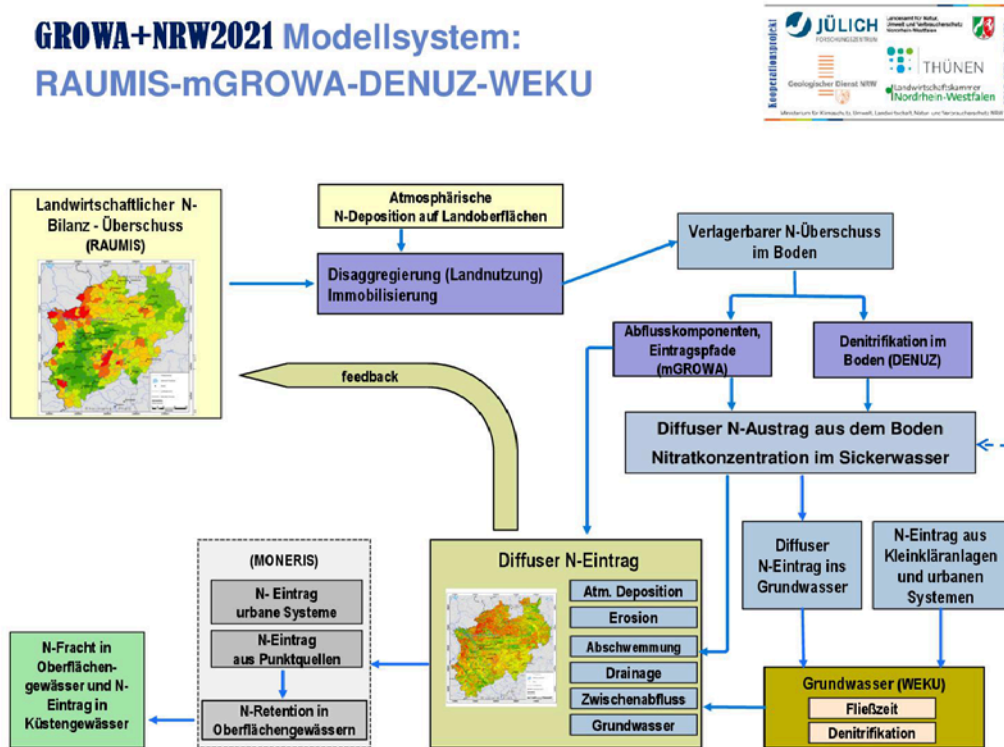
## Veranlassung und Zielsetzung:

Die Belastung des Grundwassers und der Oberflächengewässer in NRW durch Stickstoff- und Phosphoreinträge ist ein komplexes Umweltthema. Die Analyse der Eintragspfade und Lösungsansätze können nur fachübergreifend und gemeinschaftlich mit den beteiligten Behörden und öffentlichen Institutionen der Land- und Wasserwirtschaft sowie Forschungseinrichtungen erarbeitet werden. Beispielsweise werden für die Umsetzung der EU-Nitratrichtlinie, der Wasserrahmenrichtlinie und Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie und deren zugehörige Maßnahmenprogramme landesweit konsistente und räumlich hochauflösende Angaben zur Herkunft und räumlichen Verteilung der Stickstoff- und Phosphoreinträge benötigt. Ziel ist es hierbei, eine effektive und Verursacher-gerechte Maßnahmenplanung zu ermöglichen.

Da diese Fragestellungen nur durch komplexe Modellberechnungen und genaue Fach- und Gebietskenntnisse beantwortet werden können, wurde das genannte Kooperationsprojekt in NRW in die Wege geleitet. Einerseits sind die Nährstoffeinträge in die Systeme Boden und Gewässer aus Landwirtschaft, Abwasserbereich, atmosphärische Deposition und aus urbanen

Systemen adäquat abzubilden. Andererseits sind die vielfältigen Abbau- und Rückhalteprozesse von Nährstoffen im Grundwasser und in den Fließgewässern sowie Transportwege zu berücksichtigen.

Für die Bearbeitung wird eine Modellkette eingesetzt, die in folgender Abbildung veranschaulicht ist:



Modellkette RAUMIS-GROWA/mGROWA-DENUZ-WEKU (Quelle: FZ Jülich & LANUV, 2017)

## Projektstruktur und Ergebnisse

Das Projekt gliederte sich in die folgenden verschiedenen Teilprojekte (TP):

- TP 1 Stickstoffbilanzen: (Durchführung: Thünen-Institut in Zusammenarbeit mit Landwirtschaftskammer NRW)
- TP 2 Hydrogeologie, Wasserhaushalt und Stickstoffeintrag: Methodische Weiterentwicklung zur Berechnung der Wasserhaushaltskomponenten und des N-Eintrags ins Grundwasser (Durchführung: FZ-Jülich zusammen mit GD und LANUV)
- TP 3 Hydrogeologie und Stofftransport: Abschätzung mittlerer Verweilzeiten in der ungesättigten Zone und im oberen Grundwasserleiter (Durchführung: FZ-Jülich und Geologischer Dienst NRW zusammen mit GD und LANUV)
- TP 4 Hydrogeologie und Stickstoffabbau: Abschätzung des vorhandenen Denitrifikationspotentials im Grundwasser und Identifizierung von Gebieten mit möglicherweise nachlassender Denitrifikationskapazität (Durchführung: FZ-Jülich zusammen mit GD und LANUV)

- TP 5 Wirkungsanalysen von Maßnahmen: (Durchführung: Thünen-Institut in Zusammenarbeit mit Landwirtschaftskammer NRW)
- TP 6: Modellierung der Phosphoreinträge ins Grundwasser und in die Gewässer NRW's (Weiterentwicklung MEPhos NRW) (Durchführung: FZ-Jülich, LANUV, GD NRW, LWK NRW)
- TP 3.1 Projektionen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung regional und landesweit in NRW (Durchführung: FZ-Jülich)

Alle Abschlussberichte sowie umfangreiche Projektdokumentationen sind bislang auf der Internetseite <https://www.flussgebiete.nrw.de> veröffentlicht worden. (Startseite » Lebendige Gewässer entwickeln » Projekte in NRW<sup>1</sup>).

In dem vorliegenden LANUV-Fachbericht 110 werden die 9 Teilberichte einzeln veröffentlicht:

- |            |                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Teil I:    | Regionalisierte Quantifizierung der landwirtschaftlichen Flächenbilanzüberschüsse in Nordrhein-Westfalen                                                                                                                                                             |
| Teil IIa:  | Modellierung des Wasserhaushalts in Nordrhein-Westfalen mit mGROWA                                                                                                                                                                                                   |
| Teil IIb:  | Ausweisung potenziell dränierten Flächen unter landwirtschaftlicher Nutzung in Nordrhein-Westfalen                                                                                                                                                                   |
| Teil III:  | Modellierung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone und der Fließzeiten des Grundwassers in Nordrhein-Westfalen                                                                                                                               |
| Teil IV:   | Denitrifikation Boden und im Grundwasser Nordrhein-Westfalens                                                                                                                                                                                                        |
| Teil V:    | Stickstoffeintrag ins Grundwasser und die Oberflächengewässer Nordrhein-Westfalens                                                                                                                                                                                   |
| Teil VI:   | Phosphoreintrag in die Oberflächengewässer                                                                                                                                                                                                                           |
| Teil VII:  | Minderungsbedarf der Stickstoffeinträge zur Erreichung der Ziele für das Grundwasser und für den Meeresschutz                                                                                                                                                        |
| Teil VIII: | Projektionen der Grundwasserneubildung unter dem Einfluss des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA und dem Regionalen Klimaprojektionen Ensemble (ReKliEs) für Deutschland. Forschungszentrum Jülich, März/April 2021 (in prep.) |

---

<sup>1</sup> <https://www.flussgebiete.nrw.de/regional-hoch-aufgeloeeste-quantifizierung-der-diffusen-stickstoff-und-phosphoreintraege-ins-4994>



## Inhalt

|       |                                                                                              |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Hintergrund und Zielsetzung .....                                                            | 10 |
| 1.1   | Ausgangssituation / Veranlassung .....                                                       | 10 |
| 1.2   | Zielstellung .....                                                                           | 12 |
| 2     | Begriffsdefinitionen .....                                                                   | 15 |
| 3     | Ermittlung von flächenhaften Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone ..... | 19 |
| 3.1   | Grundlagen.....                                                                              | 19 |
| 3.2.  | Verweilzeitenermittlung im Boden.....                                                        | 19 |
| 3.2.1 | Verweilzeitenermittlung im durchwurzelten Bodenbereich .....                                 | 20 |
| 3.2.2 | Verweilzeitenermittlung im Bodenbereich unterhalb der Wurzelzone .....                       | 20 |
| 3.2.3 | Datengrundlagen (Übersicht) .....                                                            | 21 |
| 3.3.  | Verweilzeitenermittlung in den Grundwasserdeckschichten.....                                 | 22 |
| 3.3.1 | Verfahren für Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein.....                                | 22 |
| 3.3.2 | Verfahren für Grundwasserdeckschichten aus Festgestein .....                                 | 25 |
| 3.3.3 | Verfahren für von Lockergestein überlagerten Festgesteins- deckschichten.....                | 29 |
| 3.3.4 | Datengrundlagen (Übersicht) .....                                                            | 29 |
| 3.4   | Anwendbarkeit und Grenzen der Verfahren zur Verweil- zeitenermittlung .....                  | 30 |
| 4     | Ermittlung von Fließzeiten im Grundwasser bis Vorflutereintritt .....                        | 32 |
| 4.1   | Verfahrensang des WEKU-Modells .....                                                         | 32 |
| 4.1.1 | Modellierung der Abstandsgeschwindigkeit .....                                               | 33 |
| 4.1.2 | Berechnung der Fließzeit bis Vorflutereintritt .....                                         | 36 |
| 4.1.3 | Datengrundlagen (Übersicht) .....                                                            | 37 |
| 4.2   | Anwendbarkeit und Grenzen des WEKU-Verfahrens.....                                           | 37 |
| 5     | Datengrundlagen für die Verweil- und Fließzeiten- modellierung .....                         | 39 |
| 5.1   | Bodenkundliche Datengrundlagen .....                                                         | 39 |
| 5.1.1 | Bodenkundliche Datengrundlagen des durchwurzelten Bodenbereichs .....                        | 39 |
| 5.1.2 | Bodenkundliche Daten für den Bereich unterhalb der Wurzelzone .....                          | 41 |
| 5.2   | Modell der Grundwasseroberfläche .....                                                       | 43 |
| 5.2.1 | Grundwasserflurabstand.....                                                                  | 44 |
| 5.2.2 | Hydraulischer Gradient.....                                                                  | 46 |

|         |                                                                                                                 |    |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.3   | Grundwasserwirksame Vorfluter und Fließstrecke .....                                                            | 47 |
| 5.3     | Hydrogeologische Datengrundlagen .....                                                                          | 49 |
| 5.3.1.  | Beschreibung der neu erstellten hydrogeologischen Datensätze .....                                              | 49 |
| 5.3.1.1 | Erstellung des Themas Hydrogeologische Karte NRW (HK NRW) .....                                                 | 49 |
| 5.3.1.2 | Erstellung des Themas „Bindige Deckschichten“ .....                                                             | 50 |
| 5.3.1.3 | Erstellung des Themas „Tiefenlage/Mächtigkeit Grundwasserleiter“ .....                                          | 51 |
| 5.3.2   | Grundwasserdeckschichten im Lockergesteinsbereich .....                                                         | 51 |
| 5.3.2.1 | Mächtigkeit und Wasserspeichervermögen Bindige Deckschichten .....                                              | 51 |
| 5.3.2.2 | Mächtigkeit und Wasserspeichervermögen der „übrigen“ Deckschichten im Lockergesteinsbereich .....               | 53 |
| 5.3.3   | Grundwasserdeckschichten im Festgesteinsbereich .....                                                           | 54 |
| 5.3.3.1 | Hölting - Punktwert für die Gesteinsart .....                                                                   | 55 |
| 5.3.3.2 | Hölting-Strukturfaktor der Festgesteinsüberdeckung .....                                                        | 55 |
| 5.3.3.3 | Mächtigkeit der Festgesteinsüberdeckung .....                                                                   | 56 |
| 5.3.3.4 | Sickerwasserfaktor nach Hölting .....                                                                           | 57 |
| 5.3.4   | Oberer Grundwasserleiter .....                                                                                  | 58 |
| 5.3.4.1 | Grundwasserführende Gesteinseinheiten .....                                                                     | 58 |
| 5.3.4.2 | Hydraulische Leitfähigkeit .....                                                                                | 60 |
| 5.3.4.3 | Nutzbarer Hohlraumanteil .....                                                                                  | 62 |
| 5.4     | Hydrologische Datengrundlagen .....                                                                             | 63 |
| 6       | Modellergebnisse zur flächenhaften Verweilzeit in der ungesättigten Zone .....                                  | 66 |
| 6.1     | Verweilzeit im Boden .....                                                                                      | 66 |
| 6.2     | Verweilzeit in den Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein .....                                             | 67 |
| 6.3     | Verweilzeit in den Grundwasserdeckschichten aus Festgestein .....                                               | 68 |
| 6.4     | Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone .....                                                   | 70 |
| 7       | Modellergebnisse zur Fließzeit im Grundwasser bis Vorflutereintritt .....                                       | 72 |
| 7.1     | Modellergebnis zur Abstandsgeschwindigkeit .....                                                                | 72 |
| 7.2     | Modellergebnis zur Fließzeit des Grundwassers im Aquifer .....                                                  | 73 |
| 8       | Aggregierte Verweil- und Fließzeiten bis Vorflutereintritt .....                                                | 75 |
| 9       | Szenario – Analyse: Verweil- und Fließzeiten im Rheinischen Revier bei sumpfunbeeinflussten Verhältnissen ..... | 76 |
| 10      | Verweil- und Fließzeitermittlung auf Grundwasserkörperebene .....                                               | 83 |



|        |                                                                                                                               |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 10.1.  | Verweilzeiten in der ungesättigten Zone .....                                                                                 | 84  |
| 10.2.  | Fließzeitenermittlung mit dem Teufe- Neubildungsverfahren .....                                                               | 84  |
| 10.3.  | Datengrundlagen .....                                                                                                         | 86  |
| 10.4   | Generelle Überlegungen und Vorgehensweise zur Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten auf Grundwasserkörperebene .....        | 87  |
| 10.5   | Ergebnisse zur Verweil- und Fließzeitenermittlung für GWK.....                                                                | 90  |
| 10.5.1 | Grundwasserfließzeiten auf Rasterebene auf Basis der für Teileinzugsgebiete ermittelten Filtertiefen .....                    | 90  |
| 10.5.2 | Reaktionszeit innerhalb der Rasterflächen und Häufigkeitsverteilung der Reaktionszeiten auf Ebene der Grundwasserkörper ..... | 91  |
| 10.5.3 | Räumliche Verteilung der Reaktionszeiten innerhalb der GWK .....                                                              | 93  |
| 10.6   | Anwendbarkeit und Grenzen des Teufe-/Neubildungs- verfahrens .....                                                            | 95  |
| 11     | Zusammenfassung .....                                                                                                         | 97  |
| 12     | Literatur .....                                                                                                               | 101 |

# 1 Hintergrund und Zielsetzung

Im Teilbericht III werden die Methoden, Datengrundlagen und Ergebnisse der Modellierung der Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone und der Fließzeiten des Grundwassers zusammengefasst.

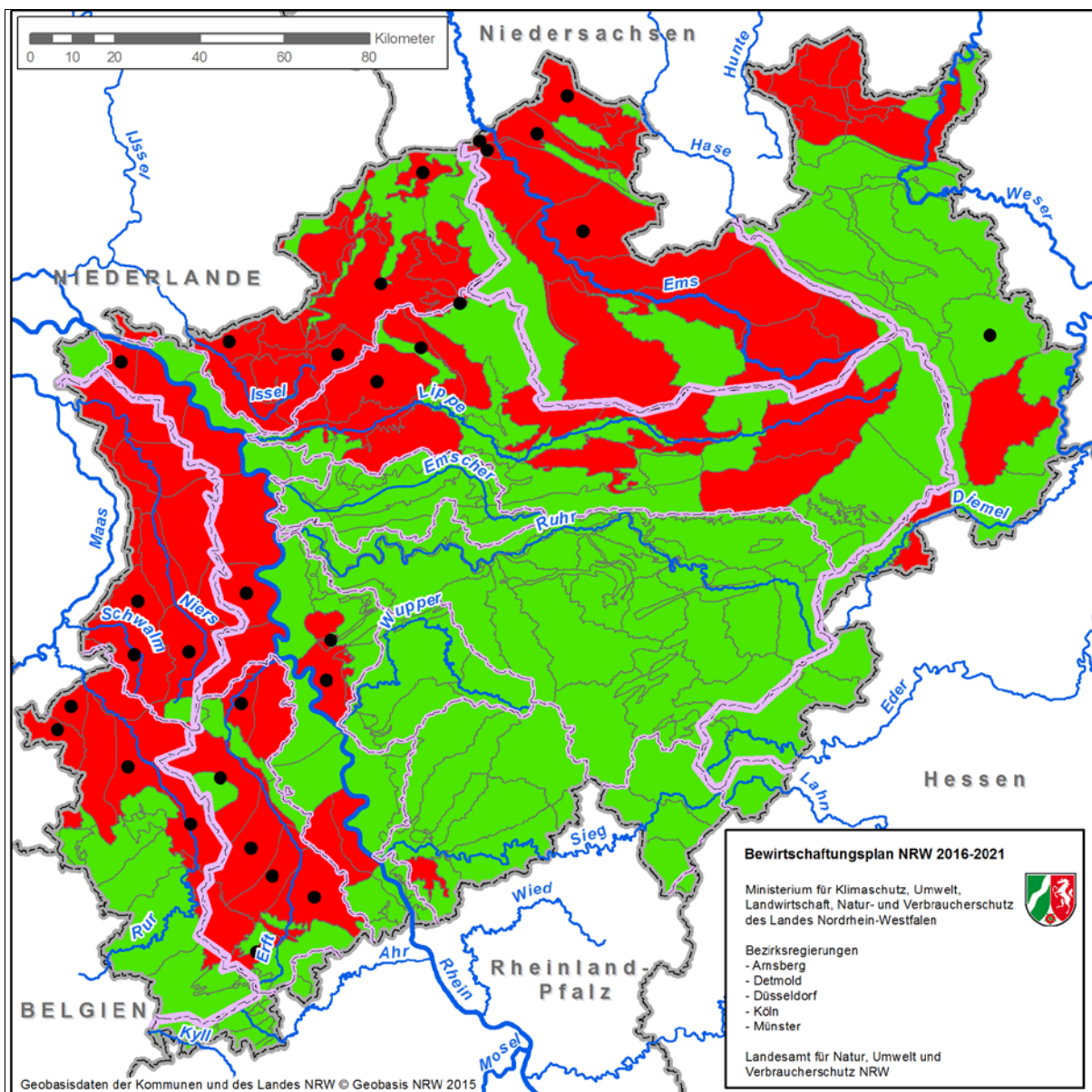
## 1.1 Ausgangssituation / Veranlassung

Auf landwirtschaftlich intensiv genutzten Flächen werden seit Jahrzehnten Stickstoffdünger zur Ertragssteigerung ausgebracht, die in einigen Regionen zu einer hohen Nitratbelastung des Grundwassers bzw. der Oberflächengewässer / Randmeere geführt haben. Zu hohe Nitrateinträge ins Grundwasser und die Oberflächengewässer sind eine der Hauptursachen dafür, dass Oberflächengewässer / Randmeere bzw. Grundwasserkörper (GWK) gemäß EG-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL, 2000) und der EU-Grundwasserrichtlinie (EU-GWRL, 2006) nicht in einem guten chemischen Zustand sind.

In NRW wurde der gute chemische Zustand des Grundwassers 2015 für 87 von insgesamt 275 GWK aufgrund einer zu hohen Nitratbelastung verfehlt. Insgesamt sind ca. 40% der Landesfläche hiervon betroffen. Abb. 1-1 zeigt die Lage der GWK in NRW, die wegen zu hoher Nitratgehalte nicht im guten Zustand waren (Stand 2015).

Eine der Kernfragen hierbei ist, ob und bis wann der gute Zustand erreicht werden kann. Aus der Praxis ist nämlich seit langem bekannt, dass sich der gewünschte Erfolg, d.h. eine Senkung der Nitratkonzentration im Grundwasser auf Werte unterhalb des EU-Grenzwertes von 50 mg/l nicht unmittelbar nach Einleitung von Maßnahmen zur Reduzierung von Stickstoffeinträgen ins Grundwasser einstellt. Der Zeitverzug zwischen der Umsetzung einer Maßnahme und deren Auswirkung auf den Zustand des Grundwassers erklärt sich über die Verweilzeit des Sickerwassers im Boden und in den Grundwasserdeckschichten und den Fließzeiten im Grundwasser (siehe Abbildung 2-1). Lange Verweilzeiten in der ungesättigten Zone und lange Fließzeiten im Grundwasser können also der Grund dafür sein, dass umgesetzte Grundwasserschutzmaßnahmen bislang nicht den gewünschten Effekt hatten. Gleiches gilt sinngemäß für Regionen, in denen die Oberflächengewässer überwiegend aus dem Grundwasser gespeist werden.

Für Grundwasserkörper im schlechten Zustand wurden nach Art. 4, Abs. 4 der EU-WRRL (2000) Fristverlängerungen bis zur Erreichung des guten Zustandes in Anspruch genommen. Im nächsten Bewirtschaftungszeitraum (2016–2021) der EU-Wasserrahmenrichtlinie sind die Mitgliedstaaten der EU weiterhin aufgefordert, den guten Zustand zu erreichen. Wenn erneut Fristverlängerungen in Anspruch genommen werden sollen, wird die EU-Kommission vor einer erneuten Bewilligung den Zustand des Grundwassers im Hinblick auf die Entwicklung der Nitratbelastung bzw. die eingeleiteten Maßnahmen kritisch prüfen. Dazu müssen insbesondere die Gründe für die „Zielverfehlung“ aufgezeigt werden, d.h. warum die bisher umgesetzten Programme nicht zu einer Verbesserung des Grundwasserzustandes geführt haben.



Erstellt: 10.08.15

### Chemischer Zustand der Grundwasserkörper - Nitrat und Trends



**Abb. 1-1:** Lage der Grundwasserkörper in NRW, die wegen zu hoher Nitratgehalte 2012 nicht im guten Zustand waren

In GWK mit langen Verweilzeiten in der ungesättigten Zone und langen Fließzeiten im Grundwasser ist zu erwarten, dass sich ein Rückgang der Nitratkonzentrationen im Grundwasser bzw. in den Vorflutern erst mit einer deutlichen zeitlichen Verzögerung bemerkbar machen wird. Es ist also möglich, dass die Ziele der EU-WRRL trotz der umgesetzten Maßnahmenprogramme ggf. auch bis 2021 bzw. 2027 nicht erreicht werden können.

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

## 1.2 Zielstellung

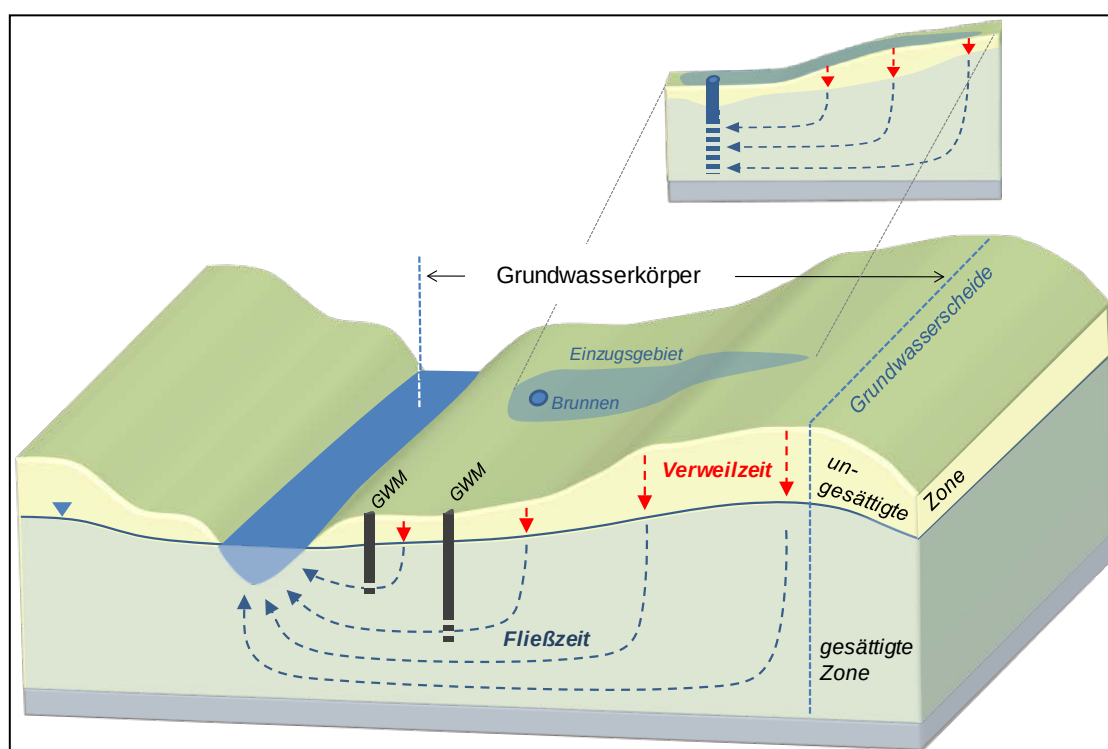
Im Jahr 2010 wurde das Projekt *„Räumlich differenzierte Quantifizierung der N- und P-Einträge in Grundwasser und Oberflächengewässer in Nordrhein-Westfalen unter besonderer Berücksichtigung diffuser landwirtschaftlicher Quellen“* abgeschlossen (Wendland et al., 2010). Für die Berechnung von Denitrifikationsraten im Boden und im Grundwasser wurden in diesem Projekt mit dem Modell DENUZ bereits eine erste Ermittlung von Verweilzeiten im Boden und mit dem Modell WEKU bereits eine erste Ermittlung von Fließzeiten im Grundwasser vorgenommen. Eine Verweilzeitenberechnung für die Grundwasserdeckschichten wurde in der Studie von Wendland et al. (2010) jedoch nicht vorgenommen, da die Denitrifikation in den Grundwasserdeckschichten als vernachlässigbar eingeschätzt wurde.

Seitdem sich abzeichnete, dass das Grundwasserqualitätsziel für Nitrat (50 mg/l) im Jahr 2015 verfehlt wird, hat die Ableitung von Verweil- und Fließzeiten im Landesmaßstab eine Bedeutung erlangt, die über die Berechnung von Denitrifikationsraten hinausgeht. Vor allem wurde vermehrt die Frage gestellt, ob die Verweil- und Fließzeiten evtl. eine triftige, standörtliche Begründung für die Zielverfehlung sein können (vgl. Kap. 1-1). So erlaubt eine Verweil- und Fließzeitenanalyse eine Aussage über den Zeitraum, bis wann umgesetzte Maßnahmen zu einer Zielerreichung führen können und welche zusätzlichen Fristverlängerungen ggf. zusätzlich notwendig werden. Vor diesem Hintergrund ist es das Hauptziel, die Verweilzeiten des Sickerwassers für die gesamte ungesättigte Zone (d.h. Boden und Grundwasserdeckschichten) sowie die Fließzeiten des Grundwassers im oberen Grundwasserleiter abzuleiten. Im diesem Zusammenhang kommt der Fragestellung und dem Raumbezug eine große Bedeutung zu (siehe Abb. 1-2).

Die Frage nach der Verweil- und Fließzeit bis zum Eintritt in einen Vorfluter steht zum einen dann im Vordergrund, wenn die Umweltqualitätsziele (z.B. für Nitrat) für ein Oberflächengewässer bei der Bestandsaufnahme nach EG-Wasserrahmenrichtlinie nicht erreicht werden. In Regionen, in denen die Vorfluter überwiegend aus dem Grundwasser gespeist werden, erlauben erst die Verweil- und Fließzeiten bis Vorflutereintritt eine Prognose über den Zeitraum, bis sich erfolgreich und zielführend umgesetzte Maßnahmenprogramme im Einzugsgebiet an den betreffenden Pegelmessstellen im Vorfluter bemerkbar machen können (Zielerreichungsprognosen für Oberflächengewässer). Zum anderen ist die Ermittlung von flächenhaften Verweil-

und Fließzeiten bis Vorflutereintritt eine unerlässliche Grundlage für die reaktive N-Transportmodellierung im Grundwasser bzw. für die Berechnung des diffusen N-Eintrags in die Oberflächengewässer über das Grundwasser (siehe Teilbericht V).

Die Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten auf Grundwasserkörperebene steht dagegen vor allem dann im Vordergrund, wenn Grundwasserkörper (GWK) bei der Bestandsaufnahme nach EG-Wasserrahmenrichtlinie den guten Zustand nicht erreichen. Die Verweil- und Fließzeiten auf GWK-Ebene sind in diesem Fall als Grundlage für die Erstellung von Zielerreichungsprognosen und als Begründung von Fristverlängerungen für die betroffenen GWKs unerlässlich (Zielerreichungsprognosen für das Grundwasser). Abnehmende Konzentrationen (Trends) können sich in einem GWK erst nach entsprechender Verweil- und Fließzeit (Reaktionszeit) einstellen und belegen dann eine erfolgreiche und zielführende Umsetzung von Maßnahmenprogrammen in dem betreffenden GWK.



**Abb. 1-2:** Räumlicher Bezug für die Verweil- und Fließzeitermittlung auf GWK-Ebene sowie bis Vorflutereintritt (Hansen et al., 2018)

Im Rahmen des Projektes GROWA+ - NRW 2021 sollen die Verweil- und Fließzeiten sowohl flächenhaft bis zum Vorflutereintritt, als auch für punktuelle Bezugsorte (Messstellen im Grundwasserkörper) ermittelt werden. Bedingt durch den unterschiedlichen Betrachtungsmaßstab bzw. Raumbezug sollten hierbei verschiedene Ansätze zur Anwendung kommen:

- Verweilzeitenberechnung des Sickerwassers in der ungesättigten Zone:
  - im durchwurzelten Bodenbereich basierend auf dem Verfahren nach **DIN 19732**
  - in den Grundwasserdeckschichten von Lockergesteinsaquiferen basierend auf dem Verfahren nach **DIN 19732**
  - in den Grundwasserdeckschichten von Festgesteinsaquiferen basierend auf dem Verfahren nach Hölting et al. (1995).

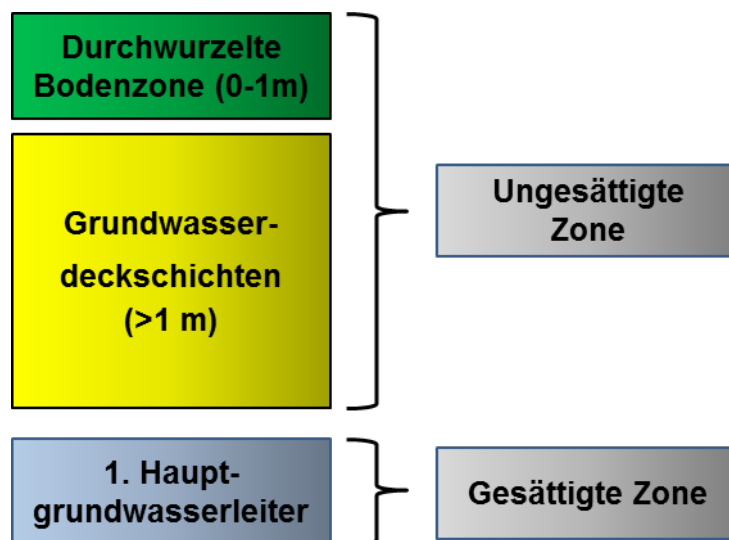
- Fließzeitenberechnung des Grundwassers bis zum Vorflutereintritt basierend auf dem **WEKU-Modell** (Kunkel & Wendland, 1997)
- Fließzeitenberechnung des Grundwassers auf Ebene der Grundwasserkörper basierend auf dem **Teufe-Neubildungsverfahren** (Hansen et al., 2018)

Detaillierte Beschreibungen der eingesetzten Verfahren zur Ermittlung von Verweilzeiten in der ungesättigten Zone finden sich in Kap. 3. Das Verfahren zur Fließzeitermittlung bis Vorflutereintritt ist in Kap. 4 zu finden. Danach erfolgt in Kap. 5 eine detaillierte Beschreibung der Datengrundlagen bzw. der hieraus u.U. abgeleiteten Modelleingangsgrößen zur Modellierung von Verweilzeiten in der ungesättigten Zone bzw. Fließzeiten im Aquifer bis Vorflutereintritt. Die entsprechenden Modellergebnisse sind in den Kap. 6 bis Kap. 8 dargestellt. In Kap. 9 sind ergänzend hierzu Modellergebnisse einer Szenario-Rechnung im Rheinischen Revier bei sumpfungsunbeeinflussten Verhältnissen zusammengefasst worden. In Kap. 10 werden dann zunächst das Verfahren und die Datengrundlagen zur Ermittlung von Fließzeiten auf GWK-Ebene beschrieben und anschließend die entsprechenden Ergebnisse dargestellt. Der Bericht endet mit einer Zusammenfassung (Kap. 11) und einem Literaturverzeichnis (Kap. 12).

## 2 Begriffsdefinitionen

Generell erfolgt die Ermittlung von Verweilzeiten für die ungesättigte Zone, d.h. für den gesamten nicht vollständig mit Wasser gefüllten Bereich von der Bodenoberfläche bis zur Grundwasseroberfläche, unterhalb derer die gesättigte Zone beginnt [DIN-4049-3]. Die ungesättigte Zone lässt sich in den Boden und den Bereich der Grundwasserdeckschichten untergliedern (siehe Abb. 2-1).

- Die **ungesättigte Zone** ist der Bereich oberhalb der Grundwasseroberfläche, in dem die Hohlräume neben Wasser auch mit Luft gefüllt sind. Die Bewegung des Wassers erfolgt überwiegend vertikal und nach unten gerichtet. Zur ungesättigten Zone gehören der Boden und die Grundwasserdeckschichten.
- Die **Bodenzone** ist das oberste, mit Wasser, Luft und Lebewesen durchsetzte und unter dem Einfluss der Umweltfaktoren an der Erdoberfläche entstandene und im Laufe der Zeit sich weiterentwickelnde Umwandlungsprodukt mineralischer und organischer Substanzen. Nach oben wird der Boden (meist) durch eine Vegetationsdecke sowie die Erdatmosphäre begrenzt.
- Unterhalb der durchwurzelten Bodenzone schließen sich die **Grundwasserdeckschichten** an, d.h. verfestigte oder lockere Gesteinshorizonte, welche bis hin zur Grundwasseroberfläche reichen.
- Die **Grundwasseroberfläche** grenzt die ungesättigte Zone dementsprechend nach unten von der gesättigten Zone ab.

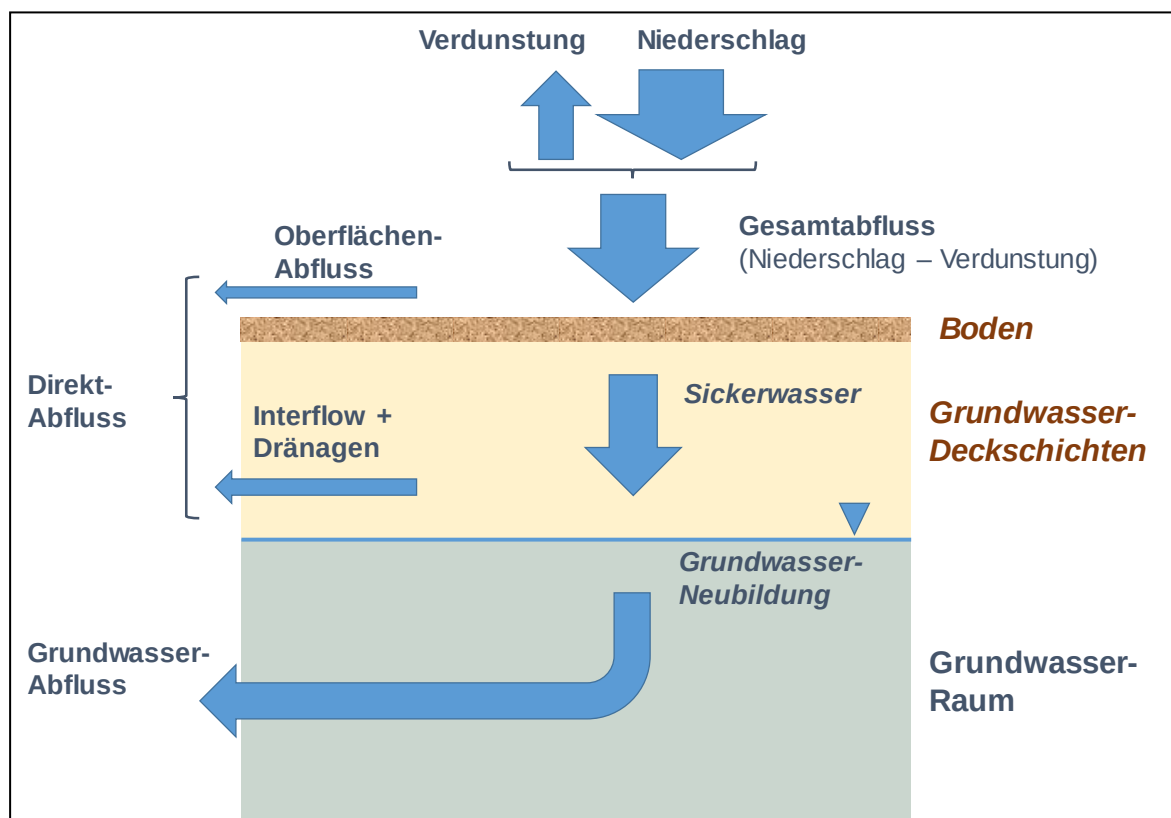


**Abb. 2-1:** Schematische Darstellung der Kompartimente zur Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten

Die Ermittlung der Fließzeiten im Grundwasser erfolgt generell für den obersten wasserwirtschaftlich bedeutenden Grundwasserleiter, d.h. den Teil der mit Wasser gesättigten Zone, der über den Grundwasserabstrom (am meisten) in den aktiven Wasserkreislauf eingebunden ist:

- Die **gesättigte Zone** ist vollständig mit Wasser gefüllt. Die Bewegung des Wassers in der gesättigten Zone weist eine deutliche laterale Komponente auf.
- Als **1. Hauptgrundwasserleiter** wird zumeist der oberste mächtige und ausgedehnte Grundwasserleiter in der gesättigten Zone bezeichnet. Mitunter liegt er unterhalb eines geringmächtigen bzw. schwebenden Grundwasserleiters.

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

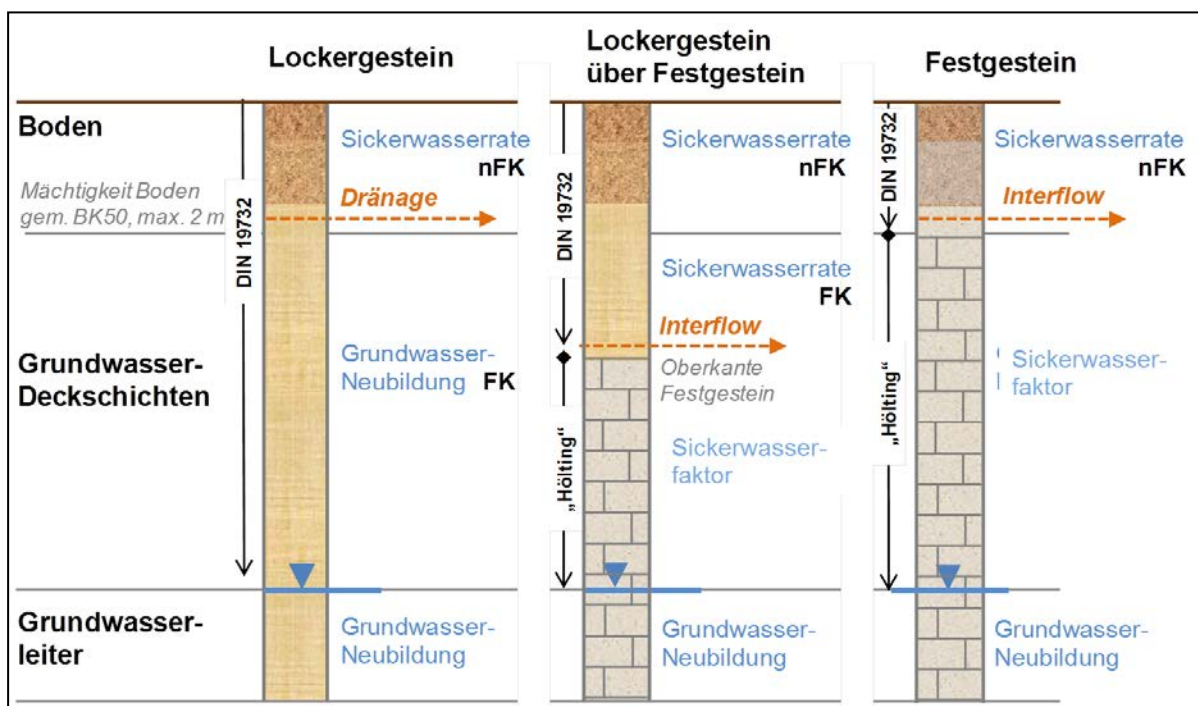


**Abb. 2-2:** Vereinfachtes Schema der Wasserhaushaltskomponenten unter besonderer Berücksichtigung der Komponenten des Abflusses (Hansen et al., 2018)



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

Bei vielen Standorten wird ein Teil des Sickerwassers in der ungesättigten Zone abgetrennt und gelangt als Direktabfluss, d.h. mit einem nur geringen Zeitverzug nach einem abflussauslösenden Niederschlagsereignis, in die Oberflächengewässer. Die Sickerwasserhöhe entspricht also häufig nicht der Grundwasserneubildung, entscheidend für die Verweilzeitenermittlung ist der Tiefenbereich, in dem die Abtrennung der Direktabflusskomponenten (Abfluss aus Dränagesystemen und Interflow) erfolgt (siehe Abb. 2-3).



**Abb. 2-3:** Tiefenbereich zur Abtrennung der Direktabflusskomponenten Dränabfluss und Interflow in der ungesättigten Zone (Hansen et al., 2018)

Dränagesysteme wurden generell an Standorten installiert, wo Böden oberflächennah durch Grundwasser oder Stauwasser beeinflusst waren, so dass die landwirtschaftliche Produktivität herabgesetzt oder eine landwirtschaftliche Nutzung von vornherein ausgeschlossen war. Vor allem in Flachlandregionen (Lockergesteinsgebiete) haben Dränagesysteme daher einen großen Einfluss auf den Wasserhaushalt. Drainagen wurden je nach Bodentyp in einem Bereich zwischen ca. 0,8 m und 1,20 m unter GOK verbaut (Tetzlaff et al., 2009). Für die oberhalb der durch Dränagesysteme künstlich abgesenkten Grundwasseroberfläche liegenden Bodenzonen

ist bei dränierten Standorten zur Verweilzeitenermittlung generell die Sickerwasserhöhe anzusetzen. Daher ist der im Teilbericht IIa beschriebene Datensatz zu den Dränflächen hier von besonderer Bedeutung. Bei grundwasserbeeinflussten Böden beginnt unterhalb des drainierten Bereichs der Grundwasserleiter. Bei staunässebeeinflussten Böden setzt sich unterhalb der Dränagen die ungesättigte Zone fort.

Der Interflow ist vor allem in aus Festgesteinen aufgebauten Mittelgebirgsregionen eine bedeutsame Abflusskomponente. Interflow kann sich generell dort bilden, wo vertikal versickern- des Wasser in der ungesättigten Zone auf eine wasserundurchlässigere Schicht stößt, so dass es gezwungen wird, oberhalb der wasserstauenden Schicht lateral abzufließen. Der Tiefenbereich, in dem sich der natürliche Zwischenabfluss (Interflow) abtrennt, ist –anders als beim Drainageabfluss- jedoch nicht eindeutig lokalisierbar.

### 3 Ermittlung von flächenhaften Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone

#### 3.1 Grundlagen

Für die **Bodenzone** erfolgt die Verweilzeitenermittlung mit dem Ansatz nach DIN 19732. Das zur Verweilzeitenermittlung nach DIN 19732 wichtige Wasserspeichervermögen der Böden ist in der Bodenkarte 1:50.000 (BK 50) als Parameter erhalten und steht somit unmittelbar für die Modellierung zur Verfügung. Für den durchwurzelten Bodenbereich liegen die Parameter zur Charakterisierung des Wasserspeichervermögens flächendeckend für NRW vor. Für den Bodenbereich unterhalb der Wurzelzone liegen diese Parameter in der BK 50 noch für Teilgebiete NRWs bis in eine Tiefe von 2 Metern vor.

Entsprechend des lithologischen Untergrundaufbaus werden bei der Ermittlung der Verweilzeit in der **Grundwasserüberdeckung** zwei Fälle unterschieden:

- Fall 1: Die Grundwasserüberdeckung unterhalb des Bodens besteht aus Lockergestein.
- Fall 2: Die Grundwasserüberdeckung unterhalb des Bodens besteht aus Festgestein.

Der Hauptgrund für diese Differenzierung ist die unterschiedliche Datenverfügbarkeit für die Grundwasserdeckschichten. Generell liegen für Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein bessere und flächendeckendere Daten vor als für Grundwasserdeckschichten aus Festgestein. In der Hydrogeologische Karte NRW (HK NRW) finden sich für Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein petrografische Gesteinsbeschreibungen. Aus diesen kann nach Müller & Raissi (2002) das Wasserspeichervermögen abgeleitet werden. Dies hat zur Konsequenz, dass für die Ermittlung der Verweilzeiten der **Grundwasserdeckschichten im Lockergesteinsbereich** ebenfalls das Verfahren nach DIN 19732 für die Modellierung eingesetzt werden kann.

Für die **Grundwasserdeckschichten im Festgesteinsbereich** stehen dagegen nur generalisierte Angaben zur Verfügung, so dass hier das Schätzverfahren von Hölting et al. (1995) zum Einsatz kommt. Hierbei werden verschiedene Schutzfunktionsparameter der Grundwasserüberdeckung mit Punktzahlen als quasi gemeinsamen Nenner parametrisiert und zusammengefasst. Den verschiedenen Klassen der Gesamtschutzfunktion werden unterschiedliche Größenordnungen der Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung zugeordnet. Die nach Hölting et al. (1995) ermittelten Verweilzeiten sind immer mit großen Unsicherheiten verbunden.

#### 3.2. Verweilzeitenermittlung im Boden

Im Boden verläuft die Verlagerung des Sickerwassers über die Poren des Substrats. Auf der einen Seite kann bei einem hohen Wasserspeichervermögen eine große Wassermenge gegen die Schwerkraft im Boden gehalten werden, so dass dort vergleichsweise hohe Verweilzeiten auftreten. Bei einem geringen Wasserspeichervermögen herrschen dagegen geringe Verweilzeiten vor. Auf der anderen Seite sinkt die Verweilzeit bei steigenden Sickerwasserraten aufgrund des erhöhten Wasserdurchsatzes durch den Boden.

### 3.2.1 Verweilzeitenermittlung im durchwurzelten Bodenbereich

Die Verweilzeit im durchwurzelten Boden ( $t_{\text{Boden}}$ ) wird nach DIN 19732 aus dem Wasserspeichervermögen der Böden und der Sickerwasserrate ( $Q_{\text{SW}}$ ) abgeleitet (siehe Gl. 3-1). Für die durchwurzelte Bodenzone ist das Wasserspeichervermögen durch die nutzbare Feldkapazität ( $nFK$ ) charakterisiert, die im Wesentlichen auf der Basis von Angaben zur Bodenart abgeleitet wird und den Teil der Feldkapazität ( $FK$ ) darstellt, der von den Pflanzen durch die Wurzel aufgenommen werden kann. Der Index ( $i$ ) in Gl. 3-1 läuft dabei über alle in der BK 50 unterschiedenen Bodenschichten, die in ihrer jeweiligen Schichtmächtigkeit ( $M_i$ ) berücksichtigt werden. Berechnet wird die Verweilzeit auf diese Weise bis zu Untergrenze des durchwurzelten Bodenbereichs bzw. bei drainierten Standorten bis zur Grundwasseroberfläche:

$$t_{\text{Boden}} = \sum_i nFK_i \cdot \frac{M_i}{Q_{\text{SW}}} \quad (\text{Gl. 3-1})$$

mit:

- $t_{\text{Boden}}$  Verweilzeit in der durchwurzelten Bodenzone [a]
- $Q_{\text{SW}}$  Sickerwasserrate [mm/a]
- $nFK_i$  nutzbare Feldkapazität [mm/dm]
- $M_i$  Schichtmächtigkeit [dm]

### 3.2.2 Verweilzeitenermittlung im Bodenbereich unterhalb der Wurzelzone

Wie im durchwurzelten Bodenbereich verläuft die Verlagerung des Sickerwassers im Bodenbereich unterhalb der Wurzelzone ebenfalls über die Poren des Substrats, so dass die Verweilzeit dort ebenfalls nach DIN 19732 über Angaben zum Wasserspeichervermögen in der BK 50 abgeleitet werden kann.

Die Verweilzeit im Bodenbereich unterhalb der Wurzelzone wird ausschließlich für nicht drainierte Standorte berechnet, da die Grundwasseroberfläche bei drainierten Standorten schon nach der Durchsickerung des durchwurzelten Bodenbereichs erreicht wird. Da laterale Verlagerungen wegen fehlender Datengrundlagen im Allgemeinen nicht abbildbar sind, wird unterstellt, dass die Bodenschichten bis zur Erreichung der Grundwasseroberfläche ausschließlich vertikal durchströmt werden.

Da der Einfluss von Pflanzenwurzeln jedoch fehlt, wird das Wasserspeichervermögen im Bodenbereich unterhalb der Wurzelzone über die Feldkapazität ( $FK$ ) besser beschrieben, als über die nutzbare Feldkapazität (vgl. Gl. 3-1). Auch wird hierfür in erster Näherung die Grundwasserneubildungsrate ( $Q_{\text{GW}}$ ) eingesetzt, die für ungedrängte Standorte jedoch der Sickerwasserhöhe entspricht. Der Index ( $i$ ) läuft auch bei der Verweilzeitenermittlung im Bodenbereich unterhalb der Wurzelzone über alle unterscheidbaren Schichten dieser Zone, die in ihrer jeweiligen Schichtmächtigkeit ( $M_i$ ) berücksichtigt werden:

$$t_{Ueber} = \sum_i FK_i \cdot \frac{M_i}{Q_{GW}}$$

Gl. 3-2

mit:

|             |                                                                    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------|
| $t_{Ueber}$ | Verweilzeit im Boden unterhalb der Wurzelzone bis ca. 2m Tiefe [a] |
| $Q_{GW}$    | Grundwasserneubildungsrate [mm/a]                                  |
| $FK_i$      | Feldkapazität [mm/dm]                                              |
| $M_i$       | Schichtmächtigkeit [dm]                                            |

Nach diesem Ansatz erfolgt die Verweilzeitenermittlung bis in einen Tiefenbereich von maximal 2 Metern. Dies entspricht dem maximalen Tiefenbereich, für den in der BK 50 Informationen verfügbar sind.

### 3.2.3 Datengrundlagen (Übersicht)

Für die Anwendung des Verfahrens nach DIN 19732 in der Bodenzone wurden die in der Tab. 3-1 aufgeführten Datengrundlagen verwendet. Kartendarstellungen und detailliertere Beschreibungen der Datengrundlagen finden sich in Kap. 5.

**Tabelle 3-1:** Datengrundlagen für die Berechnung der Verweilzeiten im Boden

| Parameter                                                 | Datenquelle<br>flächenhafte Berechnung                                                         |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mächtigkeit der durchwurzelten Bodenschichten             | Bodenbasisdaten<br>Bodenkarte 1:50.000 (BK 50)<br>(GD NRW)                                     |
| nutzbare Feldkapazität der durchwurzelten Bodenschichten  |                                                                                                |
| Mächtigkeit der Bodenschichten unterhalb des Wurzelraums  |                                                                                                |
| Feldkapazität der Bodenschichten unterhalb der Wurzelzone |                                                                                                |
| Grundwasserflurabstand                                    | Verschneidung aus Delta h – Grundwasseroberfläche und DLM                                      |
| Bodenbedeckungskategorien                                 | Verschneidung aus DLM, CORINE und High Resolution Layer: Imperviousness Degree (IMD), EEA 2012 |
| Sickerwasserraten                                         | mGROWA - Modellergebnis                                                                        |
| Dränkarte                                                 | FZJ                                                                                            |

### 3.3. Verweilzeitenermittlung in den Grundwasserdeckschichten

Für die Verweilzeitenermittlung in den Grundwasserdeckschichten stehen je nach Region und Standortsituation Datengrundlagen unterschiedlichen Detaillierungsgrades zur Verfügung. Ausgehend von der Prämisse, dass die jeweils bestverfügbare Datengrundlage in die Ermittlung der Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten eingehen soll, kommen daher je nach Standortsituation und Datenlage unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Generell ist dadurch die Verweilzeitenermittlung in den Grundwasserdeckschichten von Festgesteinsregionen von der Verweilzeitenermittlung in den Grundwasserdeckschichten von Lockergesteinsregionen zu unterscheiden.

#### 3.3.1 Verfahren für Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein

Für Lockergesteinsregionen ist die Datenlage für den Bereich der Grundwasserdeckschichten generell besser als im Festgestein. Da Angaben zum Wasserspeichervermögen (Feldkapazität) der Grundwasserdeckschichten im Lockergestein aus der Hydrogeologischen Karte NRW (HK NRW) ableitbar sind, kann dadurch ebenfalls das Verfahren nach DIN 19732 angewendet werden:

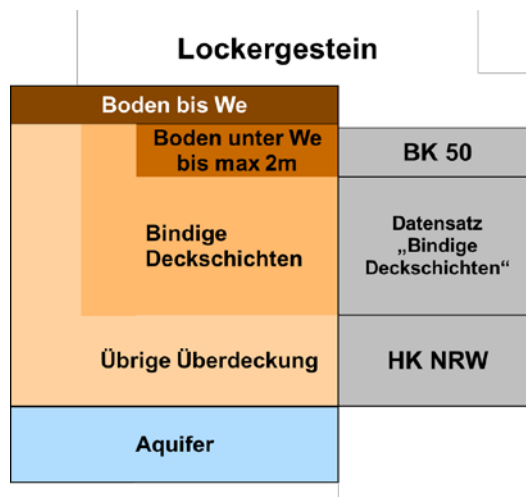
$$t_{GWD} = \sum_i FK_i \cdot \frac{M_i}{Q_{GW}} \quad (\text{Gl. 3-3})$$

mit:

- $t_{GWD}$  Verweilzeit Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein [a]
- $Q_{GW}$  Grundwasserneubildungsrate [mm/a]
- $FK_i$  Feldkapazität [mm/dm]
- $M_i$  Schichtmächtigkeit [dm]

Die Verweilzeit in den Grundwasserdeckschichten von Lockergesteinsregionen wird, wie schon in Zusammenhang mit der Verweilzeitenermittlung im Boden ausgeführt, auch in diesem Falle ausschließlich für nicht drainierte Standorte berechnet, da die Grundwasseroberfläche bei drainierten Standorten schon nach der Durchsickerung des Bodens erreicht wird.

Die Angaben zum Wasserspeichervermögen (Feldkapazität) der Grundwasserdeckschichten, die für die Anwendung von Gl. 3-3 benötigt werden, können aus verschiedenen Datengrundlagen abgeleitet werden. Das in Abb.3-1 dargestellte Schema soll die Zusammenhänge verdeutlichen.



**Abb. 3-1:** Schaubild zur Verdeutlichung der verwendeten Datengrundlagen zur Verweilzeitenermittlung im Lockergesteinsbereich

Ausgehend von der Prämisse, dass die jeweils bestverfügbare Datengrundlage in die Ermittlung der Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten eingehen soll, gibt es eine hierarchische Abfolge bei der Auswahl der Datensätze, die je nach Standortsituation und Datenlage zum Einsatz kommen.

In Kap. 3-2 wurde bereits ausgeführt, dass die beste Datengrundlage mit Angaben zum Wasserspeichervermögen die BK 50 darstellt. Folglich stellt die BK 50 für alle Tiefenlagen, für die in der BK 50 Werte angegeben sind, die Grundlage dar. Die maximale Tiefe unter der Geländeoberfläche, für die Angaben zur Feldkapazität in den Profilbeschreibungen der BK 50 vorhanden sind, ist jedoch auf ca. 2 m bzw. die Obergrenze des Festgesteins begrenzt. Zudem liegen diese Angaben nur für Teilregionen NRWs vor.

Für die Tiefenbereiche unterhalb der Wurzelzone bzw. generell unterhalb von 2 Metern stehen daher keine Datengrundlagen in einem vergleichbar hohen Auflösungsgrad wie die BK 50 zur Verfügung. Für den Großteil der Landesfläche NRWs stellt die Hydrogeologische Karte (HK NRW) die einzige Datengrundlage mit Angaben zu den Grundwasserdeckschichten dar. Die benötigten Daten zur Feldkapazität können in Anlehnung an AG Bodenkunde (2005) aus den petrographischen Gesteinsbeschreibungen zum lithologischen Aufbau der HK NRW transferiert werden (vgl. Tab. 3-2).

Jedoch kann die Feldkapazität dort, wo mächtige bindige Deckschichten anstehen, aus dem neu entwickelten Thema „Bindige Deckschichten“ bzw. den dort ausgewiesenen petrographischen Gesteinsbeschreibungen für Löss (Schluff) und Grundmoräne (Schluff, Ton, Steine) abgeleitet werden.

**Tabelle 3-2:** Petrographische Beschreibungen für Lockergesteinseinheiten in der HK NRW und zugeordnete Feldkapazitätswerte nach AG Bodenkunde (2005), verändert

| <b>Petrographische Beschreibung</b> | <b>Feldkapazität<br/>(mm/dm)</b> |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| Sand, Kies                          | 4                                |
| Sand, z.T. schluffig, kiesig        | 6                                |
| Kies, Sand, Ton                     | 8                                |
| Grobsand                            | 9                                |
| Mittelgrober Sand                   | 12                               |
| Feinsand                            | 17                               |
| Schluffiger Sand                    | 24                               |
| Schluffiger Lehm                    | 24                               |
| Lehmiger Sand                       | 26                               |
| schluffig-lehmiger Sand             | 28                               |
| Sandig-lehmiger Schluff             | 31                               |
| Schluff                             | 32                               |
| Löss                                | 32                               |
| Sandiger Lehm                       | 32                               |
| Lehmiger Schluff                    | 35                               |
| Stark lehmiger Schluff              | 36                               |
| Toniger Lehm                        | 38                               |
| Schluffig-toniger Lehm              | 40                               |
| Grundmoränen (Ton, Schluff, Steine) | 42                               |
| Lehm oder schluffiger Ton           | 47                               |
| Ton                                 | 51                               |
| Torf                                | 72                               |



### 3.3.2 Verfahren für Grundwasserdeckschichten aus Festgestein

Festgesteine haben andere geohydraulische Eigenschaften als Lockergesteine. Der Wassertransport findet hier nicht in einem porösen Substrat statt, sondern überwiegend in Klüften. Ist die Matrixdurchlässigkeit gering, was für die meisten Festgesteinseinheiten der Fall ist, fließt das Wasser praktisch nur in den Klüften als dominantem Fließweg.

Aufgrund der meist geringen wasserwirtschaftlichen Bedeutung von Festgesteinsgebieten sind die Kenntnisse über den Untergrund oftmals sehr beschränkt. Landesweit stehen für Festgesteinsbereiche Daten aus geologischen und hydrogeologischen Kartenwerken (HK 50, HK 100, GK 100) zur Verfügung sowie vereinzelt Daten aus Lokalstudien. Diese Übersichtskarten enthalten aber nur sehr eingeschränkte Angaben zum Aufbau der Grundwasserdeckschichten in Festgesteinsregionen. Dies gilt insbesondere für Informationen zur Wasserwegsamkeit, Kluftausprägung und Schichtmächtigkeit. Darüber hinaus kann aus den vorhandenen hydrogeologischen Kartenwerken kein Wasserspeichervermögen abgeleitet werden, so dass der Berechnungsansatz nach DIN 19732 (siehe Gl. 3-2) nicht angewendet werden kann.

Für Festgesteinsregionen wurde stattdessen das Verfahren zur Ableitung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung nach Hölting et al. (1995) eingesetzt. Dieses Verfahren ist nach wie vor das Standardverfahren der Geologischen Landesämter der Bundesrepublik Deutschland. Entwickelt wurde das Verfahren zur qualitativen Abschätzung der Gesamtschutzfunktion der Grundwasserüberdeckung.

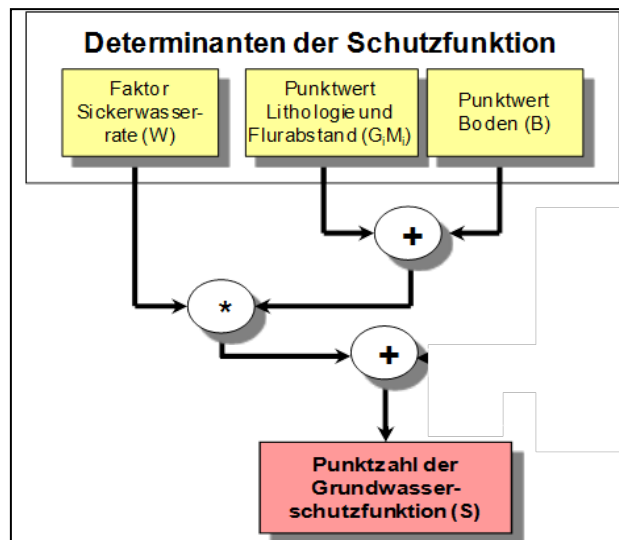
Die benötigte Datendichte ist verhältnismäßig gering. Das Verfahren beruht auf einem Punktesystem, bei dem eine Reihe von Einflussfaktoren bewertet und schließlich nach Gl. 3-3 miteinander verrechnet werden:

$$P_F = F_{SW} \times \sum_i F_{Strukt,i} \times P_{Gest,i} \times M_i \quad (\text{Gl. 3-3})$$

mit:

|                |   |                                         |       |
|----------------|---|-----------------------------------------|-------|
| $P_F$          | = | Punktwert Festgestein                   | [-]   |
| $F_{SW}$       | = | Faktor für die Sickerwasserrate         | [-]   |
| $F_{Strukt,i}$ | = | Strukturfaktor der i-ten Schicht        | [-]   |
| $P_{Gest,i}$   | = | Punktwert Gesteinsart der i-ten Schicht | [m-1] |
| $M_i$          | = | Mächtigkeit der i-ten Schicht           | [m]   |

**Abb. 3-2** zeigt eine schematische Darstellung der Verfahrensweise zur Ableitung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung nach Hölting et al. (1995).



**Abb. 3-2:** Schematische Darstellung der Verfahrensweise zur Ableitung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung

Der Punktwert zur Bewertung der Schutzeigenschaften der Grundwasserüberdeckung für Festgesteine errechnet sich auf der Grundlage von Gl. 3-3 als Produkt eines Wichtungsfaktors für die Sickerwasserhöhe, eines Punktwertes für die Gesteinsart und eines Wichtungsfaktors für die Struktureigenschaften. Die einzelnen Faktoren fließen in klassifizierter Form in die Gesamtschutzfunktion ein. Je höher die Punktzahl, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Schadstoffe in der Grundwasserüberdeckung physikalischen und mikrobiellen Prozessen unterworfen werden, die zur Folge haben, dass der Eintrag ins Grundwasser geringer bzw. stark zeitverzögert ausfällt.

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

Angaben zur Bewertung von Gesteinsart und Stratigrafie können aus der HK NRW entnommen werden. Die Schichtmächtigkeiten ergibt sich aus dem um die Mächtigkeiten von Bodenzone und Lockergesteinsdeckschichten reduzierten Flurabstand.

Wie bereits in Kap. 2-1 beschrieben, wird die Sickerwasserhöhe im Festgesteinsbereich durch den Interflow reduziert, und zwar dort, wo vertikal versickerndes Wasser in der ungesättigten Zone auf eine Schicht geringerer Durchlässigkeit stößt, so dass es gezwungen wird, teilweise oberhalb dieser Schicht lateral abzufließen. Da der Tiefenbereich, in dem sich der natürliche Zwischenabfluss (Interflow) abtrennt, jedoch nicht eindeutig lokalisierbar ist, wird bei der Modellierung vereinfachend angenommen, dass die Abtrennung des Interflows unmittelbar an der Obergrenze des Aquifers erfolgt (siehe. Abb. 2-3).

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

| Gesteinsart                                                           | $P_{\text{Gest}} \text{ [m}^{-1}\text{]}$ | Strukturfaktor                               | $F_{\text{Struk}}$ |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------|
| Tonstein, Tonschiefer, Mergelstein, Schluffstein                      | 20                                        | ungeklüftet                                  | 25.0               |
| Sandstein, Quarzit, vulkanische Festgesteine, Plutonite, Metamorphite | 15                                        | wenig geklüftet                              | 4.0                |
| poröser Sandstein, poröse Vulkanite, (z. B. verfestigter Tuff)        | 10                                        | mittel geklüftet, wenig verkarstet           | 1.0                |
| Konglomerat, Brekzie, Kalkstein, Kalktuff, Dolomitstein, Gipsstein    | 5                                         | mittel verkarstet                            | 0.5                |
|                                                                       |                                           | stark geklüftet, zerrüttet, stark verkarstet | 0.3                |
|                                                                       |                                           | nicht bekannt                                | 1.0                |

Die Grundwasserdeckschichten werden dementsprechend vom Sickerwasser durchströmt, siehe Gl. 3-4:

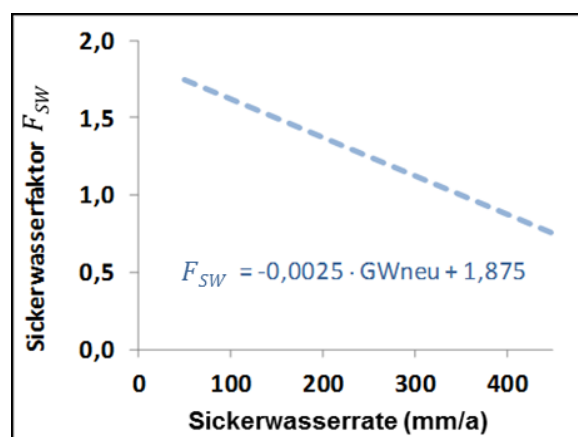
$$F_{SW} = 1.875 - 2.5 \times 10^{-3} \times Q_{SW}$$

(Gl. 3-4)

mit:

$$\begin{aligned} F_{SW} &= \text{Sickerwasserfaktor} \quad [-] \\ Q_{SW} &= \text{mittlere jährliche Sickerwasserrate} \quad [\text{mm/a}] \end{aligned}$$

Abbildung 3-3 veranschaulicht in welcher Weise die Höhe der Sickerwasserrate den Sickerwasserfaktor beeinflusst und damit den Punktwert zur Bewertung der Schutzeigenschaften der Grundwasserüberdeckung für Festgesteine nach Gl. 2-4.

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

Tendenziell wird hiermit abgebildet, dass die Verweilzeit in der Deckschicht bei steigenden Sickerwasserraten aufgrund des erhöhten Wasserdurchsatzes durch das Gestein abnimmt.

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

**Tabelle 3-4:** Klasseneinteilung der Gesamtschutzfunktion

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

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

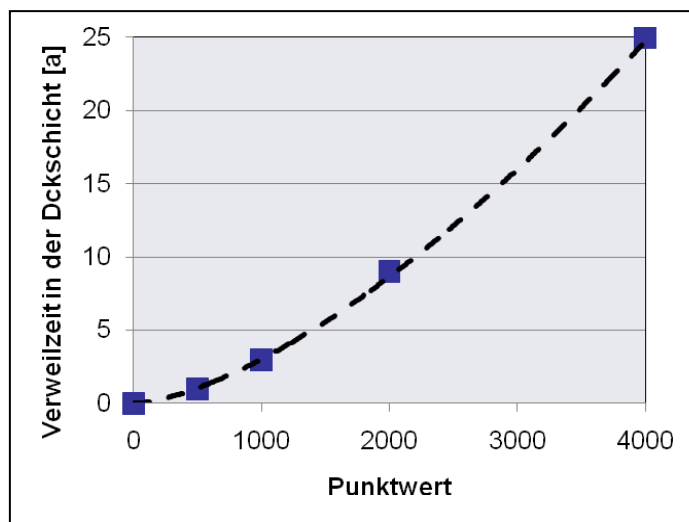
Um den Einfluss unterschiedlicher Punktzahlen auf die Verweilzeit zumindest tendenziell berücksichtigen zu können, wurden die Anhaltswerte in Tabelle 3-4 in eine stetige Beziehung von Punktwert Festgestein nach Gl. 3-5 und Verweilzeit überführt:

$$t_{Deck} \approx 9 \cdot 10^{-5} \cdot P_F^{1.5156} \quad (\text{Gl. 3-5})$$

mit:

$$\begin{aligned} t_{Deck} &= \text{Verweilzeit in den Festgesteinsdeckschichten} \quad [a] \\ P_F &= \text{Punktwert Festgestein} \quad [-] \end{aligned}$$

Diese Beziehung ist grafisch in Abbildung 3-4 dargestellt, wobei die Datenpunkte die Anhaltswerte aus Tabelle 3-4 wiedergeben.



**Abb. 3-4:** Abhängigkeit von Verweilzeit und Punktwert in Festgesteinsdeckschichten

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

### 3.3.3 Verfahren für von Lockergestein überlagerten Festgesteinsdeckschichten

Hierbei handelt es sich um einen Sonderfall, der dann zum Tragen kommt, wenn der obere Teil der Grundwasserdeckschichten unterhalb des Bodens aus Lockergestein besteht, der untere Teil der Grundwasserdeckschichten dagegen aus Festgestein (vgl. Abb. 2-2). In diesem Fall wird die Verweilzeit in den Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein nach der in Kap. 2.2.1 beschriebenen Vorgehensweise in Anlehnung an DIN 19732 abgeleitet, d.h. die Verweilzeit wird aus der Sickerwasserhöhe und dem Wasserspeichervermögen des Substrats abgeleitet. In den Grundwasserdeckschichten aus Festgestein erfolgt die Ermittlung der Verweilzeiten dagegen nach der in Kap. 2.3.2 beschriebenen Vorgehensweise in Anlehnung an das Verfahren von Hölting et al. (1995), d.h. über die Bestimmung einer Punktzahl, aus der unter Berücksichtigung von Gesteinsart, Schichtmächtigkeit, tektonischer Struktur und Sickerwasserrate ein Anhaltswert der Verweilzeit abgeleitet wird.

### 3.3.4 Datengrundlagen (Übersicht)

Die Tabelle 3-5 fasst die Datengrundlagen zur Ermittlung der Verweilzeit in Deckschichten aus Lockergestein zusammen. Die Tabelle 3-6 fasst in analoger Weise die Datengrundlagen zur Ermittlung der Verweilzeit in Deckschichten aus Festgestein zusammen.

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

| Parameter                       | Datenquelle<br>flächenhafte Berechnung                    |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Mächtigkeit der Deckschichten   | BK 50; HK NRW;<br>Datensatz „Bindige Deckschichten“       |
| Feldkapazität der Deckschichten |                                                           |
| Grundwasserflurabstand          | Verschneidung aus Delta h – Grundwasseroberfläche und DLM |
| Sickerwasserraten               | Modellergebnis mGROWA                                     |

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

| Parameter                                                 | Datenquelle<br>flächenhafte Berechnung                    |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Gesteinsart; Gesteinsfaktor                               | BK 50; HK NRW;<br>Datensatz „Bindige Deckschichten“       |
| Mächtigkeit der Deckschichten;                            | BK 50; HK NRW;<br>Datensatz „Bindige Deckschichten“       |
| Klüftigkeit und tektonische Beanspruchung; Strukturfaktor | HK NRW                                                    |
| Grundwasserflurabstand                                    | Verschneidung aus Delta h – Grundwasseroberfläche und DLM |
| Sickerwasserhöhe; Sickerwasserfaktor                      | Modellergebnis mGROWA                                     |

### 3.4 Anwendbarkeit und Grenzen der Verfahren zur Verweilzeitenermittlung

Der Anwendbarkeit des Verfahrens nach DIN 19732 zur Ermittlung von Verweilzeiten im Boden sind keine Grenzen gesetzt. Berechnet wird die Verweilzeit im Boden bis zum Ende der Bodenzone bzw. bei drainierten Standorten bis zur Grundwasseroberfläche.

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

schichten in der Festgesteinsregion ermittelten Verweilzeiten daher mit größeren Unsicherheiten behaftet, obwohl die Modellergebnisse in landesweiten Kartendarstellungen (vgl. Kap.6) homogen erscheinen.

Bei der Verwendung von Modellergebnissen zur Verweilzeit sollte man sich daher immer darüber im Klaren sein, dass deren Berechnung basierend auf unterschiedlich genauen Berechnungsverfahren erfolgte und zudem qualitativ unterschiedliche Datengrundlagen eingegangen sind.

## **4 Ermittlung von Fließzeiten im Grundwasser bis Vorflutereintritt**

Die Ermittlung von Fließzeiten im Grundwasser ist für Vorflutern von Grundwasserneubildungsgebieten, in denen der Grundwasserabfluss den Abfluss im Oberflächengewässer dominiert, von Relevanz, vor allem in Zusammenhang mit Zielerreichungsprognosen. Das WEKU-Modell (Kunkel & Wendland, 1997) bietet die Möglichkeit, eine Ermittlung der Fließzeiten des Grundwassers bis zum Vorflutereintritt basierend auf zweidimensionalen, landesweit verfügbaren Datengrundlagen vorzunehmen. Das Modell ist für die Betrachtung meso- und makroskaliger Einzugsgebiete und GWK entwickelt worden. Es arbeitet rasterbasiert und ist auf den oberen Grundwasserleiter bezogen. Hierbei wird vereinfachend angenommen, dass das Grundwasser entlang der Grundwasseroberfläche in ein Oberflächengewässer abströmt.

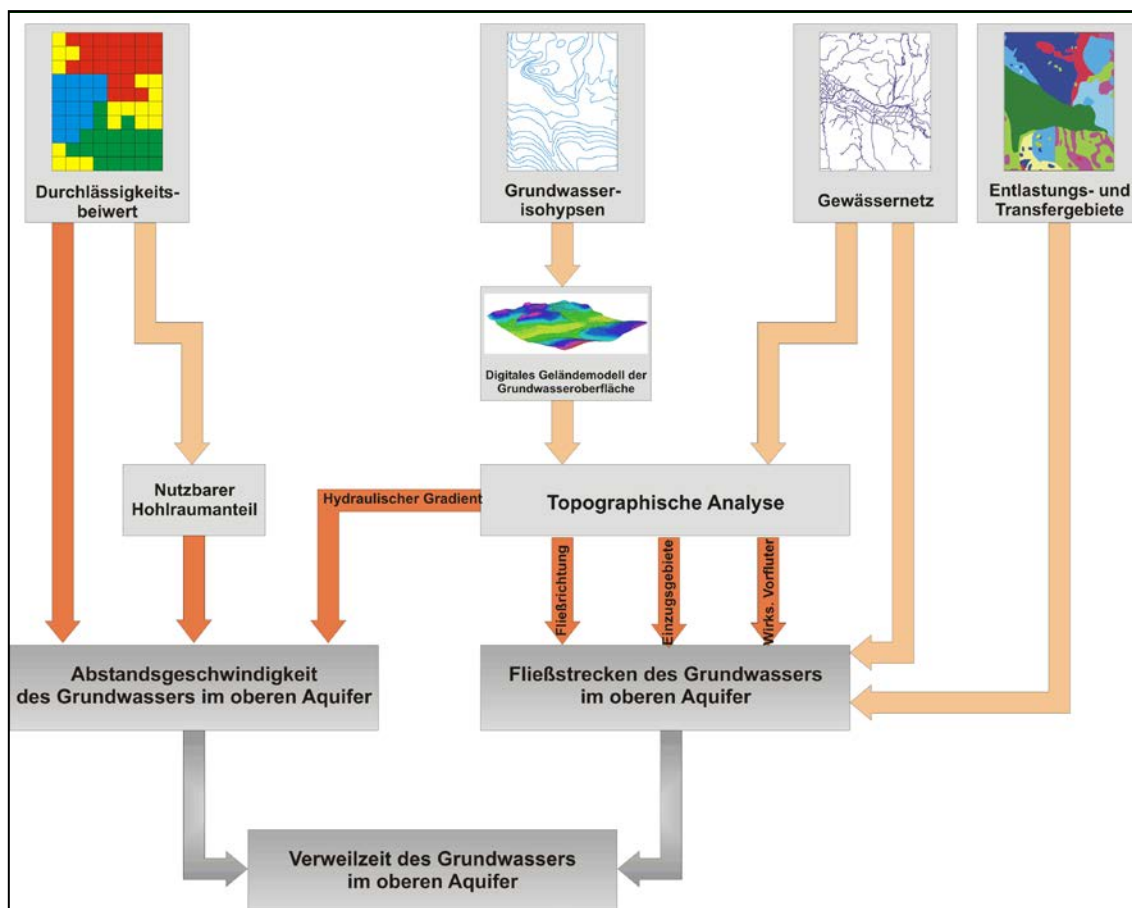
### **4.1 Verfahrensgang des WEKU-Modells**

Im WEKU-Modell (Kunkel & Wendland, 1997) werden die Fließzeiten im oberen Aquifer über die Morphologie der Grundwasseroberfläche, hydrodynamische Parameter und die grundwasserwirksamen Vorfluter berechnet. Diese Datengrundlagen sind in der Hydrogeologischen Karte NRW (HK NRW) enthalten oder können hieraus abgeleitet werden.

Bei einer landesweiten Modellierung können im Allgemeinen nur Datengrundlagen ohne Tiefenauflösung genutzt werden. So weist beispielsweise die Hydrogeologische Karte NRW (HK NRW) zwar eine recht hohe laterale Auflösung auf; ihr sind jedoch kaum Angaben über die Tiefenstruktur der Aquifere zu entnehmen. Da i.d.R. auch keine Bohrprofile, Grundwasserstände oder hydrogeologische Schnitte in ausreichender Menge nutzbar sind, bezieht sich eine flächenhafte Modellierung der Grundwasserfließzeiten ausschließlich auf eine zweidimensionale Aufsicht auf den jeweiligen Grundwasserkörper.

Die für das WEKU-Modell benötigten Informationen können aus Grundwassergleichenplänen und hydrogeologischen Übersichtskarten abgeleitet werden. Die natürliche Heterogenität der betrachteten Aquifere, aber auch Unsicherheiten in den Datengrundlagen, können durch eine stochastische Betrachtungsweise berücksichtigt werden. Auf diese Weise kann der Einfluss der Variabilität der Modelleingabegrößen auf die berechneten Fließstrecken und Grundwasserverweilzeiten quantifiziert werden. Als Ergebnis erhält man eine Verteilung von Fließstrecken bzw. Grundwasserverweilzeiten für jede Eintragszelle. Dies ermöglicht es, neben der Angabe mittlerer Werte auch Aussagen über Streubreiten und Vertrauensbereiche zu treffen. In Abbildung 4-1 ist der Verfahrensgang der Verweilzeitenmodellierung mit WEKU schematisch dargestellt.





**Abb. 4-1:** Schematischer Überblick über den Verfahrensgang und die Datengrundlagen für die WEKU-Fließzeitenmodellierung

#### 4.1.1 Modellierung der Abstandsgeschwindigkeit

Die Modellierung der Abstandsgeschwindigkeit umfasst zwei Schritte. In einem ersten Schritt wird aus Grundwassergleichenplänen und anderen Datengrundlagen zunächst ein digitales Höhenmodell der Grundwasseroberfläche des oberen Aquifers erstellt. Aus diesem Höhenmodell wird für jede Rasterzelle der hydraulische Gradient nach Betrag und Richtung sowie die grundwasserwirksamen Vorfluter ermittelt.

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

Der Durchlässigkeitsbeiwert stellt eine zentrale Kenngröße bei der Modellierung von Strömungsvorgängen im Grundwasserleiter dar, da er die Leitfähigkeit des durchströmten Mediums charakterisiert. Aus diesen Gründen wird die Durchlässigkeit der Grundwasserleiter in Gebieten wasserwirtschaftlich bedeutender Grundwasservorkommen intensiv, meist durch Pumpversuche oder aus der Korngrößenanalyse repräsentativer Korngrößengemische, untersucht.

$$\vec{v}_a = - \frac{k_f}{n_f} \cdot \vec{\nabla} j$$

Gl 4-1

mit:

- $v_a$ : Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [m/s]  
 $k_f$ : Durchlässigkeitsbeiwert der Grundwasser führenden Gesteine [m/s]  
 $n_f$ : nutzbarer Hohlraumanteil der Grundwasser führenden Gesteine [-]  
 $\vec{\nabla} j$ : hydraulischer Gradient [-]

Eine Bewegung des Grundwassers im Aquifer ist nur möglich, wenn zusammenhängende Hohlräume vorhanden sind. Je größer der Hohlraumanteil eines Gesteins ist, desto besser kann das Grundwasser den Aquifer durchströmen. Für die Berechnung wird der nutzbare Hohlraumanteil eines Gesteins eingesetzt. Aber nicht der gesamte Hohlraumanteil eines Grundwasserleiters ist wasserwegsam. Als nutzbaren Hohlraumanteil bezeichnet man den Anteil des Gesamthohlraums, der nicht durch adhäsiv gebundenes Wasser belegt ist, der also effektiv für die Grundwasserbewegung zur Verfügung steht. Da Daten zu nutzbaren Hohlraumanteilen im Allgemeinen nicht flächendeckend zur Verfügung stehen, ist man auf Abschätzungen angewiesen.

In Lockergesteinsaquiferen, bei denen die Bewegung des Wassers an Poren Hohlräume gebunden ist, wird der nutzbare Hohlraumanteil durch die Packungsdichte, die Form und Anordnung der Körner sowie die Korngrößenverteilung bestimmt. Diese Parameter entsprechen weitgehend den Größen, die auch für die Durchlässigkeitsbeiwerte maßgeblich sind. Zumindest für Porenaquifere kann daher eine Korrelation zwischen Durchlässigkeit und nutzbarem Hohlraumvolumen erwartet werden, welche auch durch eine Vielzahl von Untersuchungen nachgewiesen wurde. Für Lockergesteinsaquifere lassen sich nach Ahuja et al. (1988) Richtwerte abschätzen, für die eine exponentielle Beziehung zugrunde gelegt werden kann. In der Weise wurden von Kunkel & Wendland (1999) die Koeffizienten in Gl. 4-2 ermittelt. Grundlage hierfür waren die in Untersuchungen in Deutschland festgestellten Beziehungen zwischen Durchlässigkeit und nutzbarem Hohlraumvolumen von Busch & Luckner (1973) und Marotz (1968).

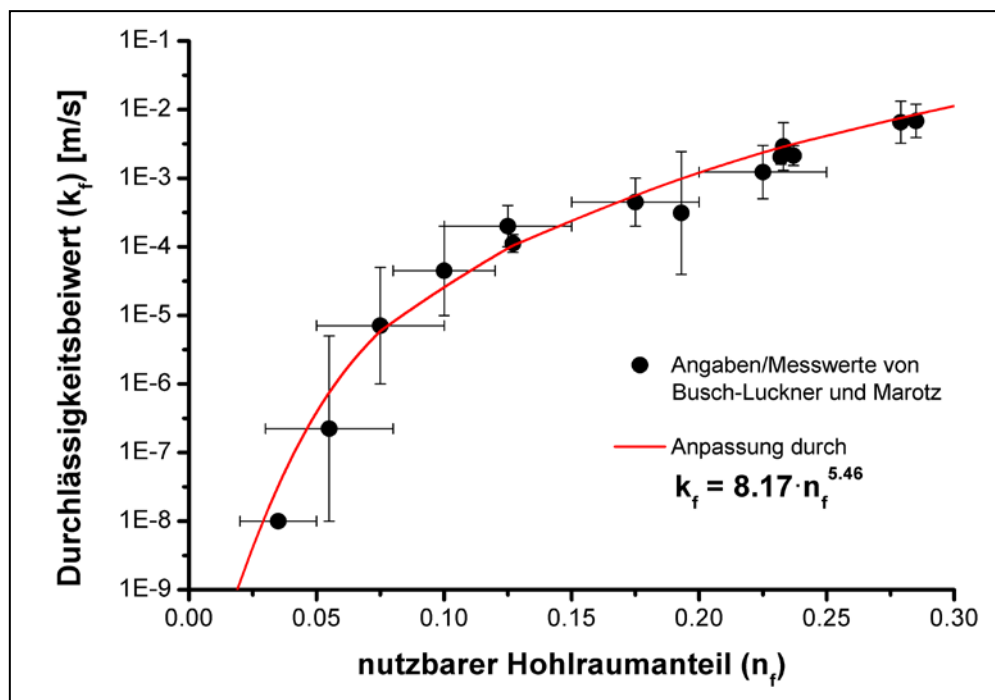
$$k_f = 8.17 \times n_f^{5.46}$$

Gl 4-2

mit:

- $k_f$ : Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]  
 $n_f$ : Nutzbarer Hohlraumanteil [-]

Für Festgesteine ist es aufgrund der unterschiedlichen Wasserwegsamkeit in den Kluftsystemen nicht möglich, ein „durchflusswirksames Kluftvolumen“ durch empirische Beziehungen zu berechnen. Für Festgesteinsregionen werden deshalb im Allgemeinen Literaturwerte herangezogen, vgl. Tabelle 4-1 (Kuhr et al., 2014).



**Abb. 4-2:** Abhängigkeit von Durchlässigkeitsbeiwert und nutzbarem Hohlraumanteil in Lockergesteinen (Kunkel & Wendland, 1999)

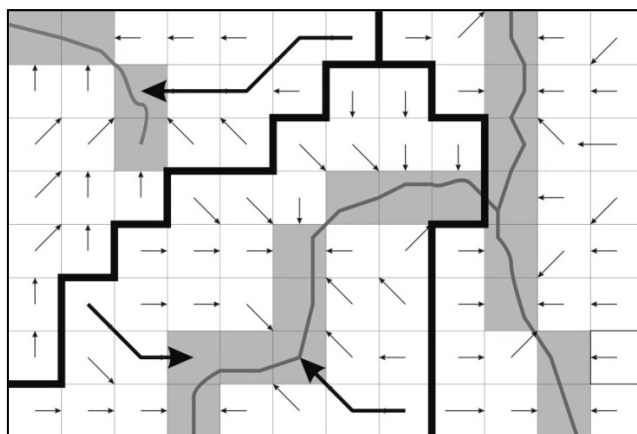
**Tabelle 4-1:** Nutzbarer Hohlraumanteil in Festgesteinen

|                                   | effektives<br>Kluftvolumen | effektives<br>Porenvolumen | effektiver<br>Hohlraumanteil | Mittelwert<br>nutzbarer<br>Hohlraumanteil |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| paläozoische Sedimentgesteine     | 0,1 - 0,5 %                | < 0,1 %                    | 0,1 - 0,5 %                  | 0,30 %                                    |
| paläozoische Sandsteine           | 0,1 - 0,5 %                | < 0,1 %                    | 0,1 - 0,5 %                  | 0,30 %                                    |
| paläozoische Kalksteine           | 1,5 - 2,0 %                | < 0,1 %                    | 1,5 - 2,0 %                  | 1,75 %                                    |
| Keupersandsteine und Konglomerate | 1,0 - 1,5 %                | < 0,1 %                    | 1,0 - 1,5 %                  | 1,25 %                                    |
| Mesozoische Kalksteine            | 0,5 - 5,0 %                | < 0,1 %                    | 0,5 - 5,0 %                  | 2,75 %                                    |
| Tuff                              | 0,5 - 2,5 %                | 1,0 - 2,0 %                | 1,5 - 4,5 %                  | 3,00 %                                    |
| Vulkanite                         | 0,5 - 2,5 %                | < 0,1 %                    | 0,5 - 2,5 %                  | 1,50 %                                    |
| kristalline Gesteine              | 0,1 - 0,5 %                | < 0,1 %                    | 0,1 - 0,5 %                  | 0,30 %                                    |
| Oberer Buntsandstein              | 1,0 - 1,7 %                | 1,0 - 2,0 %                | 2,0 - 3,7 %                  | 2,75 %                                    |
| Mittlerer Buntsandstein           | 0,5 - 2,0 %                | 0,5 - 2,0 %                | 1,0 - 3,0 %                  | 2,00 %                                    |
| Unterer Buntsandstein             | 1,0 - 1,7 %                | 1,0 - 2,0 %                | 2,0 - 3,7 %                  | 2,75 %                                    |

#### 4.1.2 Berechnung der Fließzeit bis Vorflutereintritt

Im nächsten Schritt wird aus den ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten nach Gl. 4–1 in den einzelnen Rasterzellen zunächst die Fließzeit des Grundwassers berechnet. Anschließend wird die Fließzeit des Grundwassers vom Eintritt in den Aquifer bis zum Austrag in einen Vorfluter ermittelt. Betrachtet wird hierzu die gesamte Fließstrecke von der Eintragszelle des Grundwassers in den Aquifer bis zum Austritt in ein Oberflächengewässer.

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



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

Als Eingabedaten werden, neben der für die Einzelrasterzellen ermittelten Abstandsgeschwindigkeit, die aus der Grundwassermorphologie ableitbare Fließrichtung und Fließstrecke benötigt (Gl 4-3). Die Fließzeit errechnet sich also durch Addition der Einzelfließzeiten in den Rasterzellen entlang des Fließwegs von der Eintrags- bis zur Austragsstelle.

$$t_{gw} = \sum_i \frac{\ell_i}{v_{a,i}}$$

Gl 4-3

mit:

|            |                                                  |       |
|------------|--------------------------------------------------|-------|
| $t_{gw}$ : | Grundwasserverweilzeit für den gesamten Fließweg | [s]   |
| $v_a$ :    | Abstandsgeschwindigkeit in der Rasterzelle $i$   | [m/s] |
| $\ell_i$ : | Fließstrecke in der Rasterzelle $i$              | [m]   |

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

#### 4.1.3 Datengrundlagen (Übersicht)

Tabelle 4-2 fasst die Datengrundlagen zur Ermittlung der Fließzeiten zusammen.

**Tabelle 4-2:** Datengrundlagen für die Fließzeitermittlung bis Vorflutereintritt

| Parameter                                               | Datenquelle<br>flächenhafte Berechnung                       |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Hydraulischer Gradient                                  | delta h - Modell der Grundwasseroberfläche:                  |
| Grundwasserfließrichtung                                |                                                              |
| Hydraulische Leitfähigkeit<br>(Durchlässigkeitsbeiwert) | HK NRW; ankalibrierte Werte delta h                          |
| Nutzbarer Hohlraumanteil                                | Modellergebnis (Lockergestein); Literaturwerte (Festgestein) |
| Grundwasserführende Gesteinseinheiten (Petrographie)    | HK NRW                                                       |
| Grundwasserwirksame Vorfluter                           | Gewässernetz aus DLM, Grundwasseroberfläche delta h          |

## 4.2 Anwendbarkeit und Grenzen des WEKU-Verfahrens

Hydrogeologische Gebietsparameter weisen im Allgemeinen große räumliche Variabilitäten auf. Bei flächenhaften Betrachtungen führen diese dazu, dass insbesondere die Durchlässigkeitsbeiwerte nicht als Einzelwerte, sondern in Form von Bandbreiten angegeben werden, die zum Teil mehrere Größenordnungen betragen können. Diese großen Streubreiten führen dazu, dass auch die hieraus berechneten Abstandsgeschwindigkeiten und Grundwasserverweilzeiten große Unsicherheiten aufweisen können.

Die mit dem WEKU-Modell berechneten Fließzeiten beziehen sich immer auf den grundwasserbürtigen Abflussanteil. Wie bereits ausgeführt wurde, stellt der grundwasserbürtige Abflussanteil aber nicht in allen Regionen die dominierende Abflusskomponente dar. So trägt der grundwasserbürtige Abfluss in Grundgebirgskomplexen wie dem Rheinischen Schiefergebirge

häufig weniger als 15 % zum Gesamtabfluss bei. In diesen Regionen beziehen sich die Fließzeiten daher nicht auf die regional dominante Abflusskomponente. Dies ist bei der Interpretation und Anwendung von Ergebnisse zu Grundwasserfließzeiten für diese Regionen unbedingt zu berücksichtigen.

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

In Zusammenhang mit der Verwendung des WEKU-Verfahrens zur Fließzeitenermittlung in Festgesteinsregionen darf nicht unerwähnt bleiben, dass sich die Bandbreiten der Durchlässigkeitsbeiwerte für den oberen Aquifer auf das unverwitterte Gestein beziehen, obwohl der überwiegende Anteil des Grundwasserabflusses in Festgesteinen in der Auflockerungszone über dem unverwitterten Gestein auftritt. Damit sich die zur Berechnung der Grundwasserfließzeiten verwendeten Durchlässigkeitsbeiwerte auf die Verhältnisse in der Auflockerungszone beziehen, wurden die in hydrogeologischen Kartenwerken angegebenen Bandbreiten der Durchlässigkeitsbeiwerte nach Beratung und Abstimmung mit dem LANUV und dem GD NRW um 1 Größenordnung erhöht.

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

## **5 Datengrundlagen für die Verweil- und Fließzeitenmodellierung**

Die Datengrundlagen der in Kap. 3 und Kap. 4 beschriebenen Verfahren werden in diesem Kapitel gemeinsam beschrieben, da eine Reihe der Parameter für die ungesättigte Zone bzw. den Grundwasserraum der gleichen Datengrundlage entstammen.

### **5.1 Bodenkundliche Datengrundlagen**

Maßgebliche bodenkundliche Datengrundlage ist die Bodenkarte 1:50000 (BK 50). Die BK 50 liegt landesweit flächendeckend vor und wurde als gesamtes Kartenwerk einheitlich digital aufbereitet. Sie gibt bei ausreichender Genauigkeit einen vergleichenden Überblick über die Böden des Landes und deren regionale Bedeutung. Diese Bodenübersichtskarte ist durch flächendeckende Kartierung entstanden.

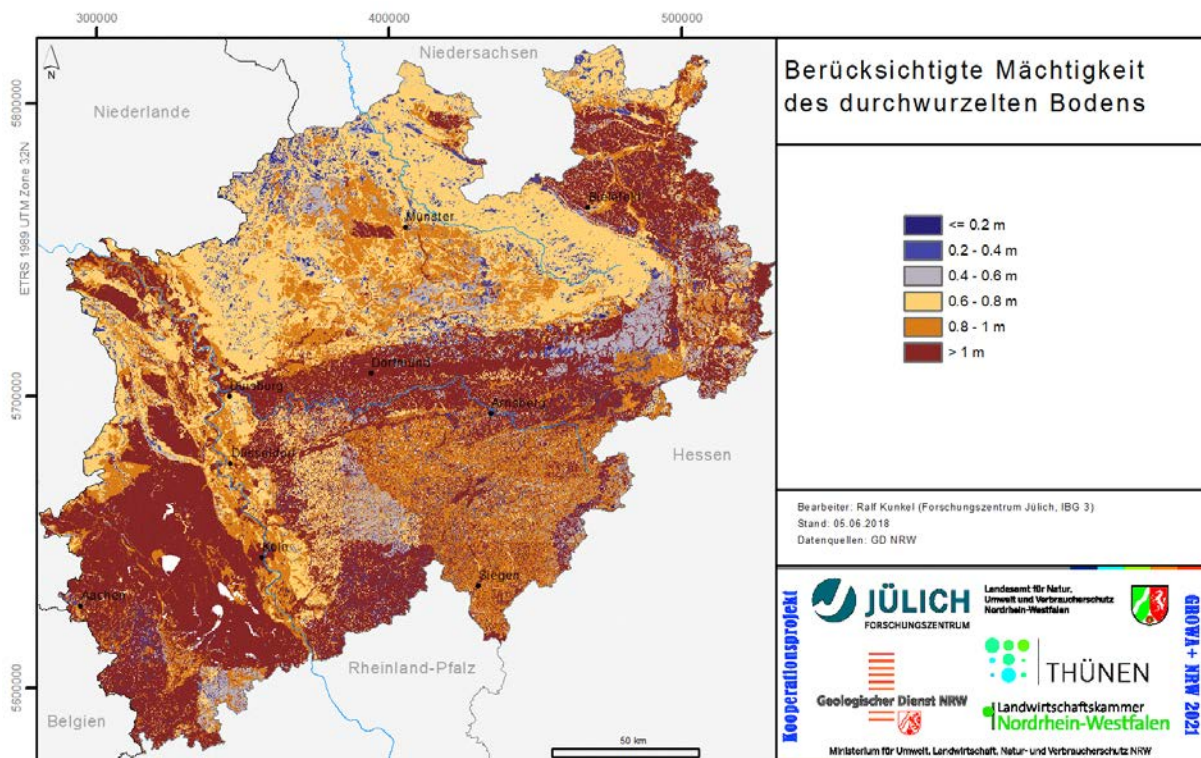
Kartographisch wird der Bodenaufbau durch Bodeneinheiten beschrieben, die Böden gleichartiger oder ähnlicher Entwicklung sowie mit vergleichbarem Substrataufbau erfasst. Für die erfasste Bodenartenschichtung werden integrativ quantifizierte Angaben zu Schichtmächtigkeiten, Korngrößenzusammensetzung und Humusgehalt gemacht, sodass eine Berechnung bodenhydrologischer Parameter möglich wird.

Entsprechend den Beschreibungen in Kap. 3.2 zur Verweilzeitenermittlung im durchwurzelten Boden und in Kap. 3.3.1 zur Verweilzeitenermittlung im Boden unterhalb der Wurzelzone bis in eine Tiefe von zwei Metern, gehen unterschiedliche bodenkundliche Datengrundlagen in die Verweilzeitenmodellierung im Boden ein.

#### **5.1.1 Bodenkundliche Datengrundlagen des durchwurzelten Bodenbereichs**

Zur räumlichen Differenzierung der Landnutzung wird der ATKIS DLM 25 Datensatz (Landesvermessungsamt NRW) genutzt. Die Berechnung der nutzbaren Feldkapazität findet getrennt für jede Landnutzungskategorie statt, wobei von einer maximalen Durchwurzelungstiefe bei Ackerland von 10 dm, bei Grünland von 8 dm und bei Wald von 12 dm ausgegangen wird. In den Fällen, wo die Durchwurzelung durch die Bodeneigenschaften begrenzt wird (niedriger Grundwasserflurabstand, geringe Bodenmächtigkeit etc.), fällt die Durchwurzelungstiefe entsprechend niedriger aus. Aus Abbildung 5-2 geht die nach diesem Verfahren ermittelte effektive Durchwurzelungstiefe hervor.

Abb. 5-1 zeigt die maximale Tiefe unter der Geländeoberfläche, für die Angaben zum durchwurzelten Bereich des Bodens in der BK 50 vorhanden sind. Es wird ersichtlich, dass die durchwurzelte Bodenzone im Festgesteinsbereich nur selten (im Südwestteil NRWs) bis in größere Tiefen als 1m reicht. In den Bördelandschaften der Köln-Aachener Bucht und der Soester Börde liegt die Durchwurzelungstiefe typischerweise bei > 1 Meter. Im Münsterland, entlang des Rheins und am Niederrhein liegt die Wurzelzone aufgrund hoher Grundwasserflurabstände bzw. des Einflusses von Dränagen bei weniger als 0,8 Meter.



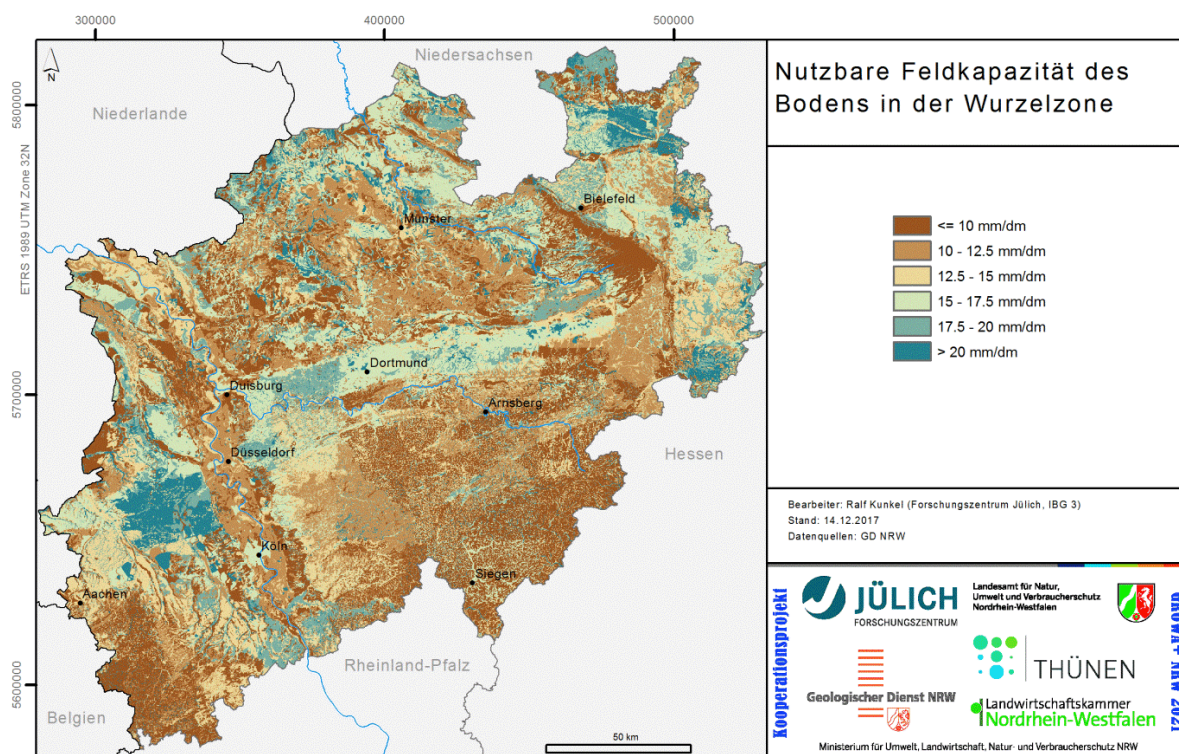
**Abb. 5-1:** Berücksichtigte Mächtigkeit des durchwurzelten Bodens

Die nutzbare Feldkapazität ist der Teil der Feldkapazität, der für die Vegetation erreichbar ist und im Boden in den Mittelporen mit Saugspannungen zwischen den pF-Werten 1,8 und 4,2 gespeichert wird. Sie errechnet sich je Bodenartenschicht aus dem Anteil der Bodenarten bei mittlerer Lagerungsdichte, korrigiert durch volumenprozentuale Abschläge für den Skelettanteil (ohne nutzbare Feldkapazität) bzw. durch Zuschläge für die Humusgehalte.

Die nutzbare Feldkapazität (Abb. 5-2) ist bei grundwasser- und staunässefreien Böden das wesentliche Maß für die pflanzenverfügbare Bodenwassermenge und macht einen großen Anteil der Bodenfruchtbarkeit und damit der Ertragssicherheit aus.

Die Regionen mit Böden hoher nutzbarer Feldkapazität sind in Nordrhein-Westfalen mit dem Vorkommen von Löss verbunden. Verbreitete Lössgebiete befinden sich in der Niederrheinischen Bucht und vereinzelt im Niederrheinischen Tiefland, wobei die Jülicher Börde mit einer großräumig mittleren nutzbaren Feldkapazität von über 200 mm deutlich hervorragt.





**Abb. 5-2:** Nutzbare Feldkapazität in der Wurzelzone

Des Weiteren weisen die Lößgebiete entlang der nördlichen Abdachung des Rheinischen Schiefergebirges (Hellwegbörden, Westenhellweg, Bergisch-Sauerländisches Unterland) sowie die Region nördlich des Teutoburger Waldes (Lübbecker Lößland, Ravensberger Hügelland, Lipper Bergland) hohe Werte auf.

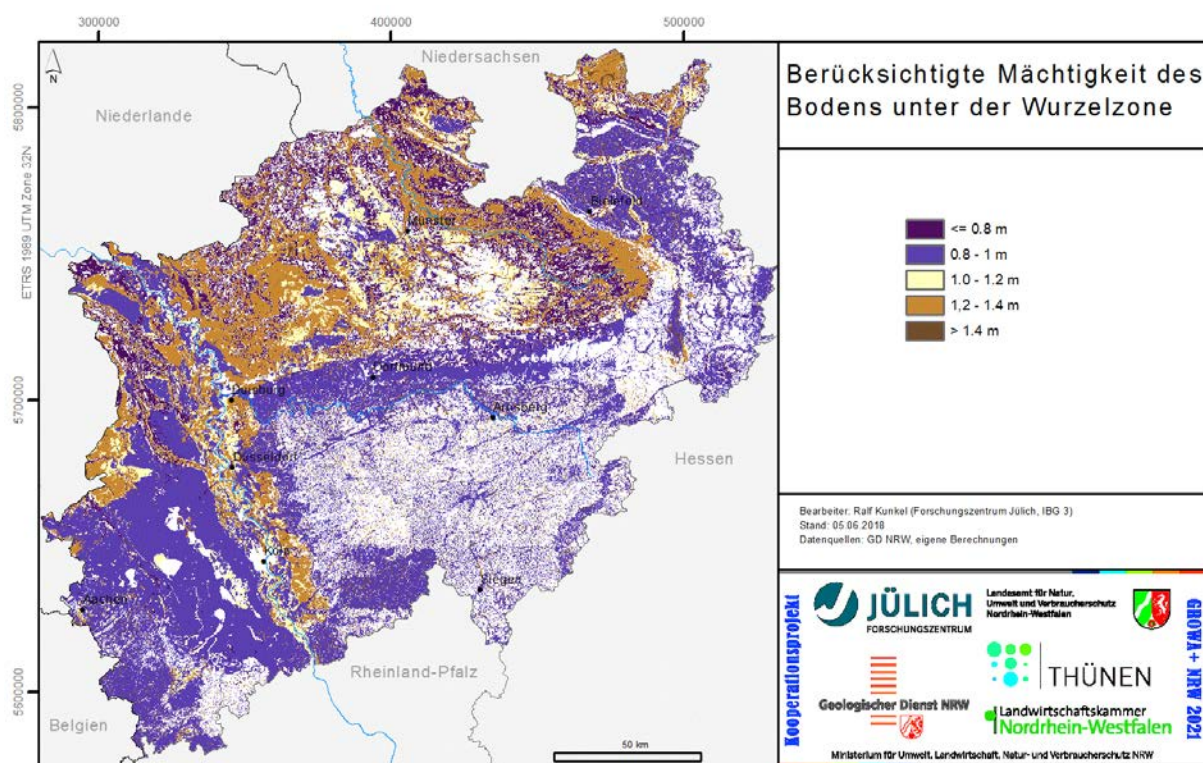
Deutlich geringere nutzbare Feldkapazitäten weisen die Mittelgebirgsregionen des Rheinischen Schiefergebirges sowie weite Teile der Westfälischen Bucht auf, wobei das Ostmünsterland mit einer mittleren nutzbaren Feldkapazität von unter 10 mm/dm die Böden mit den geringsten Feldkapazitäten aufweist.

### 5.1.2 Bodenkundliche Daten für den Bereich unterhalb der Wurzelzone

Von Relevanz für die Verweilzeitenmodellierung sind in diesem Zusammenhang Angaben zur Feldkapazität des Bodens unterhalb der Wurzelzone. Wie in Kap. 3.3.1 ausgeführt stellt die BK 50 die beste Datengrundlage mit Angaben zur Feldkapazität für diesen Tiefenbereich dar. Jedoch ist die Mächtigkeit des Bodens unter der Wurzelzone, für die Angaben zur Feldkapazität in den Profilbeschreibungen der BK 50 vorhanden sind, begrenzt (siehe Abb. 5-3).

Angaben zur Feldkapazität für den Bereich unterhalb der Wurzelzone aus der BK 50 treten für Mächtigkeiten über 1,2 m gehäuft in der Lockergesteinsregion auf, vor allem im Münsterland und am Niederrhein. In den Bördelandschaften (Köln-Aachener Bucht, Soester Börde) sowie in den Tälern des Festgesteinsbereichs liegen Angaben zur Feldkapazität für Mächtigkeiten zwischen 0,8 und 1 Meter vor. Dort, wo in Abb. 5-3 weiße Flächen ausgewiesen sind, liegen unter der Wurzelzone entweder bereits grundwassernahe Verhältnisse vor (Lockergesteins-

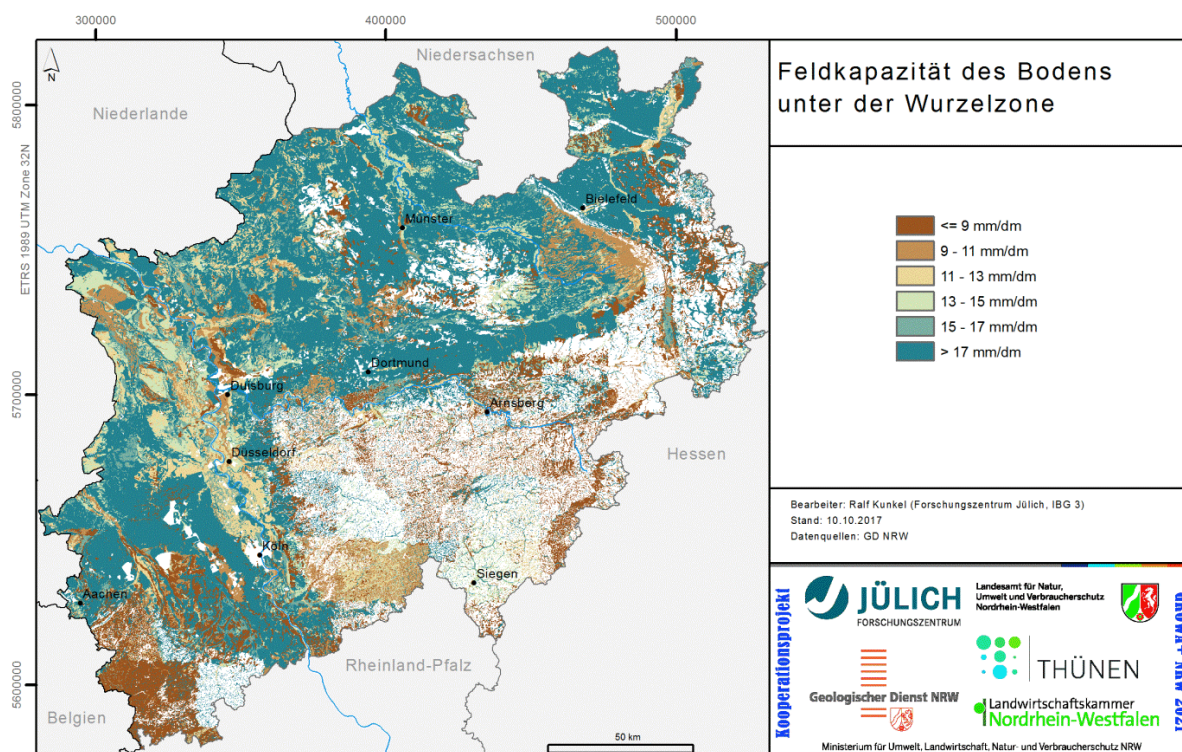
bereich), oder aber das Festgestein schließt sich direkt unterhalb der Bodenzone an. Dementsprechend fehlen in der BK für diese Bereiche Angaben zur Feldkapazitäten im Boden unterhalb der Wurzelzone.



**Abb. 5-3:** Berücksichtigte Mächtigkeit des Bodens unter der Wurzelzone nach BK 50

Abb. 5-4 zeigt die Feldkapazitätswerte, die in der BK 50 für den Bereich unterhalb der Wurzelzone ausgewiesen sind. Die Regionen mit Böden von Feldkapazitäten von mehr als 17 mm/dm unterhalb der Wurzelzone sind in NRW größtenteils mit dem Vorkommen von Lehm Böden verbunden. Verbreitet finden sich diese Gebiete in der Köln-Aachener Bucht, im Münsterland und nördlich des Wiehengebirges. Deutlich geringere Feldkapazitäten von weniger als 9 mm/dm weisen die Bodenbereiche unterhalb der Wurzelzone in den Mittelgebirgsregionen des Rheinischen Schiefergebirges auf. Jedoch steht das Festgestein dort verbreitet direkt unterhalb der Bodenzone an, so dass in der BK 50 keine Feldkapazitäten ausgewiesen sind. Auch für grundwassernahe Bereiche, bei denen die Grundwasseroberfläche die Bodenzone in die Tiefe begrenzt, wurden in der BK 50 keine Feldkapazitäten des Bodens unterhalb der Wurzelzone ausgewiesen.





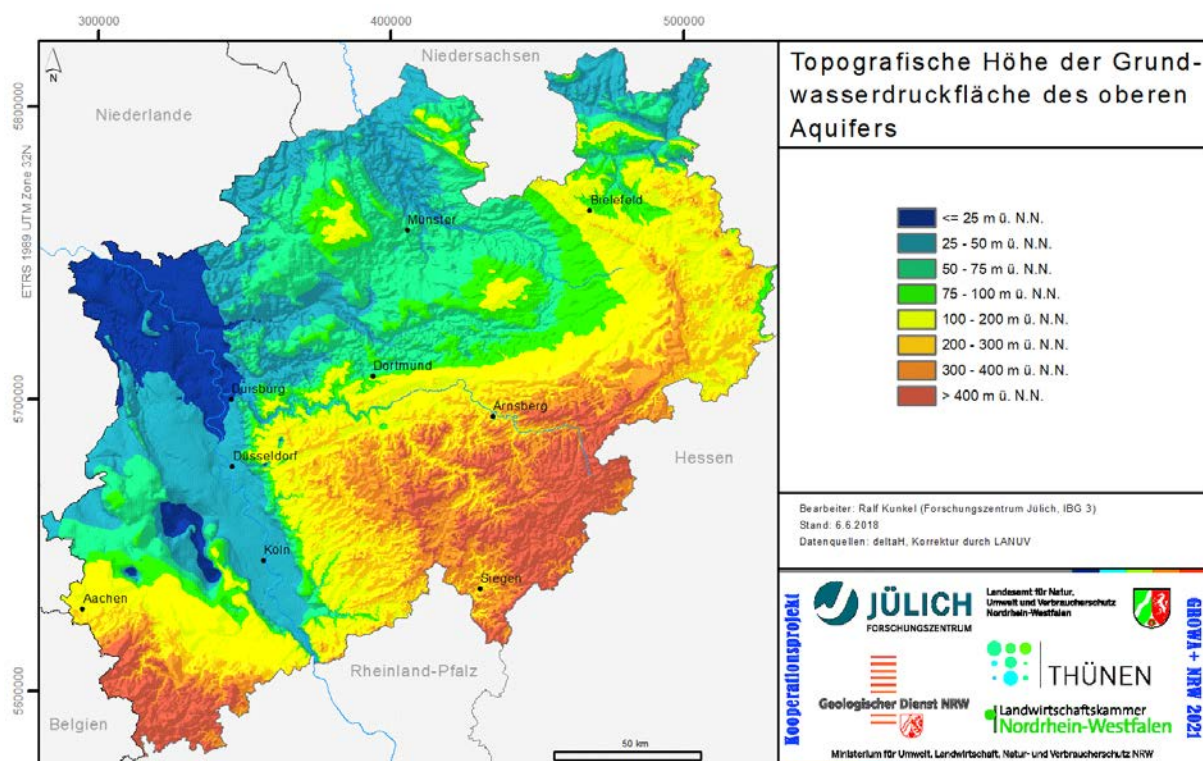
**Abb. 5-4:** Feldkapazität des Bodens unterhalb der Wurzelzone nach BK 50

## 5.2 Modell der Grundwasseroberfläche

Ein digitales Höhenmodell der Grundwasseroberfläche ist zum einen eine unabdingbare Voraussetzung für die Bestimmung der vertikalen Fließstrecke und der Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone. Zum anderen wird die Grundwasseroberfläche zur Berechnung der Grundwasserfließzeiten benötigt. Bei der flächenhaften Fließzeitenmodellierung mit dem WEKU-Modell dient sie bei der Modellierung der Abstandsgeschwindigkeiten des Grundwassers zur Ableitung der hydraulischen Gradienten und bei der Modellierung der Grundwasserverweilzeiten zur Ausweisung der wirksamen Vorfluter und Fließrichtungen bzw. lateralen Fließstrecken des Grundwassers, vgl. Kap. 4.1. Bei der punktbezogenen Fließzeitenmodellierung basierend auf dem Teufe-Neubildungsverfahren bestimmt sie maßgeblich die Fließstrecke und die Fließzeit des Grundwassers zwischen dem Ort der Neubildung für die Filteroberkante bzw. der Filterunterkante und einem Bezugspunkt (z.B. einer Messstelle).

Die delta h Ingenieurgesellschaft mbH hat im Rahmen des Projektes GROWA+ - NRW 2021 ein landesweites zweidimensionales stationäres Grundwassermodell aufgebaut (König & König, 2017). In diesem Zusammenhang wurde ein digitales Modell der Grundwasseroberfläche für die Gesamtfläche des Landes NRW erstellt, welches sowohl die Lockergesteins-, als auch die Festgesteinsgebiete in NRW abdeckt.

Eine detaillierte Beschreibung der Methodik zur Ableitung des digitalen Geländemodells der Grundwasseroberfläche sowie der hierzu verwendeten Datengrundlagen ist in einem separaten Bericht von König & König (2017) beschrieben. An dieser Stelle soll daher nicht weiter darauf eingegangen werden. Als Ergebnis sei an dieser Stelle aber das in Abbildung 5-5 dargestellte digitale Geländemodell der Grundwasseroberfläche aufgeführt.



**Abb. 5-5:** Digitales Modell der Grundwasseroberfläche NRW (König & König, 2017)

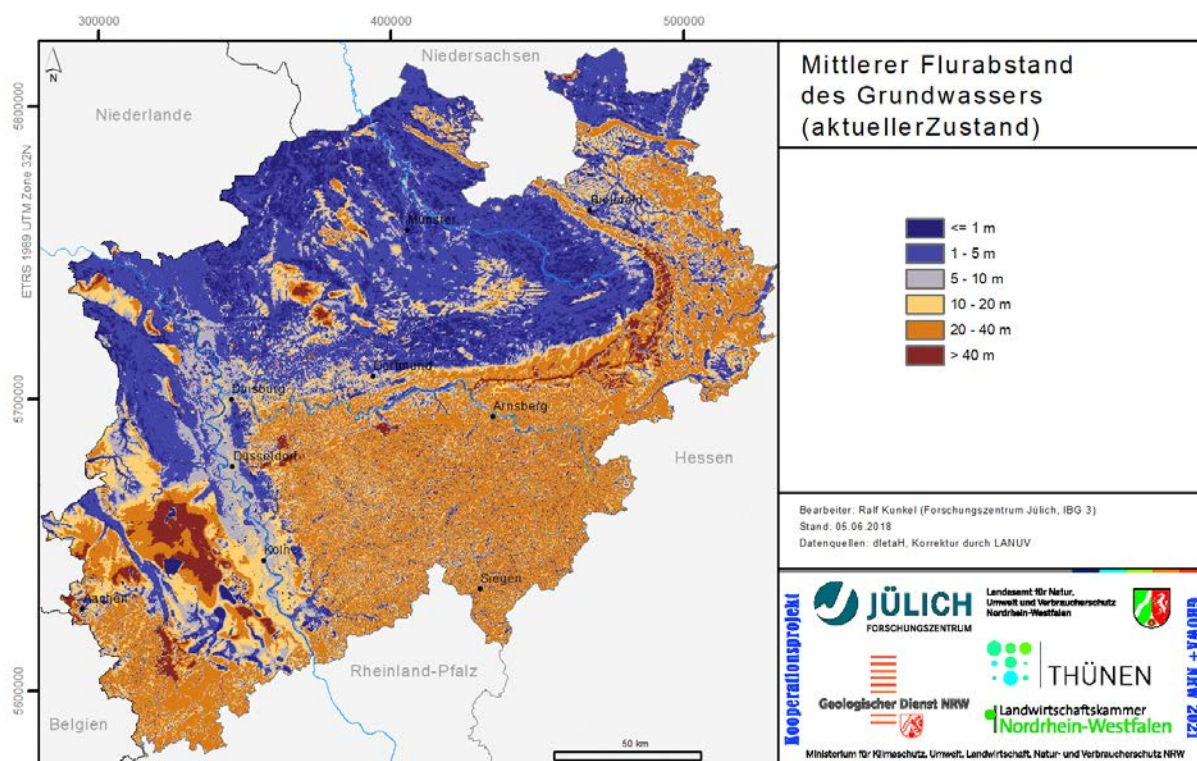
Deutlich erkennbar ist eine Korrelation der topografischen Höhen der Grundwasserdruckfläche mit der Topografie. Die Grundwasseroberfläche befindet sich zwischen weniger als 25 m über N.N. in den Lockergesteinsbereichen (Niederrhein) und über 400 m über N.N. in den Festgesteinsbereichen von Eifel, Rothaargebirge und Sauerland.

### 5.2.1 Grundwasserflurabstand

Der Flurabstand (siehe Abb. 5-6) wird formal als Differenz zwischen der Geländeoberfläche und der Grundwasseroberfläche berechnet und ist die Größe, welche die Mächtigkeit der Sickerstrecke in der ungesättigten Zone charakterisiert. Durch sie wird daher in hohem Maße die Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone bestimmt.

Bei der Berechnung des Grundwasserflurabstandes ist zu beachten, dass die erzielbare Genauigkeit in der Größenordnung von 1-2 Metern, in den Festgesteinsbereichen auch deutlich schlechter, liegt. Dies folgt direkt aus den Unsicherheiten in den zugrundeliegenden Datengrundlagen, speziell dem digitalen Modell der Grundwasseroberfläche (siehe Abb. 5-5). Insbesondere in den grundwasserbeeinflussten Gebieten mit geringen Flurabständen im Münsterland und am Niederrhein sowie in den Flusstälern der Mittelgebirge, kann es dadurch zu negativen Flurabständen und Inkonsistenzen zu anderen Datengrundlagen, z.B. zu den in der BK 50 ausgewiesenen Grundwasserbeeinflussung von Böden, kommen. Bei negativen Flurabständen wurde deshalb ein Flurabstand von 0 m angesetzt.





**Abb. 5-6:** Flurabstand des Grundwassers

Im Festgesteinsbereich treten bedingt durch im  $\Delta h$  – Modell der Grundwasseroberfläche ausgewiesene geringe Höhen der Grundwasserdrukfläche zum Teil Bereiche mit sehr hohen Flurabständen ( $> 40$  m) auf. Diese wurden vom LANUV nachträglich korrigiert. Hierzu wurden innerhalb der Korrekturgebiete Flurabstände  $> 30$  m auf 30 m gekappt. Um Sprünge zu vermeiden wurde bei der Abgrenzung der Gebiete, für die Korrekturen durchgeführt wurden, darauf geachtet, dass die Grenzen keine zusammenhängenden Gebiete mit Flurabständen  $> 30$  m schneiden. Die GW-Oberfläche wurde dann durch Subtraktion der 30 m von der Geländeoberfläche (DGM 100) berechnet. Im Ergebnis zeichnet die GW-Oberfläche innerhalb der Korrekturgebiete dadurch ab Flurabständen  $> 30$  m die Geländeoberfläche nach und ist entsprechend „unruhiger“. Für einige Gebiete im Festgestein wurde keine Korrektur der Grundwasseroberfläche vorgenommen:

- Halterner Sande sowie Kalksteine bzw. Kalk- und Kalkmergelsteine der Kreide innerhalb des Münsterlandes mit meist hohen bis mittleren Durchlässigkeiten. In diesen Gebieten sind nur inselartig hohe Flurabstände vorhanden die z.T. auch durch Wasserstandsmessungen gestützt werden.
- Kalksteine bzw. Kalk- und Kalkmergelsteine der Kreide im Bereich Östlicher Haarstrang, Paderborner Hochfläche, Östlicher Teutoburger Wald. Diese Gesteine weisen hier großflächig hohe Durchlässigkeitsklassen (II und III) auf. Hohe Flurabstände sind hier aufgrund der hohen Durchlässigkeiten sowie der z.T. kleinräumig großen Reliefunterschiede plausibel und sollten aufgrund der hohen Durchlässigkeiten auch keine großen Verweilzeiten verursachen.
- Sandstein, Ton- und Schluffstein der Trias im Bereich der Mechernicher Triasbucht mit mittleren Durchlässigkeiten sowie östlich angrenzende Gebiete im Devon. Im Bereich

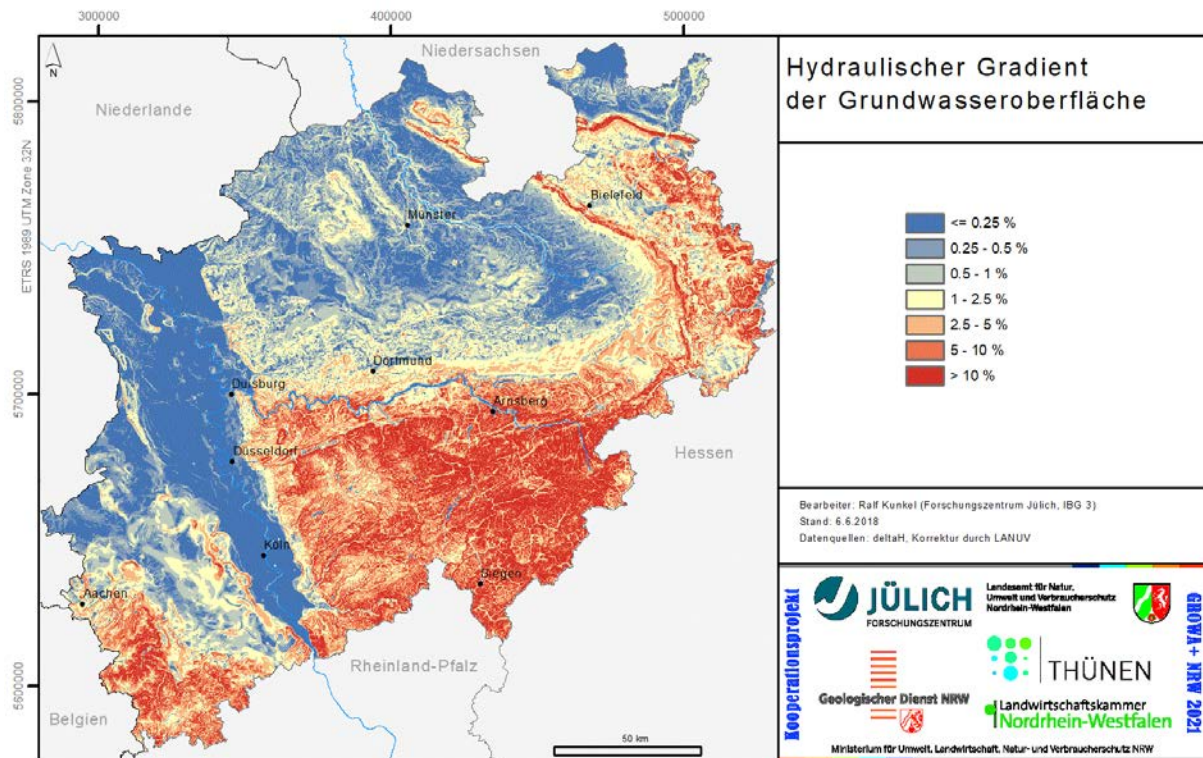
der Sandsteine sind die hohen Flurabstände plausibel und werden auch durch Wasserstandsmessungen gestützt. Die angrenzenden Gebiete im Devon wurden ebenfalls herausgenommen, um Sprünge an Grenzen zu vermeiden.

- Fein- bis Mittelsande bzw. Kalksteine der Kreide mit mittleren bis hohen Durchlässigkeiten im Bereich Aachen.
- Gebiete im GW-Absenkungen aufgrund des Kalksteinabbaus im Bereich Hagen sowie östlich von Düsseldorf / nordwestlich von Wuppertal. Die hohen Flurabstände sind hier durch künstliche Absenkung bedingt. Eine Korrektur würde hier zu sehr unplausiblen GW-Höhen führen.

### **5.2.2 Hydraulischer Gradient**

Während die Fließstrecken des Grundwassers im oberen Aquifer durch die Fließrichtungen und grundwasserwirksamen Vorfluter vollständig bestimmt sind, werden zur Berechnung der Grundwasserfließzeiten, insbesondere zur Bestimmung der Abstandsgeschwindigkeiten, zusätzliche Informationen hinsichtlich des hydraulischen Gradienten der Grundwasseroberfläche (Abbildung 5-7) benötigt. Der hydraulische Gradient wird direkt aus dem Höhenmodell der Grundwasseroberfläche abgeleitet und ergibt sich aus dem größten Höhenunterschied zwischen der jeweils betrachteten und den acht benachbarten Zellen.

Die berechneten hydraulischen Gradienten umfassen einen Bereich von weniger als 0.25% und mehr als 10%. Insbesondere in den Festgesteinsregionen sind die Gradienten häufig an das Relief der Landschaft gebunden. Dementsprechend sind dort hohe Werte von 5% und mehr keine Seltenheit. Besonders hohe Gefällswerte treten da auf, wo der Grundwasserabstrom auf tief eingeschnittene Vorfluter ausgerichtet ist. In den Lockergesteinsregionen sind die hydraulischen Gradienten deutlich geringer als in den Festgesteinsgebieten und liegen in der Regel bei weniger als 1%. In der Köln-Aachener Bucht sind höhere Werte weit verbreitet, welche eine Folge der Sumpfungsmaßnahmen im Bereich der Braunkohletagebaue sind.



**Abb. 5-7:** Hydraulischer Gradient der Grundwasseroberfläche

### 5.2.3 Grundwasserwirksame Vorfluter und Fließstrecke

Bei der Analyse der Fließzeiten des Grundwassers im oberen Aquifer wird die gesamte Fließstrecke betrachtet, die das Grundwasser von der Einsickerung in den oberen Aquifer bis zum Austritt in den jeweiligen grundwasserwirksamen Vorfluter zurücklegt. Dazu ist es notwendig, den lateralen Wassertransport im Aquifer nachzubilden. Das digitale Höhenmodell der Grundwasseroberfläche ist auch hierzu die zentrale Grundlage, da aus ihm für jede Rasterzelle über die hydraulischen Gradienten die Fließstrecken (Abb. 5-8) bis zum jeweiligen grundwasserwirksamen Vorfluter (Abb. 5-9) direkt bestimmt werden können. In Abstimmung mit dem LANUV wurden alle Gewässerflächen des DLM 25 als grundwasserwirksame Vorfluter angenommen sowie die im DLM 25 ausgewiesenen Tagebauflächen.



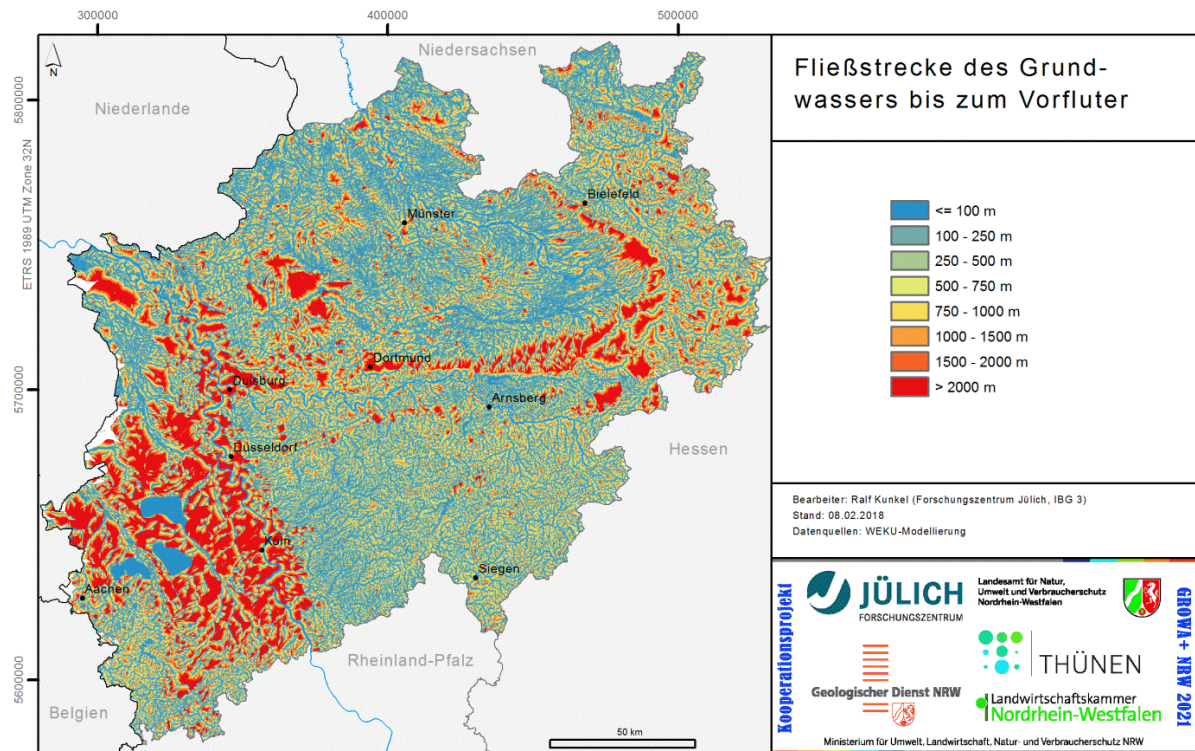


Abb. 5-8: Fließstrecken des Grundwassers bis zum Vorfluter

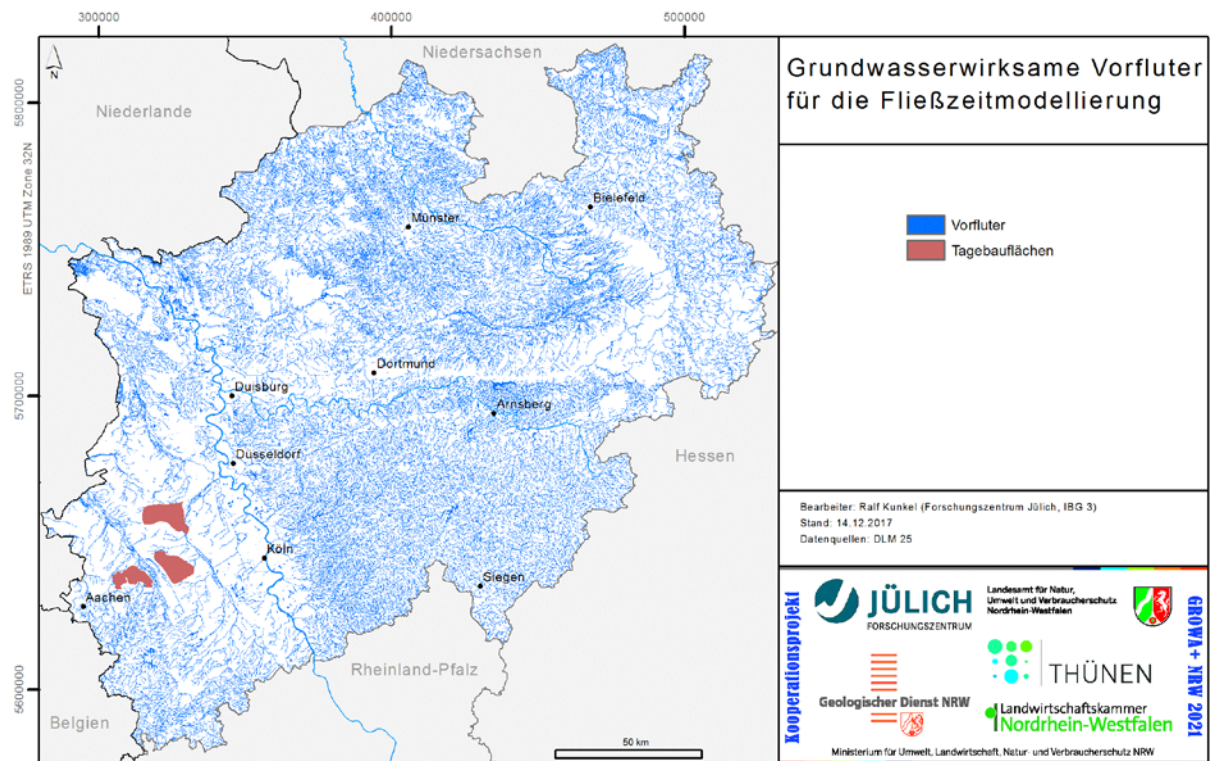


Abb. 5-9: Grundwasserwirksame Vorfluter



## 5.3 Hydrogeologische Datengrundlagen

Hydrogeologische Daten werden für die Ermittlung der Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten benötigt. Außerdem sind für die Modellierung der Fließzeiten im Grundwasser hydrogeologische Parameter des Grundwasserleiters unabdingbar. Aufgrund der Prämisse, dass die jeweils detailliertesten bzw. aktuellsten Daten in das Projekt einfließen sollen, wurde es nötig, neue hydrogeologische Datensätze zu erstellen.

Im Verlauf des Projektes wurde vom Geologischen Dienst NRW eine neue Hydrogeologische Karte erstellt, ebenfalls wurde ein Datensatz „Bindige Deckschichten“ im grundwasserfreien Raum erarbeitet. Zusätzlich wurden für die Lockergesteinsbereiche die Basis, sowie die Mächtigkeit des Grundwasserleiters modelliert.

### 5.3.1. Beschreibung der neu erstellten hydrogeologischen Datensätze

#### 5.3.1.1 Erstellung des Themas Hydrogeologische Karte NRW (HK NRW)

Die Hydrogeologische Karte NRW stellt den Oberen (relevanten) Grundwasserleiter dar. Kleinkläumige oder schwebende Grundwasserleiter werden dabei nicht berücksichtigt. Die Karte wurde aus den bestehenden Informationssystemen generiert, welche im Folgenden kurz beschrieben werden.

In NRW existieren verschiedene digitale Hydrogeologische Kartenwerke. Sie unterscheiden sich im verwendeten Maßstab, in der Methodik, sowie in der regionalen Abdeckung. Landesweit blattschnittfrei vorhanden ist das Informationssystem Hydrogeologische Karte 1:100.000 (IS HK100). Das IS HK100 stellt den Oberen (Haupt-) Grundwasserleiter dar. Beschrieben werden relevante hydrogeologische Eigenschaften wie z.B. Durchlässigkeit, Petrographie und Hohlraumart. Ein weiteres Thema stellt die Verbreitung und Eigenschaften von bindigen Deckschichten dar. Angaben über Mächtigkeiten sind in diesem Kartenwerk nicht enthalten.

In größeren Bereichen des Münsterlandes, sowie Ostwestfalens liegt die Hydrogeologische Karte 1:50.000 (HK50) vor. Dieses Kartenwerk wurde in den letzten Jahrzehnten je nach Erstellungsphase analog oder digital erstellt. In den letzten Jahren wurden auch die analogen Karten aufbereitet und in das Informationssystem IS HK50 eingestellt. Neben den Eigenschaften der Grundwasserleiter und -geringleiter liegen zahlreiche weitere Themen, wie z.B. Mächtigkeiten der GW-Leiter vor. Aufgrund der verschiedenen Bearbeitungsphasen der einzelnen Blätter treten stellenweise Unterschiede an den Blatträndern auf.

Das Kartenwerk der Hydrologischen Karte 1:25.000 (HyK25) deckt das Rheinland inklusiv seiner Umrandung ab. Diese Karten wurden durch die RWTH Aachen ab 1961 bis ins Jahre 2003, fast ausschließlich analog, erstellt. Herausgeber ist das LANUV NRW. Eine Digitalisierung erfolgte durch den Geologischen Dienst NRW in den letzten Jahren, so dass nun ebenfalls ein Informationssystem IS HyK25 vorliegt.

Für die Erstellung des neuen Datensatzes Hydrogeologische Karte NRW (HK NRW) wurden die verschiedenen Informationssysteme aggregiert. In Gebieten, in denen das IS HK50 vorliegt, wurde das IS HK100 durch Daten des IS HK50 ersetzt. Unstimmigkeiten an den Randbereichen wurden nach geologischen Kriterien behoben und angepasst. Gebiete des IS HyK25 wurden nur in solchen Bereichen eingebaut, in denen es geologisch plausibel und sinnvoll erschien.

Der neu erstellte Datensatz Hydrogeologische Karte NRW (HK NRW) beschreibt den Oberen Grundwasserleiter mit den Attributen Stratigraphie, Petrographie und Durchlässigkeit. Mit diesem Datensatz liegt nun eine Hydrogeologische Karte vor, die landesweit blattschnittfrei die bestmöglichen Daten liefert. Für die Ermittlung der Fließ- und Verweilzeiten wurden weitere benötigte Parameter wie z.B. Feldkapazität und Strukturfaktor mit diesem Datensatz verknüpft.

### **5.3.1.2 Erstellung des Themas „Bindige Deckschichten“**

Um die Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten besser quantifizieren zu können, ist eine möglichst genaue Kenntnis über den lithologischen Aufbau dieser Deckschichten nötig. Unter „Bindigen Deckschichten“ versteht man dabei geologische Einheiten, die überwiegend tonig-schluffig (bindig) ausgebildet sind und den Oberen Grundwasserleiter überlagern. Typische Beispiele in NRW sind hierfür Löss, Auenlehm, Hochflutlehm, sowie Grundmoräne. Häufig treten diese Einheiten direkt unterhalb des Bodens auf, jedoch gibt es auch Bereiche, in denen die bindigen Deckschichten von sandigen Schichten überlagert werden (z.B. glaziale Sande über Grundmoräne).

Das neu erstellte Thema „Bindige Deckschichten“ enthält Informationen über die Verbreitung, die Gesteinseigenschaften und die Mächtigkeit von bindigen geologischen Einheiten in der Grundwasserüberdeckung. Da die oberen 2 Meter durch die Informationen aus der BK50 abgedeckt werden, wurden in einem ersten Schritt die Bereiche ausgeschlossen, in denen der Flurabstand kleiner 2 m ist. Dadurch konnte der zu bearbeitende Bereich deutlich verringert werden. Viele, an der Geländeoberfläche anstehende, geologisch junge Einheiten wie z.B. Hochflutlehm und Auenlehm mussten dadurch nicht berücksichtigt werden. Eine Auswertung der Daten zeigt, dass nur Lössablagerungen und Grundmoräne in großflächigeren Verbreitungen bei ausreichenden Mächtigkeiten auftreten.

Unter Einbeziehung von zahlreichen verschiedenen Datenbeständen wie z.B. Geologischen & Hydrogeologischen Kartenwerken, geologischen Schnitten, der GD-eigenen Bohrungsdatenbank DABO, sowie vorhandenen geologischen Modellen konnten die Verbreitungen der bindigen Einheiten erstellt und die Tiefenlage der Basis sowie der Oberfläche modelliert werden. Die Oberfläche wurde dabei auf max. -2 m unter GOK gesetzt, da dieser Bereich durch die BK50 abgedeckt wird. Durch Verschneidung mit der Grundwasseroberfläche wurde anschließend die Mächtigkeit der bindigen Deckschicht in den Grundwasserdeckschichten ermittelt und als Rasterdatensatz bereitgestellt.

### **5.3.1.3 Erstellung des Themas „Tiefenlage/Mächtigkeit Grundwasserleiter“**

Für die Modellierung der Fließzeiten im Grundwasser ist die Kenntnis der Tiefenlage des Grundwasserleiters, bzw. die daraus abzuleitende grundwassererfüllte Mächtigkeit, von großer Bedeutung. Aus diesem Grund wurde für die Lockergesteinsbereiche die Basis des Oberen Grundwasserleiters modelliert. Die Datengrundlage bildeten dabei bestehende regionale Modelle, sowie die GD-eigene Bohrungsdatenbank. Für Festgesteine in NRW kann eine sinnvolle Ermittlung der Basis in der Regel nicht durchgeführt werden, da die Datenlage hierfür nicht ausreichend ist. Durch Verschneidung mit der Grundwasseroberfläche wurde die grundwassererfüllte Mächtigkeit des Grundwasserleiters berechnet und ebenfalls als Rasterdatensatz bereitgestellt.

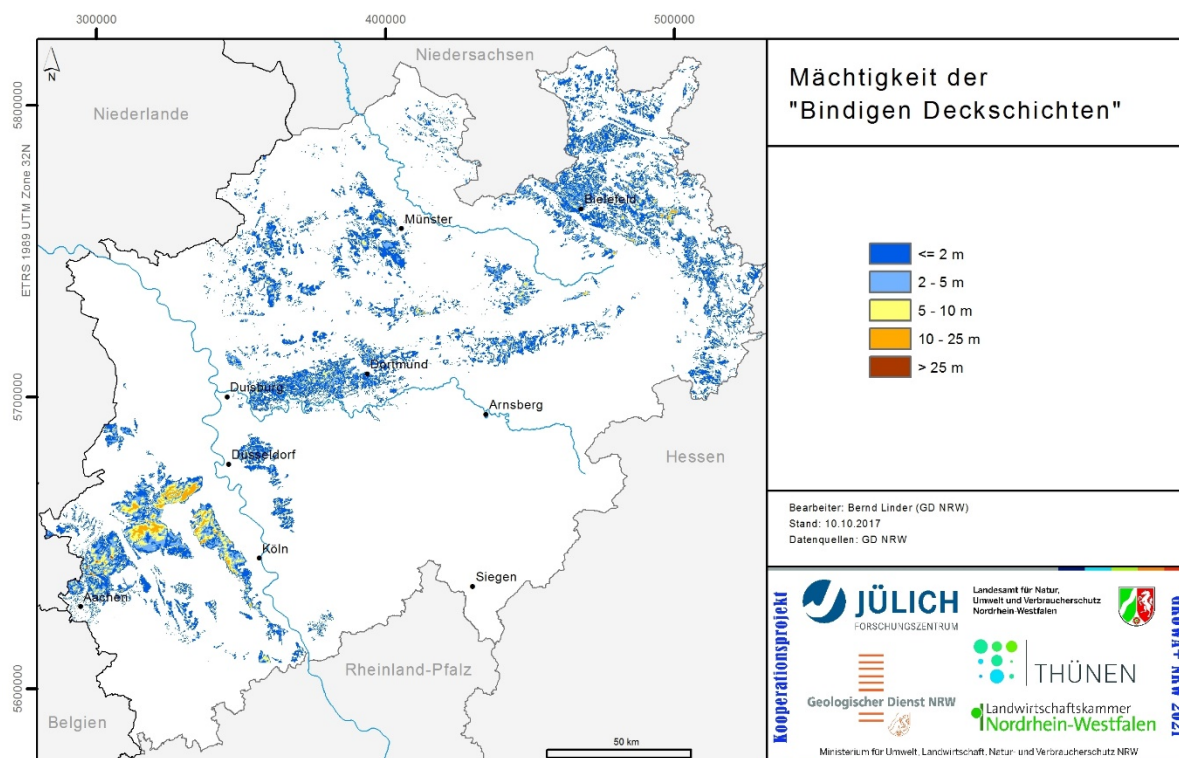
## **5.3.2 Grundwasserdeckschichten im Lockergesteinsbereich**

Wie oben ausgeführt, wurden zur Bewertung der Grundwasserdeckschichten neue Datensätze erstellt. Diese umfassen einerseits das Thema Hydrogeologische Karte NRW, andererseits das Thema „Bindige Deckschichten“.

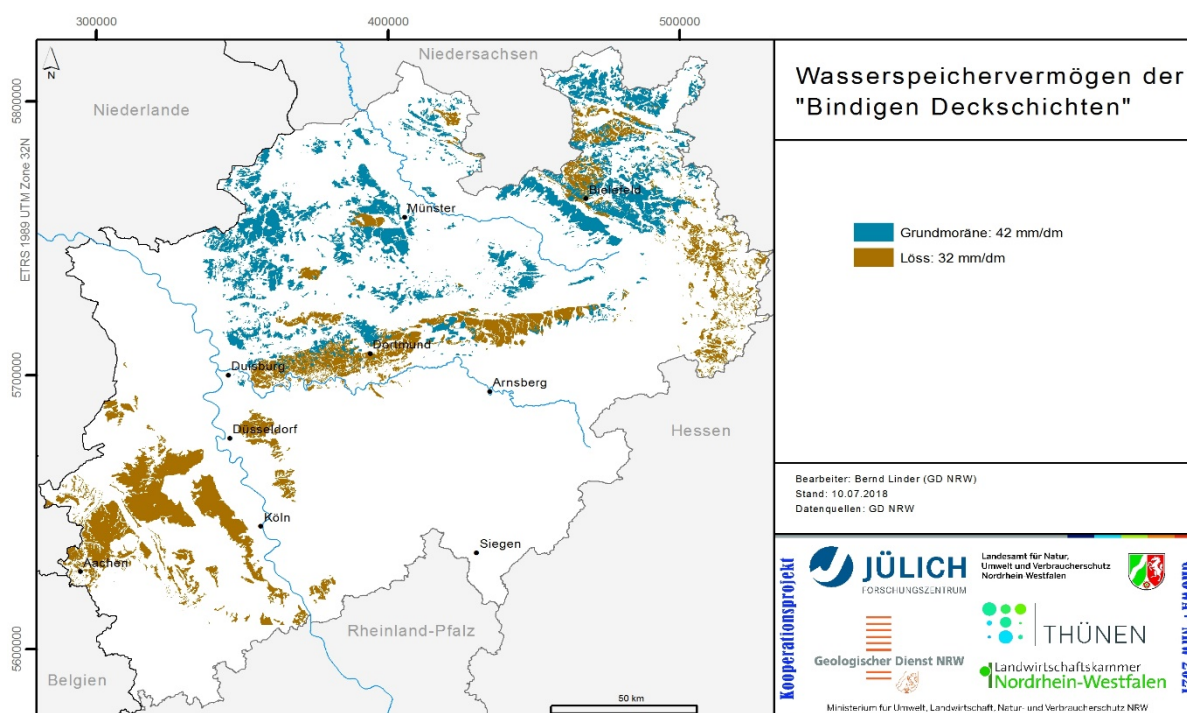
### **5.3.2.1 Mächtigkeit und Wasserspeichervermögen Bindige Deckschichten**

Für die Bereiche NRWs, in denen Bindige Deckschichten in einer größeren Verbreitung und Mächtigkeit auftreten, wurde vom GD NRW das Thema „Bindige Deckschichten“ (siehe Abb. 5-10) erstellt, aus dem Rückschlüsse auf das Wasserspeichervermögen der Deckschichten abgeleitet werden können. Es sei darauf hingewiesen, dass der Datensatz „Bindige Deckschichten“ sich nicht nur auf die Lockergesteinsregion bezieht, sondern zum Teil auch auf die Festgesteinsregion NRWs, z.B. im Bereich der Soester Börde. Es wurde aber bewusst darauf verzichtet, den Datensatz getrennt nach Lockergesteinsregion und Festgesteinsregion darzustellen.

Wie die Abb. 5-10 und 5-11 zeigen, liegen größere Löss-Mächtigkeiten in der Soester Börde, sowie in der Köln-Aachener Bucht vor. Dort erreicht der Löss stellenweise mehr als 25 Meter. Grundmoräne-Vorkommen konzentrieren sich dagegen auf das Münsterland und das Weserbergland. Dargestellt werden die Mächtigkeiten des Löss, sowie der Grundmoräne in den Grundwasserdeckschichten, d.h. die oberen 2 Meter (BK50), sowie der grundwassererfüllte Raum wurden nicht in die Mächtigkeitsberechnung einbezogen. Entsprechend der petrografischen Angaben wurden der Lössüberdeckung in Absprache mit dem GD und dem LANUV Feldkapazitätswerte von  $FK = 32 \text{ mm/dm}$  zugeordnet, während der Grundmoräne Feldkapazitätswerte von  $FK = 42 \text{ mm/dm}$  zugeordnet (siehe Abb. 5-11):



**Abb. 5-10:** Mächtigkeit der Bindigen Deckschichten in der Grundwasserüberdeckung



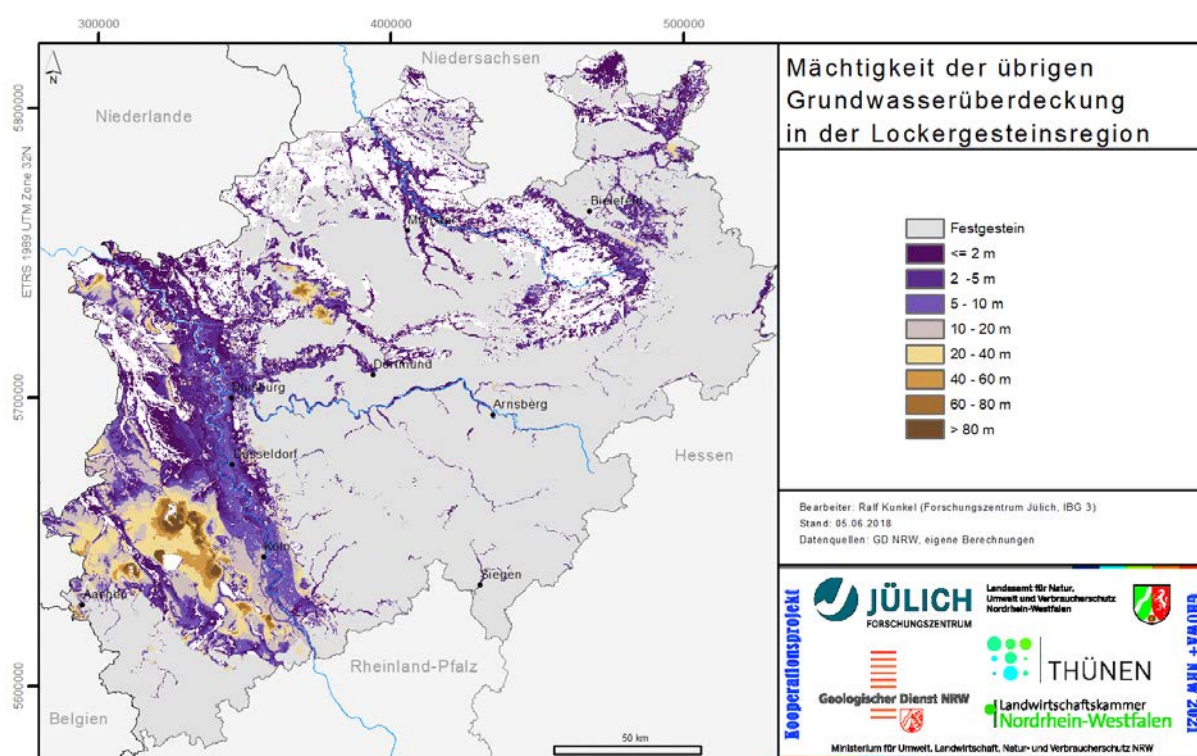
**Abb. 5-11:** Wasserspeichervermögen der Bindigen Deckschichten

Zur Ermittlung der Verweilzeiten wurden diese Werte der Feldkapazität über die gesamte Mächtigkeit der Bindigen Deckschichten angesetzt. Abb. 5-11 zeigt in diesem Zusammenhang, dass Löss vor allem in den Bördelandschaften nördlich der Mittelgebirge (Köln-Aachener

Bucht, Soester Börde, Warburger Börde, Ravensburger Mulde) verbreitet ist, während die Grundmoräne vor allem im Münsterland verbreitet ist

### 5.3.2.2 Mächtigkeit und Wasserspeichervermögen der „übrigen“ Deckschichten im Lockergesteinsbereich

Unter den „übrigen“ Deckschichten im Lockergesteinsbereich sind hier die Regionen und / oder Tiefenbereiche zu verstehen, für die weder in der BK 50, noch im Datensatz Bindige Deckschichten detaillierte Informationen zum Wasserspeichervermögen zur Verfügung stehen (vgl. Abb. 3-2). In diesem Fall wird aus den Schichtbeschreibungen der HK NRW entsprechend der Vorgaben in Tab 3-2 ein Wert der Feldkapazität für die Grundwasserdeckschichten im Lockergesteinsbereich zugeordnet. Abb. 5-11 zeigt die berücksichtigte Mächtigkeit der „übrigen“ Grundwasserüberdeckung.

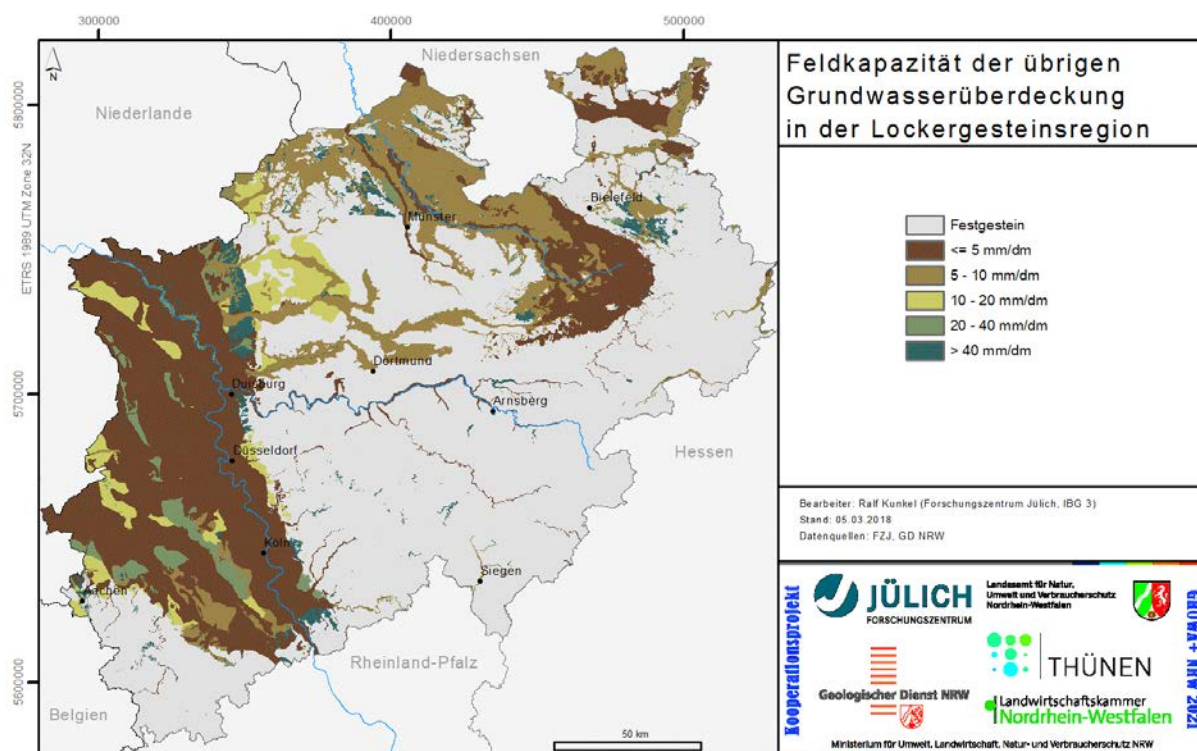


**Abb. 5-11:** Mächtigkeit der „übrigen“ Grundwasserüberdeckung in der Lockergesteinsregion

Es zeigt sich, dass die Mächtigkeit der „übrigen“ Grundwasserüberdeckung in der Lockergesteinsregion in der Regel bei unter 10 Metern liegt. Lediglich in morphologisch erhöhten Gebieten wie z.B. dem Reichswald am Niederrhein, der Haardt im Münsterland oder dem Rheinischen Braunkohlerevier, welches auch noch zusätzlich durch Sumpfungsmaßnahmen beeinflusst ist, kann es zu einer deutlich höheren Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung von bis zu 40 Metern und mehr kommen. Entsprechend lang sind dort ggf. die Sickerstrecken und entsprechend hoch die resultierenden Verweilzeiten.



Abb. 5-12 zeigt die der „übrigen“ Grundwasserüberdeckung in der Lockergesteinsregion zugewiesenen Feldkapazitätswerte nach Tab. 3-2. Da die Deckschichten in der Niederrheinischen Bucht, im östlichen Münsterland sowie nördlich des Weserberglandes vorwiegend aus Sanden und Kiesen bestehen, überwiegen dort Feldkapazitätswerte  $< 5 \text{ mm/dm}$ . Aufgrund der höheren Feinkörnigkeit der Deckschichten im nördlichen Teil des Emseinzugsgebiets treten dort Feldkapazitäten bis  $10 \text{ mm/dm}$  auf. Höhere Feldkapazitäten, d.h. bis  $40 \text{ mm/dm}$  und mehr treten nur vereinzelt auf und kennzeichnen geologische Struktureinheiten wie z.B. tertiäre Tone.



**Abb. 5-12:** Feldkapazität der übrigen Grundwasserüberdeckung in der Lockergesteinsregion

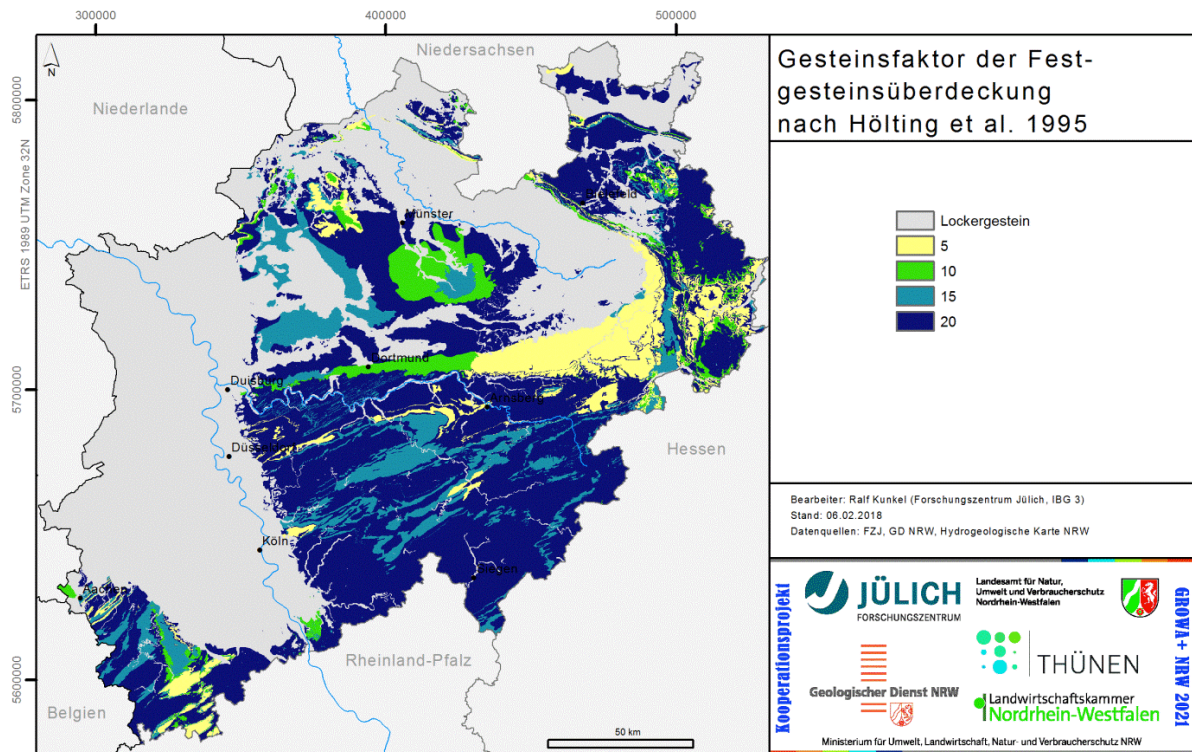
### 5.3.3 Grundwasserdeckschichten im Festgesteinsbereich

Wie bereits in Kap. 3.3.2 ausgeführt, erfolgt der Wassertransport in Festgesteinen überwiegend über Kluftsysteme, welche ganz andere geohydraulische Eigenschaften als Lockergesteine aufweisen, so dass der Berechnungsansatz nach DIN 19732 (siehe Gl. 3-2) nicht angewendet werden kann. Zudem sind die Daten über den Aufbau von Grundwasserdeckschichten in Festgesteinsregionen, aus denen Informationen zum Wasserspeichervermögen abgeleitet werden können, wegen der oftmals geringen wasserwirtschaftlichen Bedeutung der Aquifere eher selten.

Für die Grundwasserdeckschichten von Festgesteinsregionen erfolgt die Berechnung von Verweilzeiten aus diesen Gründen über das Verfahren in Kap. 3.3.2 beschriebene Verfahren nach Hölting et al. (1995) zur Ableitung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. Insbesondere ermöglicht dieses Verfahren eine zumindest grobe Abschätzung der zu erwartenden Verweilzeiten des Sickerwassers in den Grundwasserdeckschichten von Festgesteinsregionen. Im Folgenden sind die zur landesweiten Umsetzung des Verfahrens beschriebenen Datengrundlagen aufgeführt.

### 5.3.3.1 Hölting - Punktwert für die Gesteinsart

Abb. 5-13 zeigt den auf Basis von Tabelle 3-3 (links) vom GD NRW aus den Angaben in der HK NRW zur Petrografie und Stratigrafie abgeleiteten Punktwert der Gesteinsart.



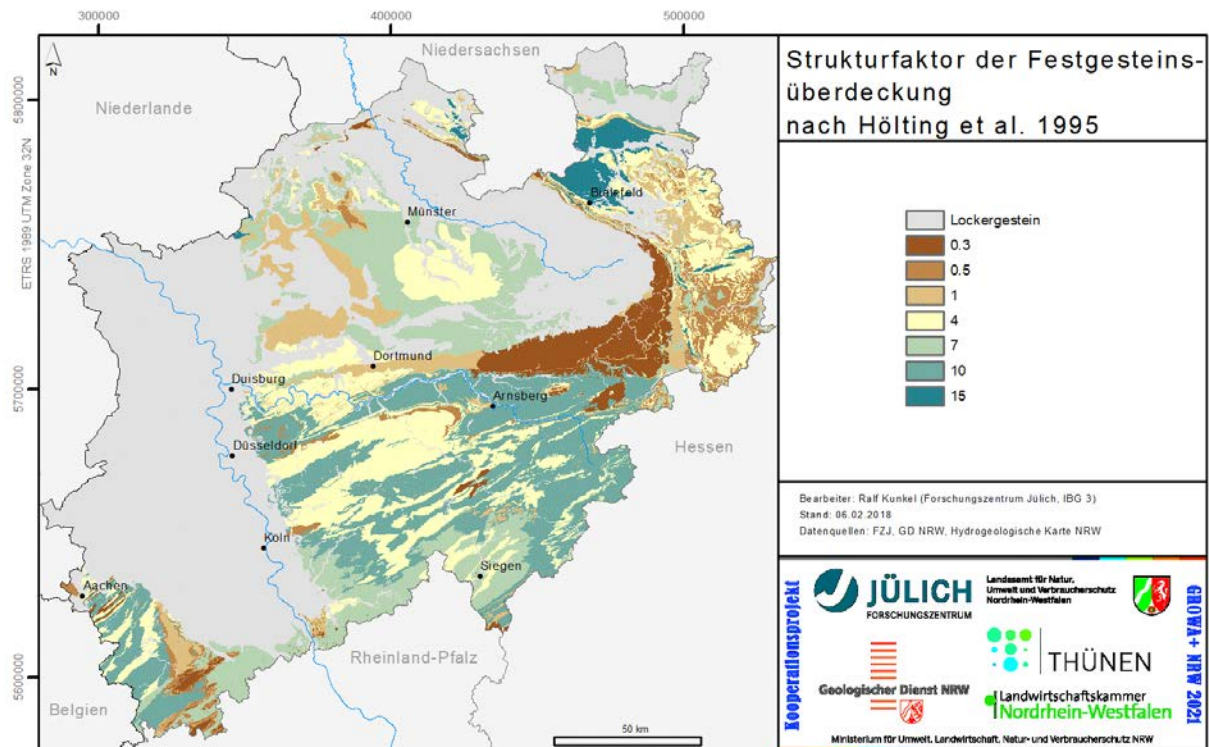
**Abb. 5-13:** Hölting - Punktwert für die Gesteinsart

Der überwiegende Anteil der Festgesteine wurde mit einem Punktwert von 20 bewertet. Im Rheinischen Schiefergebirge wurden die dort weit verbreiteten Ton- und Tonschiefergesteine mit diesem Wert belegt. In den nördlich angrenzenden mesozoischen Festgesteinen wurden vor allem die Ton- und Mergelgesteine mit diesem Wert belegt. Gesteinsfaktoren von 15 kennzeichnen Gesteinsfolgen, in denen Sandsteinanteile überwiegen. Werte von 10 wurden Vulkaniten und mesozoischen Kalk- und Kalkmergelsteinen mit hohen Mergelanteilen zugeordnet. Höhere Kalkanteile und Verkarstungserscheinungen waren gleichzeitig das wichtigste Unterscheidungskriterium, um einem Teil der mesozoischen und paläozoischen Kalkgesteine den geringsten Wert (Gesteinsfaktor 5) zuzuordnen.

### 5.3.3.2 Hölting-Strukturfaktor der Festgesteinsüberdeckung

Abb. 5-14 zeigt den auf Basis von Tabelle 3-3 (rechts) vom GD NRW aus Angaben in der HK NRW abgeleiteten Strukturfaktor der Festgesteinsüberdeckung. Der Strukturfaktor bewertet die unterschiedliche Wasserwegsamkeit der Gesteinsfugen und berücksichtigt die Zusammenhänge zwischen dem Ausmaß der Klüftigkeit und der Verkarstung sowie der tektonischen Beanspruchung eines Gesteins.



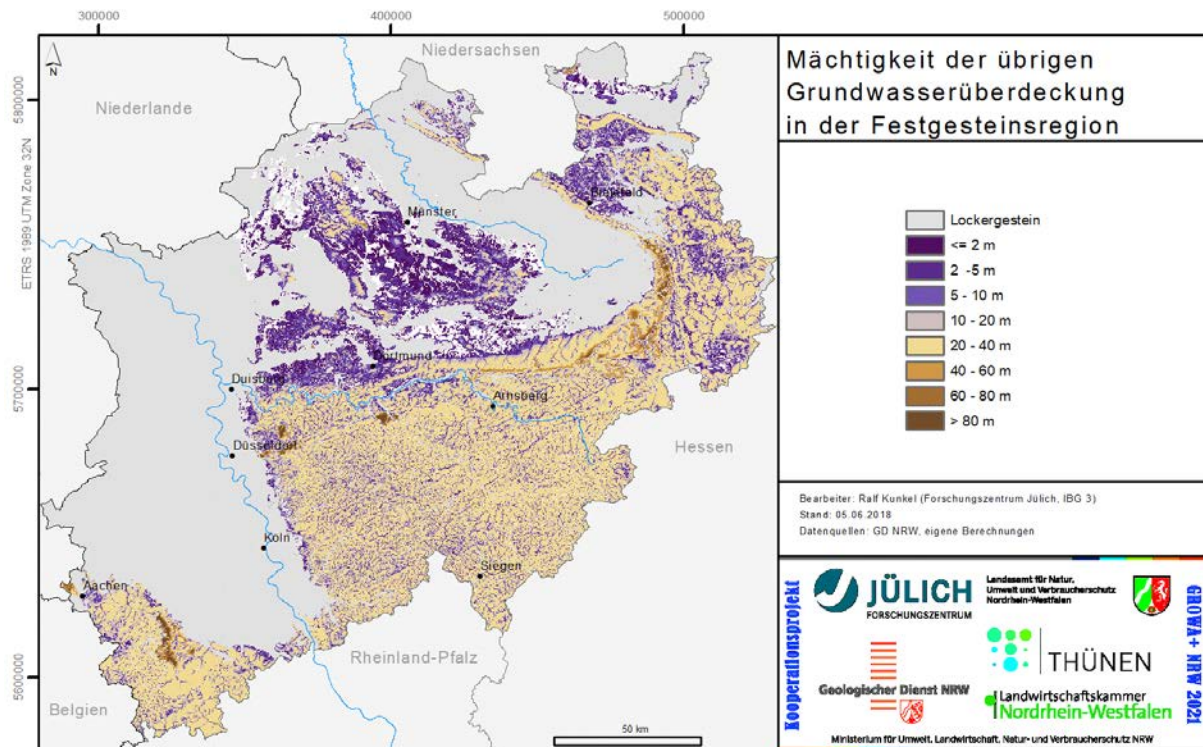


**Abb. 5-14:** Hölting-Strukturfaktor der Festgesteinsüberdeckung

Wie Abb. 5-14 zeigt, treten Werte des Strukturfaktors von  $> 7$  in Gesteinseinheiten mit hohem Tonanteil auf, z.B. bei den entsprechenden Gesteinen des Rheinischen Schiefergebirges und im Münsterland. Da dort zwar viele, aber sehr kleine und wenig wasserwegsame Klüfte auftreten, ist der Strukturfaktor dort hoch. Ein sehr geringer Strukturfaktor ergibt sich dagegen für die Gebiete, in denen verkarstete Gesteine mit entsprechend großen Klüften auftreten.

### 5.3.3.3 Mächtigkeit der Festgesteinsüberdeckung

Entsprechend GL. 3-3 geht der Flurabstand direkt in das Hölting-Verfahren ein. Wie Abb. 5-15 zeigt, können hierbei durchaus Mächtigkeiten von mehr als 20 Metern auftreten, in der Regel liegen die Werte darunter.



**Abb. 5-15:** Mächtigkeit der Festgesteinsüberdeckung

#### 5.3.3.4 Sickerwasserfaktor nach Hölting

In Abb. 5-16 ist der Sickerwasserfaktor dargestellt, der entsprechend Gl. 3-4 aus der Sickerwasserhöhe nach mGROWA (siehe Teilbericht IIa) abgeleitet wurde. Um zu vermeiden, dass der Sickerwasserfaktor ab Sickerwasserraten von über 750 mm/a einen Wert von 0 annimmt und das Hölting-Verfahren dann nicht mehr einsetzbar ist, wurde der Sickerwasserfaktor für Sickerwasserhöhen > 750 mm/a auf 0.25 festgelegt.

Da der Sickerwasserfaktor multiplikativ in das Hölting-Verfahren eingeht, hat dieser Faktor und damit der Sickerwasserhöhe großen Einfluss auf den Gesamtpunktwert der Gesteinsüberdeckung. Vor allem dort, wo hohe Sickerwasserraten auftreten (z.B. Bergisches Land) wird der sich aus der multiplikativen Verknüpfung von Punktwert Gesteinsart, Strukturfaktor und Mächtigkeit ergebende Punktwert u.U. deutlich, d.h. auf ein Viertel des Ursprungswertes, reduziert.

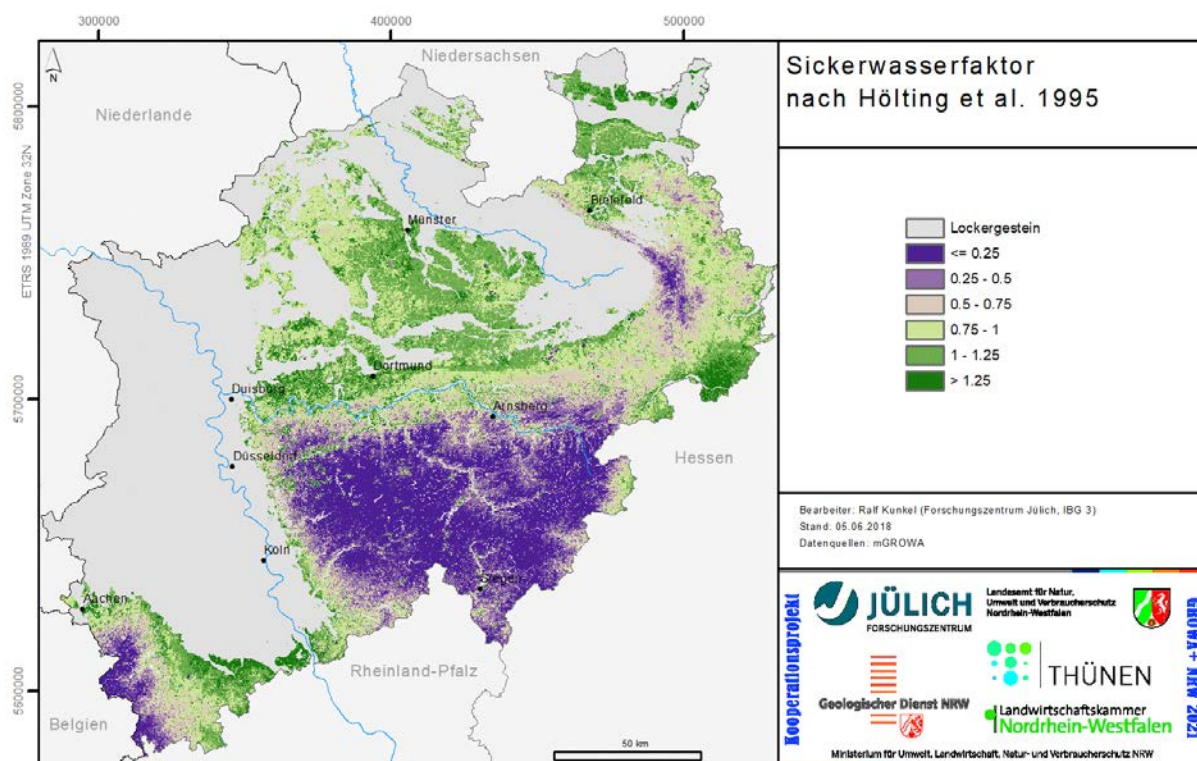


Abb. 5-16: Sickerwasserfaktor nach Hölting

### 5.3.4 Oberer Grundwasserleiter

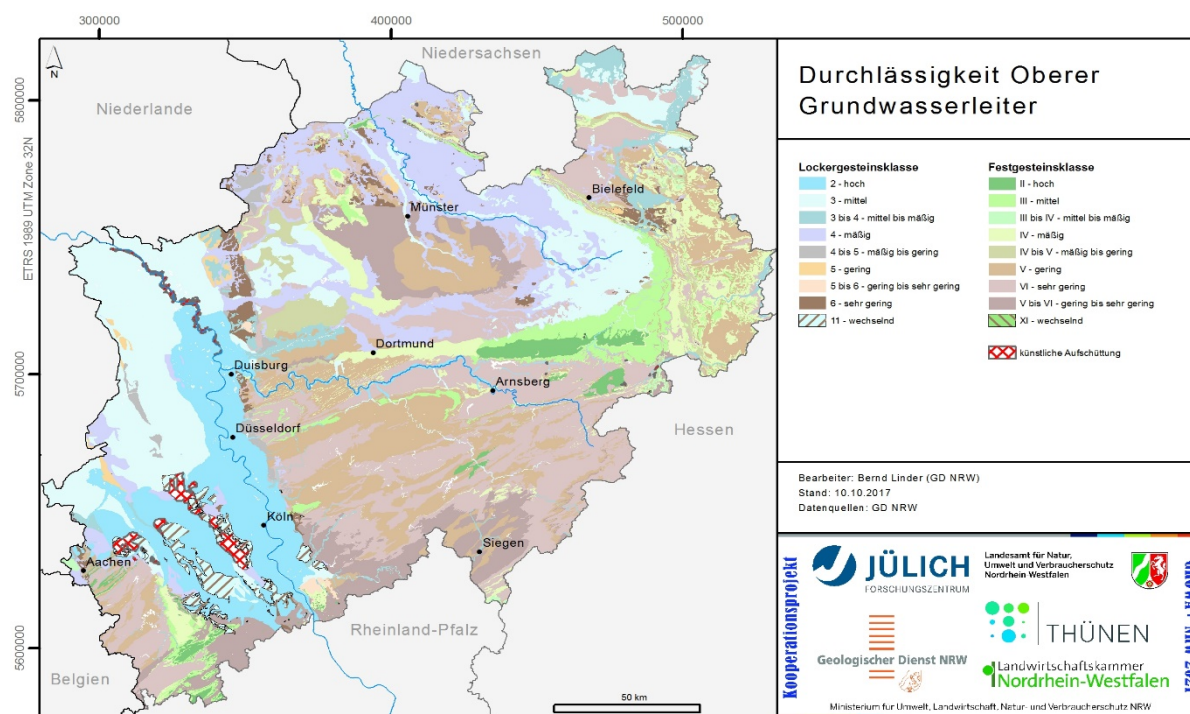
Die Kenngrößen, die zur Berechnung der Fließgeschwindigkeiten mit dem WEKU-Modell flächendeckend benötigt werden, sind der Durchlässigkeitsbeiwert, der nutzbare Hohlraumanteil und der hydraulische Gradient (siehe Abb. 5-6). Zur Fließzeitenermittlung müssen zusätzlich die grundwasserwirksamen Vorfluter (siehe Abb. 5-8) und die sich aus der Grundwasseroberfläche (siehe Abb. 5-4) ergebenden Grundwasserfließrichtungen bekannt sein. Die Ableitung der Grundwasseroberfläche wurde bereits in Kapitel 5-1 beschrieben. Die benötigten Angaben zu den Durchlässigkeitsbeiwerten wurden für die Festgesteinsbereiche der HK NRW entnommen. Für die Lockergesteinsbereiche wurde ein von  $\Delta h$  im Rahmen der Erstellung des Modells der Grundwasseroberfläche ankalibrierter Datensatz der hydraulischen Leitfähigkeit entnommen. Die Angaben zum nutzbaren Hohlraumanteil wurden für die Lockergesteinsaquifere aus den Durchlässigkeitsbeiwerten abgeleitet. Für die Festgesteine wurden die Werte literaturgestützt abgeschätzt.

#### 5.3.4.1 Grundwasserführende Gesteinseinheiten

Abbildung 5-17 zeigt eine Übersicht über die hydrogeologischen Verhältnisse in Nordrhein-Westfalen auf Basis der Hydrogeologischen Karte NRW. Die paläozoischen und mesozoischen oberflächlich anstehenden Festgesteine nehmen in NRW einen Flächenanteil von etwa 42 % ein. Die im Zuge der variszischen Gebirgsbildung entstandenen paläozoischen Festgesteine des Rheinischen Schiefergebirges nehmen hierbei den größten Flächenanteil ein. Das Rheinische Schiefergebirge ist vorwiegend aus devonischen und karbonischen Sedimentgesteinen aufgebaut, welche Mächtigkeiten von mehreren tausend Metern erreichen können.



Hierbei handelt es sich um Wechselfolgen von Silt- und Tonsteinen sowie Sandsteinen und Grauwacken mit geringen bis sehr geringen Durchlässigkeiten.



**Abb. 5-17:** Durchlässigkeit Oberer Grundwasserleiter

Die Wasserführung ist bei diesen Gesteinen vorwiegend an Klüfte gebunden. Vordevonische Festgesteine treten z. B. im Bereich des Hohen Venns sowie im Ebbe- und Remscheider-Sattel im Sauerland in Form von kambrischen und ordovizischen Quarziten und Tonschiefern zutage. Auf Grund ihrer meist starken Verkarstung können die karbonatischen Gesteine des Mittel- und Oberdevons (z. B. als Massenkalk im Sauerland, Bergischen Land und Lahnggebiet) sowie des Karbons (Kohlenkalk) hohe Durchlässigkeiten aufweisen.

Mesozoische Festgesteine stehen in der Westfälischen Bucht und im Weserbergland an. Im Weserbergland sind dies vorwiegend Gesteine der Triaszeit. Die meist sandigen Gesteine der Buntsandstein-Stufe werden von Kalksteinen des Muschelkalks überlagert. Diese werden wiederum von Ton-, Mergel- und Sandsteinen des Keupers überlagert. Das Münsterländer Becken ist eine aus einem fast 2000 m mächtigen Kreidesedimentstapel aufgebaute schüsselförmige geologische Struktur. Die Abfolge beginnt mit Ablagerungen aus der Unterkreide, aus denen vor allem Sandsteine hervorgegangen sind (z. B. Osningsandstein), welche überwiegend im östlichen Rand des Beckens zu Tage anstehen. Darüber lagern Kalk- und Mergelsteine der Oberkreide, die am Südwestrand des Beckens in Sandsteine übergehen (Essener Grünsand). Ähnliche sandige Einschaltungen kommen auch im Beckeninnern vor (Halterner Sande), wo sie eine hohe Grundwasserergiebigkeit aufweisen.

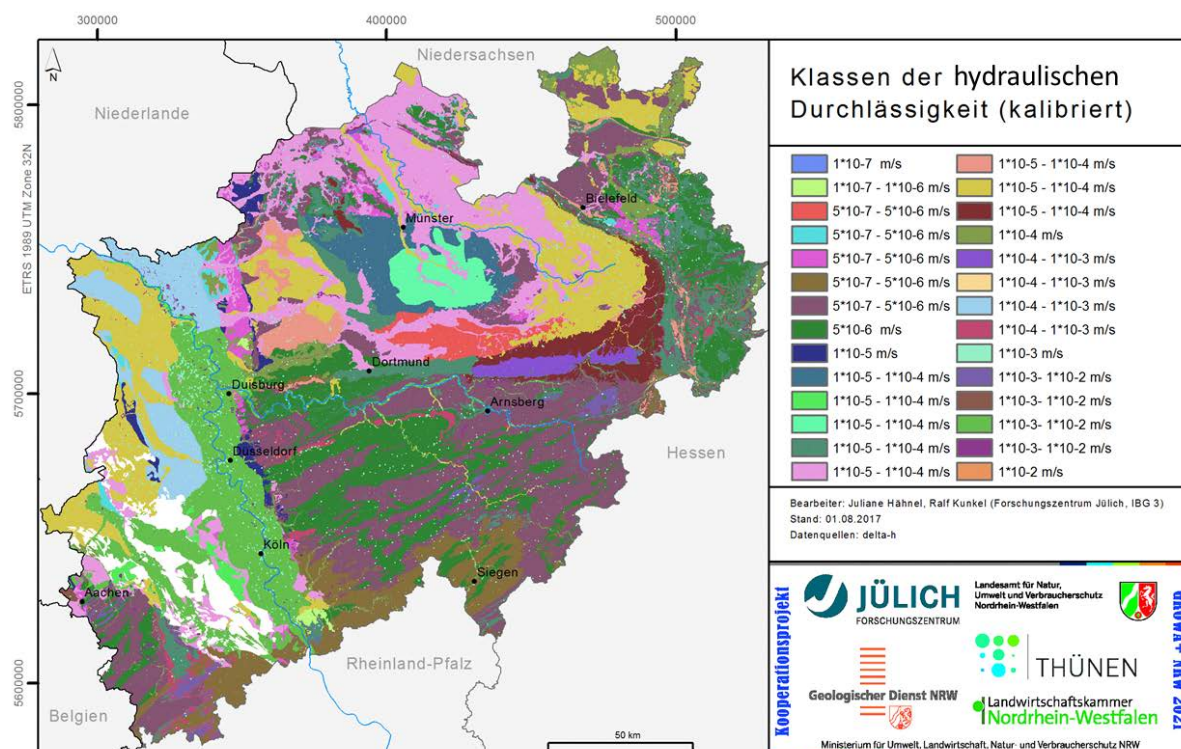
Ungefähr 58 % der oberflächennahen Grundwasserleiter Nordrhein-Westfalens sind aus Lockergesteinen aufgebaut. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um quartäre Ablagerungen. Mächtige tertiäre Lockergesteinsablagerungen befinden sich vor allem in der Niederrheinischen Bucht. Im nördlichen und nordwestlichen Teil der Westfälischen Bucht bedecken die

glazigenen Ablagerungen der Saalevereisung große Flächen des Münsterländer Kreidebeckens.

Im Kernmünsterland sind es vorwiegend tonig-mergelige Sedimente (Grundmoräne, Geschiebemergel), am Fuße des Teutoburger Waldes und des Osnings sowie im Münsterländer Kiessandzug sind es vorwiegend Sande. Während des Pleistozäns wurden schließlich die Kiese und Schotter der Haupt-, Mittel- und Niederterrassen abgelagert, welche für die größeren Flüsse (Rhein, Maas, Lippe, Ems, Weser) bedeutende Ausdehnungen erreichen können. Alle Lockergesteine werden häufig von äolischen Ablagerungen (Löß, Dünensande) überdeckt.

#### **5.3.4.2 Hydraulische Leitfähigkeit**

Basierend auf dem vom GD NRW auf Basis der HK NRW abgeleiteten Datensatz der hydraulischen Leitfähigkeit wurde von  $\Delta h$  im Rahmen der Kalibrierung des NRW-Modells der Grundwasseroberfläche ein Datensatz von Hydraulischen Leitfähigkeiten für die Lockergesteinsregion generiert. Hierbei wurde zunächst die Anfangsverteilung der Hydraulischen Leitfähigkeit aus den vorgegebenen Durchlässigkeitsklassen der HK NRW als Startgröße zur Erstellung des Modells der Grundwasseroberfläche verwendet. Über einen Vergleich mit vorhandenen Messwerten zum Grundwasserstand wurde in einem nächsten Schritt überprüft, wo sich im Modell der Grundwasseroberfläche die Bereiche mit hoher Abweichung befinden. Dort wurden die hydraulischen Leitfähigkeiten der Lockergesteine in einem nächsten Schritt so lange iteriert, bis eine gute Anpassung der berechneten Grundwasseroberfläche an den Messwert erreicht wurde. Einzige Bedingung war hierbei, dass sich die kalibrierten hydraulischen Leitfähigkeiten noch innerhalb der Klassen der in der HK NRW angegebenen Spannen bewegen. Dabei wurden die grundwasserführenden Gesteinseinheiten (vgl. Abb. 5-17) in Einzelfällen regional noch weiter differenziert. Innerhalb der so entstandenen Zonen wurden dann aber jeweils einheitliche Durchlässigkeitsbeiwerte genutzt. Die Verteilung der dabei kalibrierten hydraulischen Leitfähigkeiten für den Lockergesteinsbereich ist in Abb. 5-18 dargestellt.

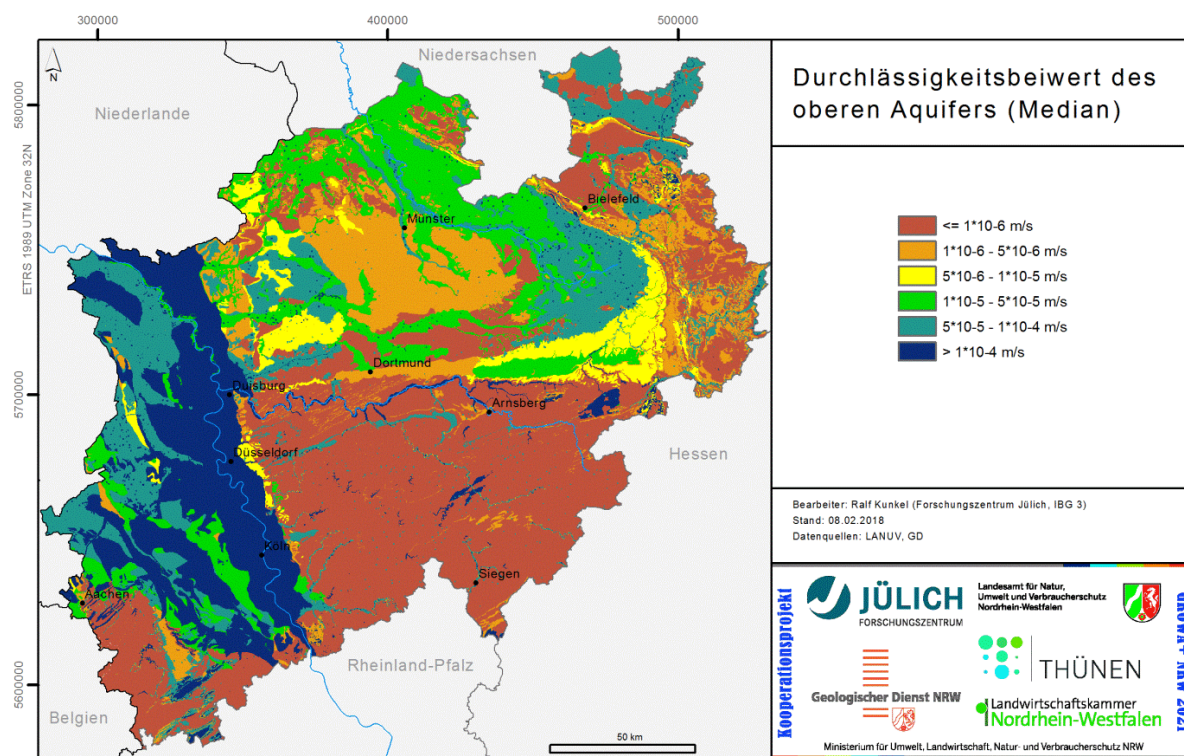


**Abb. 5-18:** Für den Lockergesteinsbereich ankalibrierte hydraulische Leitfähigkeiten nach delta h und pauschal um 1-2 Größenordnungen erhöhte hydraulischen Leitfähigkeiten für die Festgesteinseinheiten der HK NRW

Für die Festgesteinsregionen wurden die von delta h ankalibrierten Werte der hydraulischen Leitfähigkeiten nicht übernommen, da die Ausgangswerte der von delta h durchgeführten Kalibrierung aus der HK NRW für unverwitterte Gesteine und deren hydraulische Leitfähigkeiten gelten. Der überwiegende Anteil des Grundwasserabflusses findet jedoch in der Auflockerungszone über dem unverwitterten Gestein statt, so dass sich die zur Berechnung der Grundwasserfließzeiten verwendeten hydraulischen Leitfähigkeiten auch auf diese Auflockerungszone beziehen sollten. Um den hydraulischen Gebietseigenschaften verwitterter Gesteine nahe zu kommen, wurden die hydraulischen Leitfähigkeiten der HK NRW im Festgestein in Abstimmung mit dem GD NRW um 1-2 Größenordnungen erhöht. Die Gebietsgeometrien der HK NRW für die Festgesteinseinheiten wurden hierbei jedoch unverändert übernommen.

In Abb. 5-19 sind zur besseren Veranschaulichung der regionalen Unterschiede der hydraulischen Leitfähigkeiten noch die Mediane der Bandbreiten der für die Modellierung verwendeten Hydraulische Leitfähigkeiten dargestellt.





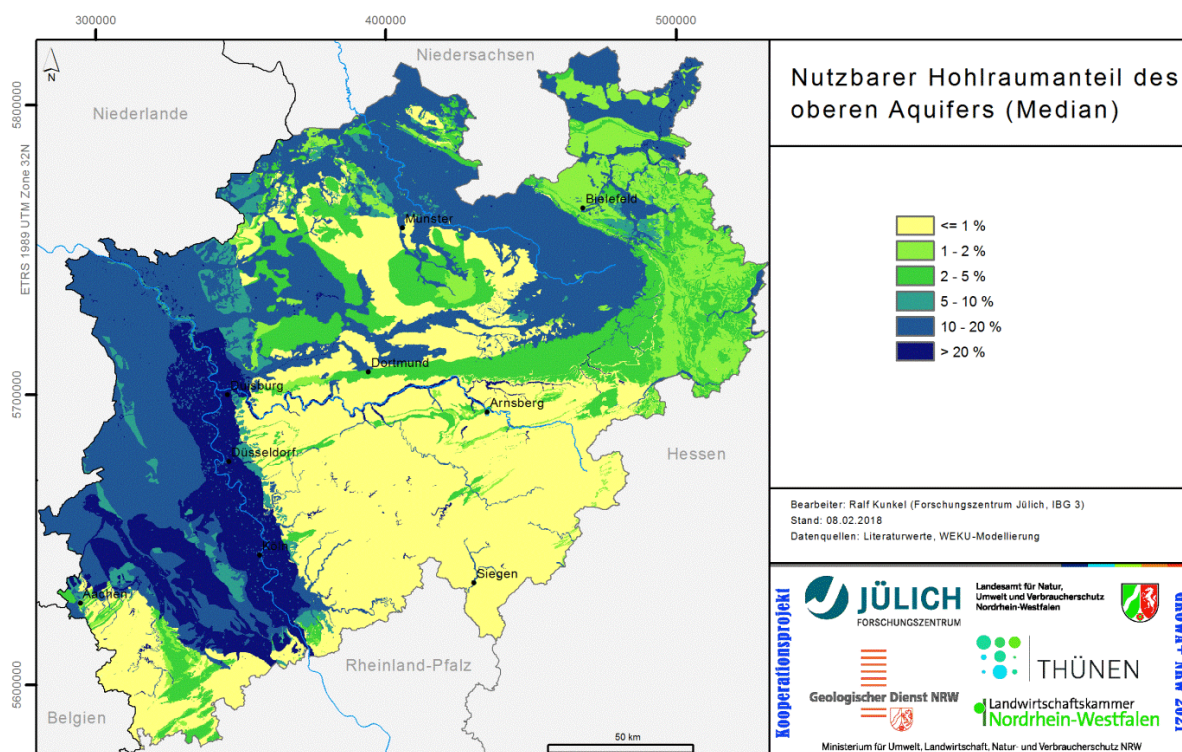
**Abb. 5-19:** Mediane der für die Modellierung verwendeten Bandbreiten der hydraulischen Leitfähigkeiten innerhalb der Aquifertypen

Wie aus Abb. 5-19 hervorgeht, liegen die Mediane der hydraulischen Leitfähigkeiten in den quartären Ablagerungen der Köln-Aachener Bucht und des Niederrheins im Allgemeinen bei Werten oberhalb von  $5 \times 10^{-5}$  m/s. Mit Werten zwischen  $1 \times 10^{-5}$  m/s und  $5 \times 10^{-5}$  m/s weisen auch die quartären Ablagerungen im Emseinzugsgebiet noch recht hohe hydraulische Leitfähigkeiten auf.

Die hydraulischen Leitfähigkeiten der Festgesteinseinheiten sind generell geringer und liegen für die meisten der der mesozoischen Gesteinsfolgen zwischen  $1 \times 10^{-5}$  m/s und  $1 \times 10^{-6}$  m/s. Die Regionen des Rheinischen Schiefergebirges besitzen dagegen meist geringere hydraulische Leitfähigkeiten (von weniger als  $1 \times 10^{-6}$  m/s). Ähnliche Werte ergeben sich auch für die Tongesteine des Weserberglandes.

#### 5.3.4.3 Nutzbarer Hohlraumanteil

Wie in Kap. 4.1.1 beschrieben, ist zur Modellierung der Grundwasserfließzeiten im oberen Aquifer ein flächendeckender Datensatz der nutzbaren Hohlraumanteile erforderlich. Da flächendeckende Angaben für die nutzbaren Hohlraumanteile nicht existieren, wurden die entsprechenden Werte entsprechend der in Kap. 4.1.1 beschriebenen Vorgehensweise abgeleitet, d.h. die nutzbaren Hohlraumanteile für die Lockergesteinsregion wurden entsprechend Gl. 4-2 aus den von  $\Delta h$  ankalibrierten hydraulischen Leitfähigkeiten (vgl. Abb. 5-19) abgeleitet. Für die Festgesteinsregionen wurden in Abstimmung mit dem GD NRW die in Tab. 4-1 aufgeführten Werte angesetzt. Abb. 5-20 zeigt den auf diese Weise für die Fließzeitenermittlung generierten Datensatz des nutzbaren Hohlraumanteils.



**Abb. 5-20:** nutzbarer Hohlraumanteil des oberen Aquifer

Danach ergeben sich für die klastischen Gesteinsfolgen des Rheinischen Schiefergebirges (vor allem die paläozoischen Tonschiefer) nutzbare Hohlraumanteile von deutlich weniger als 1 %. Ähnlich geringe nutzbare Hohlraumanteile wurden für die Tonmergelsteine im Kernbereich des Münsterländer Beckens angenommen, während für die übrigen mesozoischen Festgesteine in Abhängigkeit vom Gesteinstyp nutzbare Hohlraumanteile zwischen 1 und 5 % ausgewiesen wurden. Für die Lockergesteinsaquifere der Köln-Aachener Bucht, des Niederrheins, des Emseinzugsgebietes sowie nördlich des Wiehegebirges wurden dagegen nutzbare Hohlraumanteile zwischen 10% und mehr als 20 % ausgewiesen.

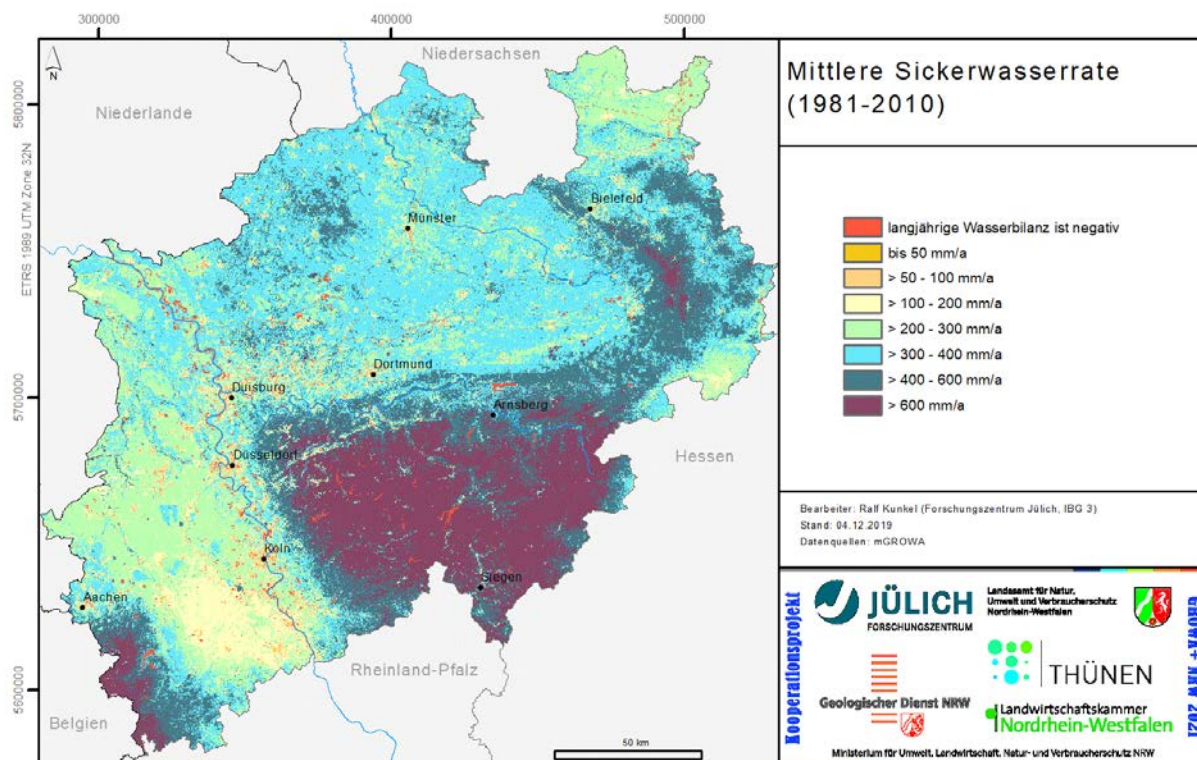
## 5.4 Hydrologische Datengrundlagen

Hydrologische Datengrundlagen gehen in die Verweilzeitermittlung in den Grundwasserdeckschichten ein:

- Im grundwasserfernen Lockergesteinsbereich geht die Sickerwasserrate in die Verweilzeitermittlung im Boden und in den Grundwasserdeckschichten bis zur Grundwasseroberfläche nach DIN 19732 ein.
- Im grundwassernahen Lockergesteinsbereich geht die Sickerwasserrate in die Verweilzeitermittlung im Boden bis zur Tiefenlage der Dränage in die Verweilzeitenberechnung ein. Unterhalb dieser Tiefe geht die Grundwasserneubildungshöhe ein.
- In der Festgesteinsregion geht die Sickerwasserrate bis zur Grundwasseroberfläche in die Verweilzeitenberechnung ein.



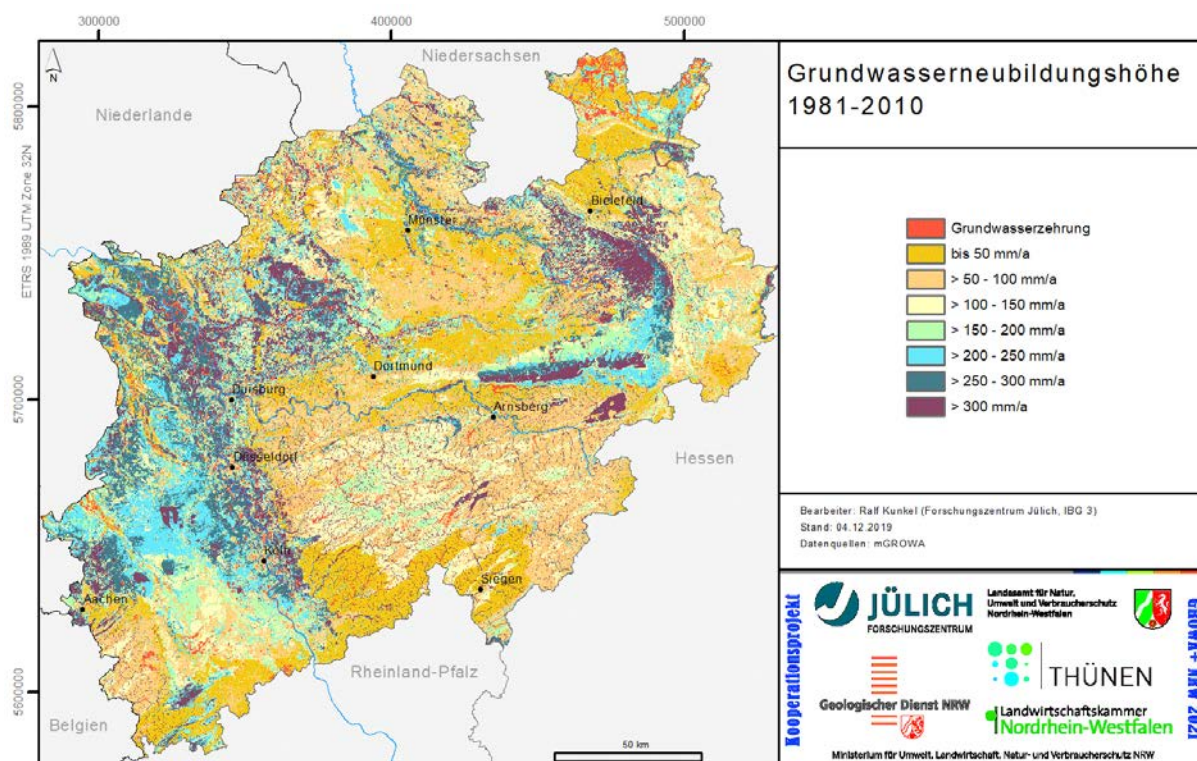
Die Berechnungsansätze zur Ermittlung der Sickerwasserhöhe und Grundwasserneubildungshöhe sind in Teilbericht IIa ausführlich beschrieben, so dass an dieser Stelle hierauf nicht eingegangen wird. Die entsprechenden Modellergebnisse sind ebenfalls im Teilbericht IIa bereits dargestellt und diskutiert, sollen an dieser Stelle aber noch einmal wegen ihres großen Einflusses auf die berechneten Verweilzeiten nochmals zur Darstellung kommen. Abbildung 5-21 zeigt die räumliche Verteilung der mit dem Modell mGROWA (Herrmann et al. 2015) berechneten mittleren Sickerwasserraten in NRW für die Periode 1981-2010.



**Abb. 5-21:** Sickerwasserrate 1981-2010 nach mGROWA

Die für NRW berechneten langjährigen Sickerwasserraten besitzen eine große Schwankungsbreite zwischen weniger als 50 mm/a und mehr als 600 mm/a. Die höchsten Sickerwasserraten werden in NRW mit Werten von z.T. über 600 mm/a in den Mittelgebirgsregionen erreicht. Mit den geringeren Jahresniederschlägen nördlich und westlich der Mittelgebirgsregionen nimmt auch die Sickerwasserrate ab. In der Zülpicher Börde im Südteil der Köln-Aachener Bucht und der Soester Börde werden selten Sickerwasserraten von mehr als 200 mm/a erreicht.

Abbildung 5-22 zeigt die räumliche Verteilung der mit dem Modell mGROWA (Herrmann et al. (2015) berechneten mittleren Grundwasserneubildungshöhen in NRW für die Periode 1981-2010.



**Abb. 5-22:** Grundwasserneubildungsrate 1981-2010 nach mGROWA

Insgesamt fällt auf, dass die Grundwasserneubildungshöhen in den Lockergesteinsregionen deutlich höher sind als in den Festgesteinsregionen. Vor allem in der gesamten Niederrheinischen Bucht können die Werte 300 mm/a und mehr betragen und entsprechen dort in etwa den ermittelten Sickerwassershöhen.

Da fast die gesamte, nicht verdunstende Wassermenge ungehindert dem Aquifer zusickern kann, ist die Niederrheinische Bucht trotz des geringen Niederschlagsdargebots nicht nur eine der grundwasserhöffigsten Gebiete NRWs, sondern auch Deutschlands.

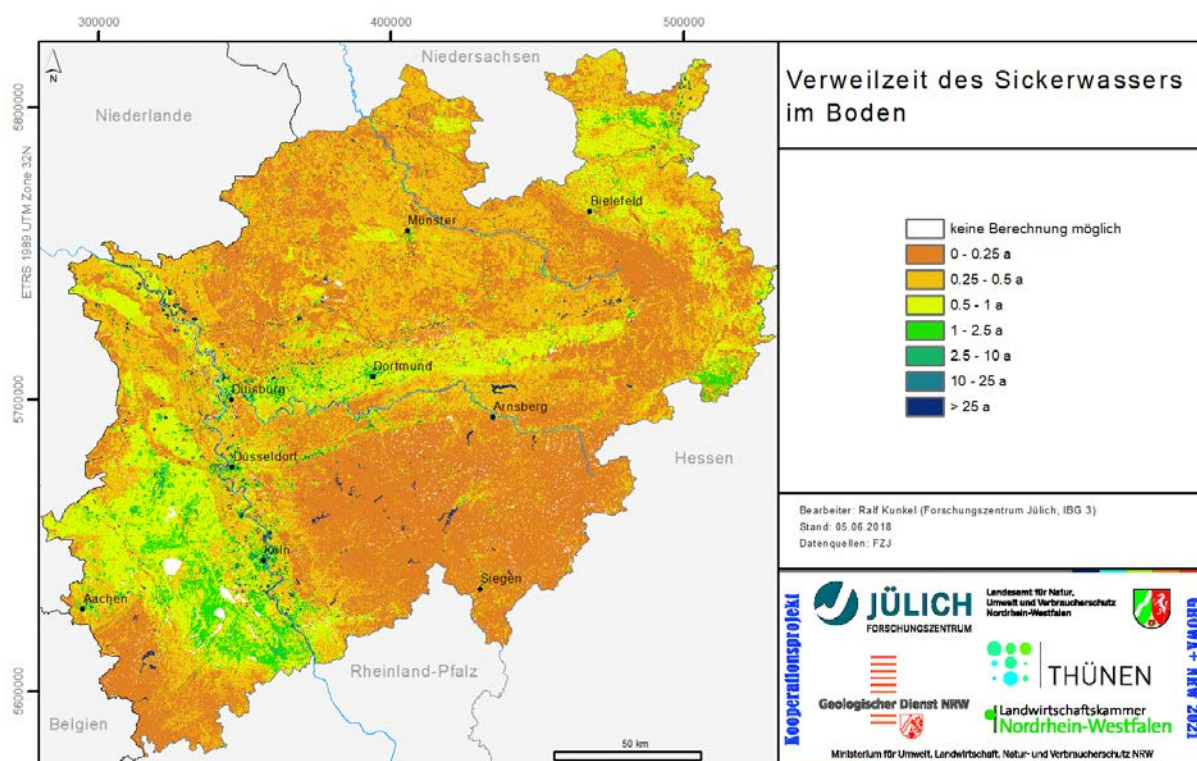
In den Festgesteinsregionen Nordrhein-Westfalens wird die Höhe der Grundwasserneubildung neben den meteorologischen Randbedingungen in erster Linie durch die hydrogeologischen Eigenschaften der anstehenden, wasserführenden Gesteinsschichten bestimmt. Die Direktabflussanteile über den natürlichen Interflow sind dort sehr hoch. Dementsprechend liegen die Grundwasserneubildungshöhen z. B. in den wasserundurchlässigen unter- und oberdevonischen Festgesteinen des Rheinischen Schiefergebirges zumeist bei Werten von unter 100 mm/a. Lediglich die verkarsteten Karbonatgesteine der Kreide im Münsterland und des Mitteldevons im Rheinischen Schiefergebirge weisen höhere Grundwasserneubildungshöhen (200 mm/a und mehr) auf.

## 6 Modellergebnisse zur flächenhaften Verweilzeit in der ungesättigten Zone

In diesem Kapitel kommen die modellierten Verweilzeiten in der ungesättigten Zone zur Darstellung. Zur ungesättigten Zone gehören der Boden und die Grundwasserdeckschichten, welche noch weiter in Grundwasserdeckschichten aus Festgestein und aus Lockergestein untergliedert werden. Wie in Kap. 3 beschrieben sind zur Ermittlung der Verweilzeiten in der ungesättigten Zone je nach Standortsituation und Datenlage unterschiedliche Verfahren zum Einsatz gekommen.

### 6.1 Verweilzeit im Boden

Die in Anlehnung an DIN 19732 aus der nutzbaren Feldkapazität und der Sickerwasserrate abgeleitete Verweilzeit im Boden (siehe Gl. 3-1) ist in Abb. 6-1 dargestellt.



**Abb. 6-1:** Verweilzeit des Sickerwassers im Boden

Es ergeben sich Werte im Bereich von weniger als 3 Monaten bis zu 2,5 Jahren. Niedrigere oder höhere Verweilzeiten treten nur vereinzelt auf. Aufgrund der hohen Sickerwasserraten und des vergleichsweise geringen Speichervermögens des Bodens weisen insbesondere die Festgesteinsregionen geringe Verweilzeiten im Boden von typischerweise weniger als 0.25 Jahren auf. Hohe Verweilzeiten im Boden von 1 Jahr und mehr treten verbreitet in der Köln-Aachener Bucht, der Soester Börde und nördlich des Wiehengebirges auf. Im Rheingau auf. Dort überlagern sich hohe nutzbare Feldkapazitäten und vergleichsweise geringe Sickerwasserraten.

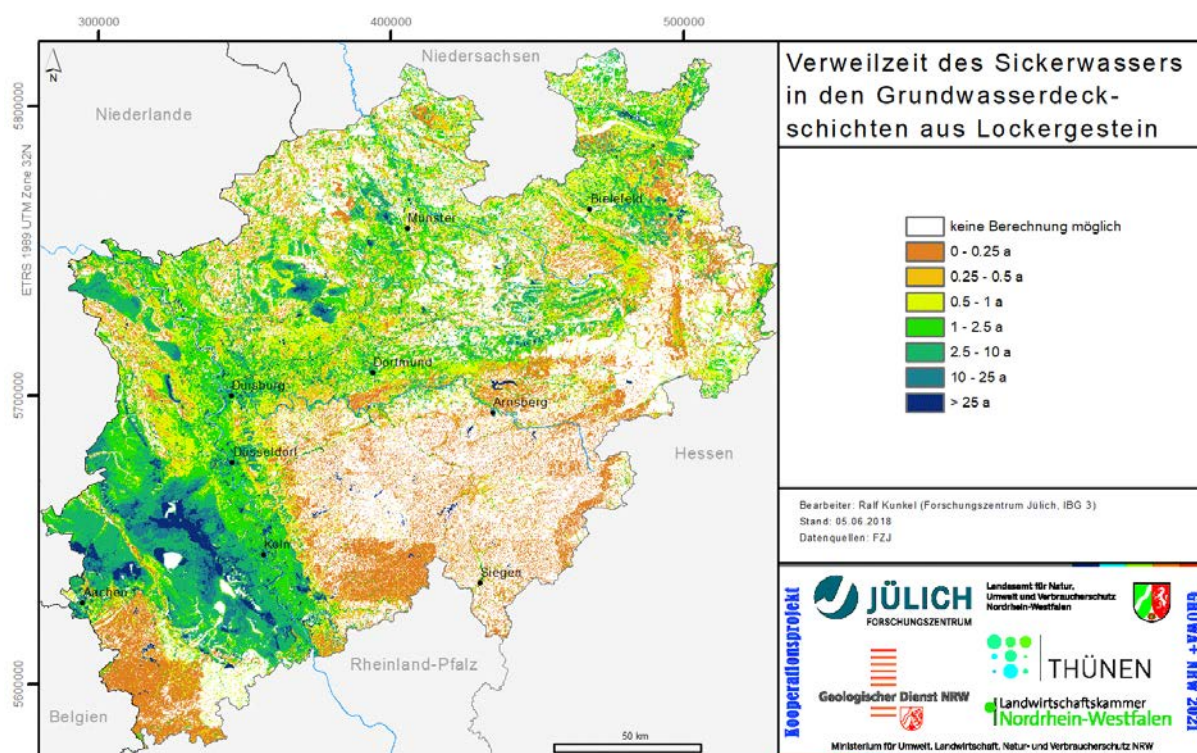


## 6.2 Verweilzeit in den Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein

Wie in Kap. 3.3.1 ausgeführt, gibt es für die Anwendung von Gl. 3-3 in den Grundwasserdeckschichten im Lockergesteinsbereich eine hierarchische Abfolge bei der Auswahl der Datensätze, aus denen Angaben zum Wasserspeichervermögen (Feldkapazität) abgeleitet wurden:

- aus der BK 50 für die Tiefenbereiche, für die Fk-Werte verfügbar waren (siehe Abb. 5-4),
- aus der Spezialkarte „Bindige Deckschichten“ bzw. durch Zuweisung von Fk-Werten zu den dort ausgewiesenen petrografischen Gesteinsbeschreibungen für Löss und Grundmoräne (siehe Abb. 5-10)
- aus der HK NRW basierend auf den petrografischen Gesteinsbeschreibungen zum lithologischen Aufbau bzw. durch Zuweisung von Feldkapazitäten (vgl. Tab. 3-2) in Anlehnung an AG Bodenkunde (2002), siehe Abb. 5-12.

Abb. 6-2 zeigt eine zusammenfassende Darstellung der basierend auf diesen drei Datengrundlagen ermittelten Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein.



**Abb. 6-2:** Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird an dieser Stelle darauf verzichtet drei getrennte Karten mit Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein zu präsentieren. Verweilzeiten von weniger als 3 Monaten dominieren in den Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein im Rheinischen Schiefergebirge (Eifel, Bergisches Land, Sauerland, Rothaargebirge), aber die Verweilzeiten wurden, wie Abb. 6-2 zeigt, für diesen Landschaftsraum nicht flächendeckend ausgewiesen. Letztendlich korrelieren die Bereiche, für die Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten aus Lockergestein im Rheinischen Schiefergebirge berechnet wurden mit den Regionen, für die in der BK 50 für den Tiefenbereich unterhalb von 2m



noch Fk-Werte ausgewiesen waren (vgl. Abb. 5-3 und 5-4). In den Bereichen in Abb. 6-2, für die im Rheinischen Schiefergebirge weiße Flächen ausgewiesen werden, steht unterhalb des durchwurzelten Bodenbereichs direkt das Festgestein an. Explizit sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass in der gesamten Festgesteinsregion zusätzlich zu den in Abb. 6-2 ausgewiesenen Verweilzeiten noch die Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten aus Festgestein berücksichtigt werden (siehe Kap. 6-3).

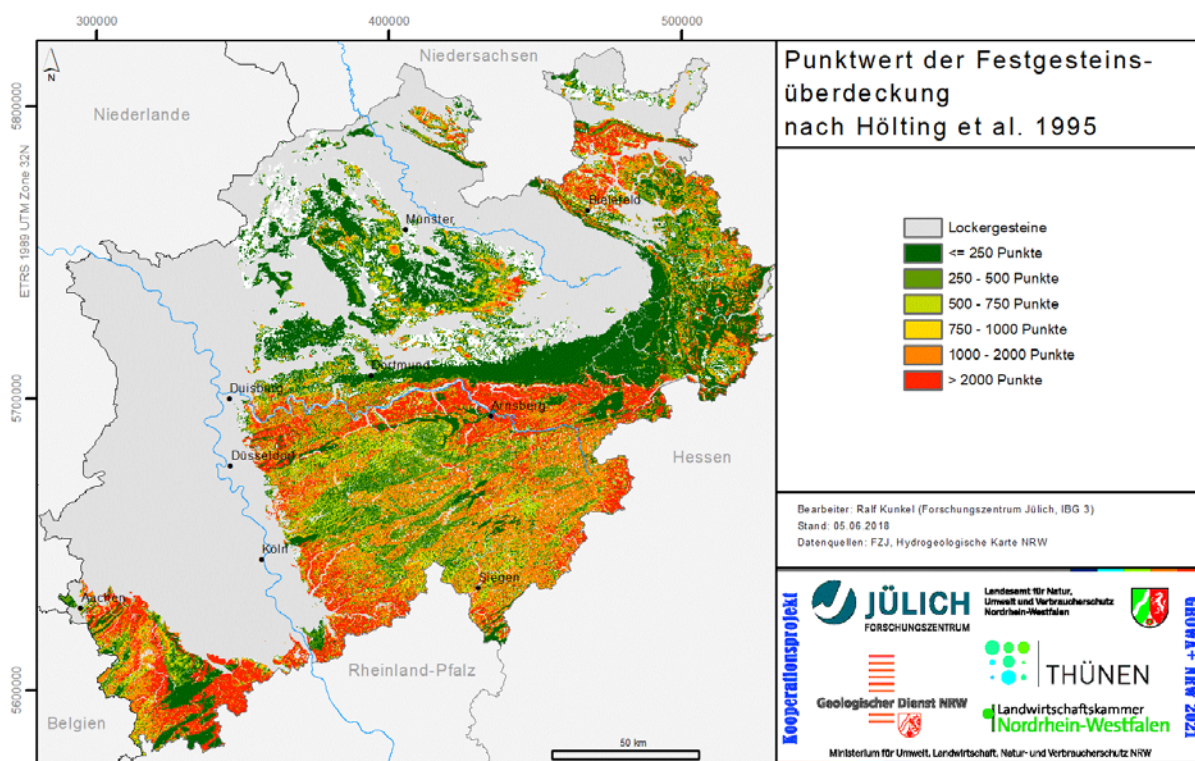
Die Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten der Lockergesteinsregion liegen in den meisten Regionen bei mehr als einem Jahr. Mit mehr als fünf Jahren liegen die Verweilzeiten in weiten Bereichen der Köln-Aachener Bucht, im Einzugsgebiet des Niers und in der Hohen Mark NRW-weit am Höchsten. Dort korrelieren geringe Sickerwasserraten mit mächtigen Lössüberdeckungen bzw. bindigen Deckschichten und / oder bergbaulich bedingt hohen Flurabständen wie in der Köln–Aachener Bucht. Dementsprechend groß sind die Unterschiede zu den Verweilzeiten in dem durch den Bergbau nicht bzw. nur gering beeinflussten Niederrheinischen Tiefland, wo die Verweilzeiten 2,5 Jahre selten überschreiten.

Auch in den Lockergesteinsbereichen im Münsterland ergeben sich nur selten Verweilzeiten von 2,5 a und mehr. Verweilzeiten von mehr als 5 Jahren sind dort an mächtige Deckschichten gekoppelt. Die in Abb. 6-2 erkennbaren weißen Flächen im Münsterland und nördlich des Wiehengebirges korrelieren mit grundwassernahen Standorten, d.h. dort endet die Wurzelzone an der Oberkante des Aquifers, so dass die Berechnung von Verweilzeiten in Grundwasserdeckschichten entfällt.

### **6.3 Verweilzeit in den Grundwasserdeckschichten aus Festgestein**

Durch Multiplikation des Punktwertes Gesteinsart (Abb. 5-13) mit dem Strukturfaktor (Abb. 5-14), der Mächtigkeit der Festgesteinsüberdeckung (Abb. 5-15) und dem Sickerwasserfaktor (Abb. 5-16) ergibt sich nach Gl. 3-3 der Punktwert der Festgesteinsüberdeckung (Abb. 6-3). Ermittelt wurde der Punktwert der Festgesteinsüberdeckung für den Tiefenbereich zwischen der Unterkante der Lockergesteinsüberdeckung (im Festgestein) entsprechend der ausgewiesenen Profiltiefen in der BK 50 und der Oberkante des Aquifers.

Bei der räumlichen Differenzierung der Werte spielen die Mächtigkeit der Deckschichten, der Gesteinsfaktor und der Strukturfaktor die entscheidende Rolle. Für Regionen wie das Rheinische Schiefergebirge, wo hohe Gesteins- und hohe Strukturfaktoren in Kombination mit hohen Grundwasserflurabständen auftreten, ergeben sich dadurch hohe Punktzahlen von bis zu 2000 und mehr. Mit Punktwerten von weniger als 750 Punkten treten umgekehrt die Regionen aus Abb. 6-3 hervor, wo die Grundwasserdeckschichten aus Kalkgesteinen oder Sandstein bestehen.

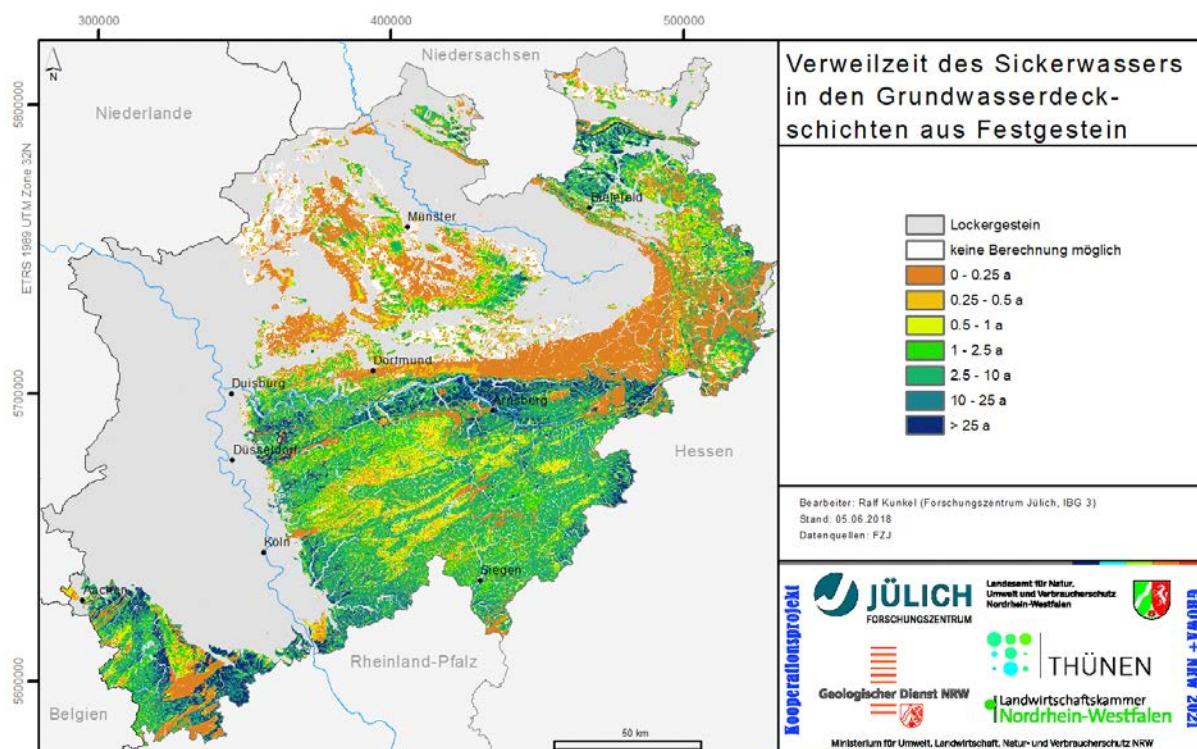


**Abb. 6-3:** Punktwert der Festgesteinsüberdeckung nach Hölting et al. (1995)

Die Punktwerte der Festgesteinsüberdeckung nach Hölting et al. (1995) wurden entsprechend der in Kap. 3.2.2 beschriebenen Vorgehensweise in Anhaltswerte der Verweilzeiten gemäß Gl. 3-5 umgerechnet. Aus der Gesamtpunktzahl (Abb. 6-3) kann somit eine zumindest grobe Abschätzung der zu erwartenden Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten von Festgesteinsregionen erfolgen (siehe Abb. 6-4).

Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung aus Festgestein von weniger als 3 Monaten sind dementsprechend für Regionen typisch, wo die Grundwasserdeckschichten aus Kalkgestein bestehen. Dort, wo Sandsteine die Grundwasserüberdeckung darstellen, überwiegen Verweilzeiten von bis zu 15 Monaten. In den Festgesteinsgebieten mit tonhaltigen Grundwasserdeckschichten (Tonsteine, Tonschiefer) überwiegen dagegen aufgrund der hohen Hölting - Punktwerte Sickerwasserverweilzeiten von mehr als 2 Jahren.

Es sei abschließend nochmals hervorgehoben, dass für den gesamten Festgesteinsbereich, der ca. 50% der Landesfläche NRWs ausmacht, eine Ermittlung der Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung nur nach dem Verfahren nach Hölting et al. (1995) möglich war, so dass die in Abb. 6-4 ausgewiesenen Verweilzeiten mit großen Unsicherheiten verbunden sind.



**Abb. 6-4:** Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung aus Festgestein

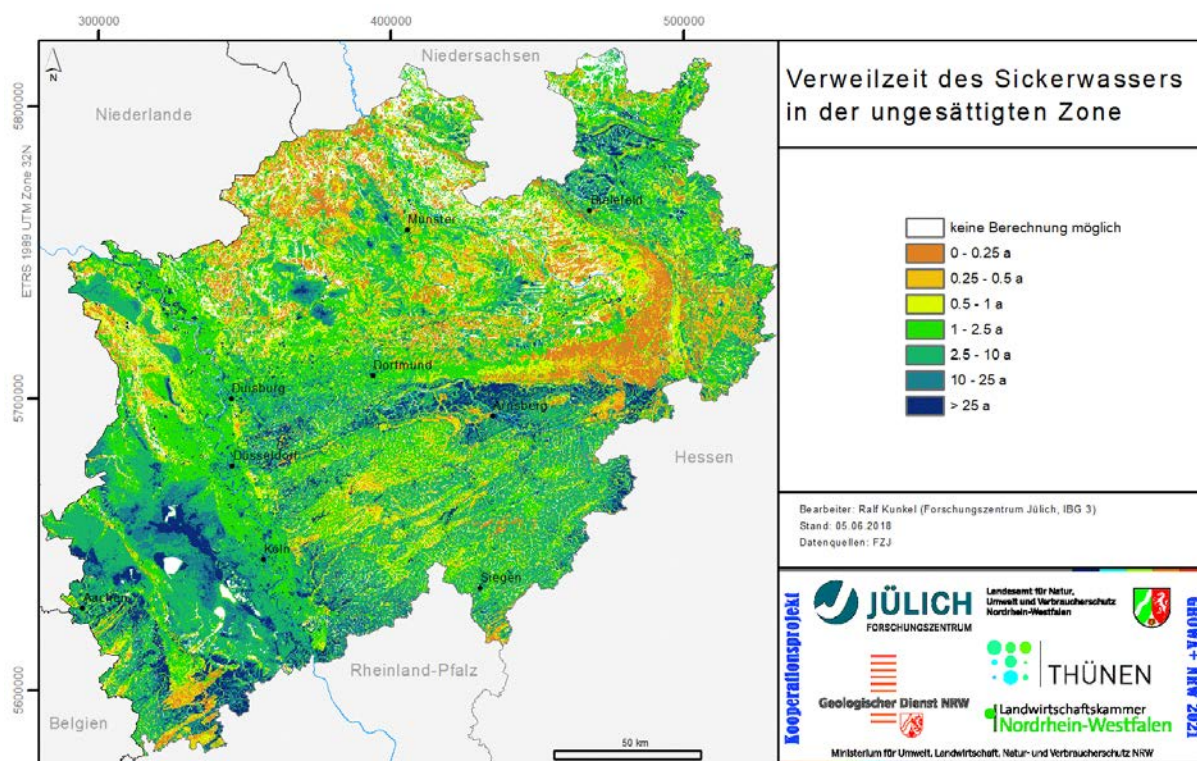
## 6.4 Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone

Durch Summation der Verweilzeiten in der Bodenzone (Abb. 6-1), in den Grundwasserdeckschichten im Lockergesteinsbereich (Abb. 6-2) sowie den Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten im Festgesteinsbereich ergibt sich die Gesamtzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone, d.h. der Zeit, die das Sickerwasser benötigt, um von der Erdoberfläche bis zur Grundwasseroberfläche zu gelangen. Das Ergebnis ist in Abbildung 6-5 dargestellt.

Die berechneten Sickerwasserverweilzeiten im Lockergesteinsbereich NRWs überdecken einen Wertebereich von weniger als 0,5 Jahren bis zum Teil deutlich mehr als 5 Jahren. Flächendeckend hohe Sickerwasserverweilzeiten von über 5 Jahren werden für die aus Lockersedimenten bestehende Köln-Aachener berechnet. Durch Sumpfungsmassnahmen bedingte hohe Grundwasserflurstände bzw. lange Fließstrecken des Sickerwassers bis zum Erreichen des Grundwasserspiegels in Kombination mit geringen Sickerwasserraten sind dort die maßgeblichen Einflussfaktoren.

Obwohl petrographisch und stratigrafisch entlang der Rheinniederung und am Niederrhein vergleichbare Lockergesteinsfolgen wie in der Köln-Aachener Bucht anzutreffen sind, liegen die berechneten Verweilzeiten dort aufgrund der höheren Grundwasserflurstände und Sickerwasserraten um ca. die Hälfte geringer und betragen in der Regel weniger als 2,5 Jahre. Für grundwassernahe Standorte in der Lockergesteinsregion, die vor allem im nördlichen Münsterland und am Niederrhein auftreten, ergeben sich aufgrund des Fehlens von mächtigen Grundwasserdeckschichten meist nur sehr geringe Verweilzeiten in der ungesättigten Zone von weniger als 0,5 Jahren.





**Abb. 6-5:** Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone

Für die Festgesteinsregionen NRWs wurden ebenfalls Verweilzeiten in einem Wertebereich von weniger als 0,5 Jahren bis zum Teil deutlich mehr als 5 Jahren ermittelt. Jedoch ergeben sich die Verweilzeiten dort über andere Parameterkombinationen. So können sich Verweilzeiten in einer Größenordnung von bis zu 5 Jahren ergeben, wenn hohe Hölting-Gesteinspunkt-werte (Tongesteine und Schiefergestein) mit hohen Grundwasserflurabständen korrelieren. Dort, wo für die Grundwasserüberdeckung aus Festgestein mittelhohe Hölting-Gesteinspunkt-werte (Sandsteine) ausgewiesen wurden, liegen die Verweilzeiten dagegen auch bei hohen Flurabständen bei selten mehr als 2,5 Jahren. Geringe Verweilzeiten in der ungesättigten Zone von weniger als 0,5 Jahren ergeben sich in der Festgesteinsregion dort, wo Kalksteine die Grundwasserdeckschichten darstellen.

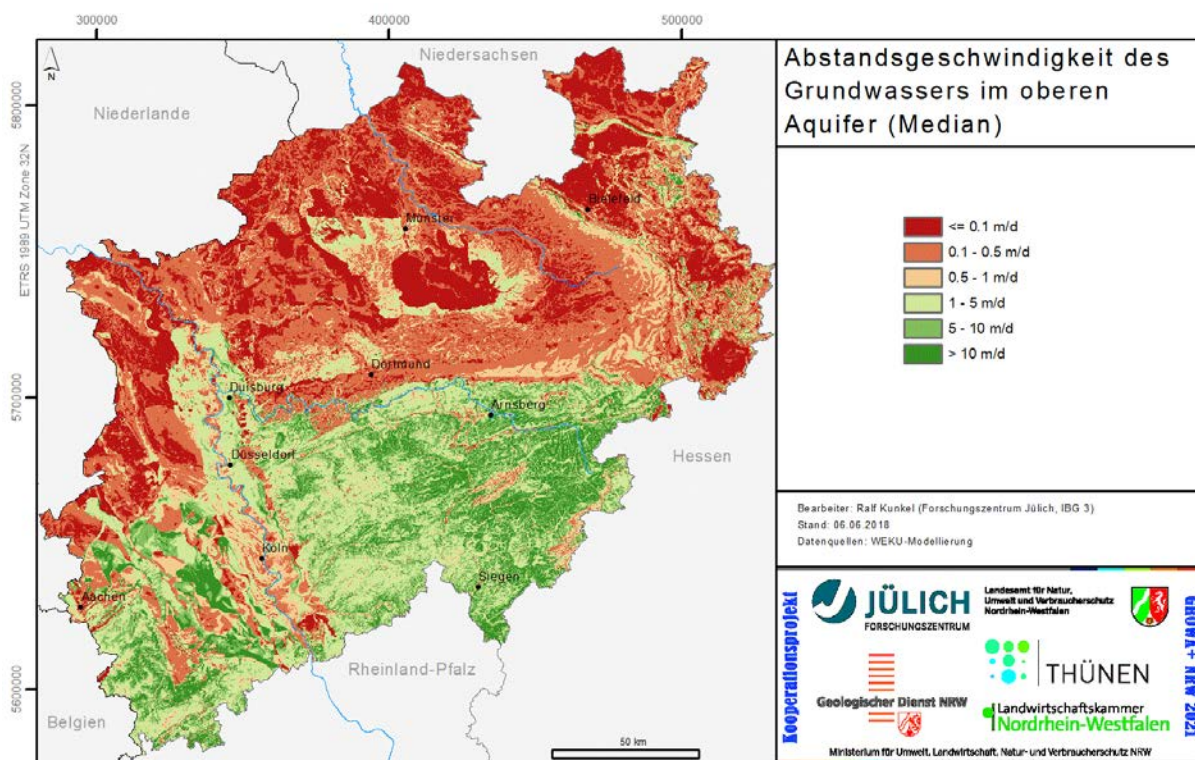
An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass aus Abb.6-5 nicht hervorgeht, dass die dargestellten Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone Ergebnisse von verschiedenen Verfahren und verschiedenen Datengrundlagen zusammenfassen. Dies soll vor allem nicht darüber hinwegtäuschen, dass vor allem die abgeschätzten Sickerwasserverweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten der Festgesteinsregion als grobe Anhaltswerte aufzufassen sind, die mit großen Unsicherheiten behaftet sind und im Einzelfall deutlich von den tatsächlich auftretenden Verweilzeiten abweichen können.

## 7 Modellergebnisse zur Fließzeit im Grundwasser bis Vorflutereintritt

In diesem Kapitel werden die Modellergebnisse zur flächenhaften Fließzeit im Grundwasser bis Vorflutereintritt dargestellt. Alle Modellergebnisse beruhen auf dem WEKU-Modell.

### 7.1 Modellergebnis zur Abstandsgeschwindigkeit

Die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit im oberen Aquifer erfolgt im WEKU-Modell nach dem Darcy-Ansatz, d.h. auf Basis der hydraulischen Leitfähigkeiten der HK NRW (Abb. 5-18), den abgeleitete nutzbaren Hohlraumanteilen (Abb. 5-19) und dem aus der Grundwasseroberfläche ermittelten hydraulischen Gradienten (Abb. 5-6). In Abb. 7-1 sind die auf diese Weise ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten des Grundwassers im oberen Aquifer dargestellt.



**Abb. 7-1:** Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers im oberen Aquifer

Die Werte umfassen den Bereich von weniger als 0,1 m/d und mehr als 10 m/d. Geringe Abstandsgeschwindigkeiten von 0,5 m/d und weniger ergeben sich für die meisten quartären Lockergesteinsregionen. Grund hierfür sind die für Flachlandregionen typischen geringen hydraulischen Gradienten. Nur im Bereich der Köln-Aachener Bucht gibt es im Lockergestein gehäuft höhere hydraulische Gradienten, nämlich genau dort, wo sich die Sumpfungsmaßnahmen in Zusammenhang mit dem Braunkohletagebau bemerkbar machen. Abstandsgeschwindigkeit von 10 m und mehr sind in diesen anthropogen überprägten Regionen keine Seltenheit.



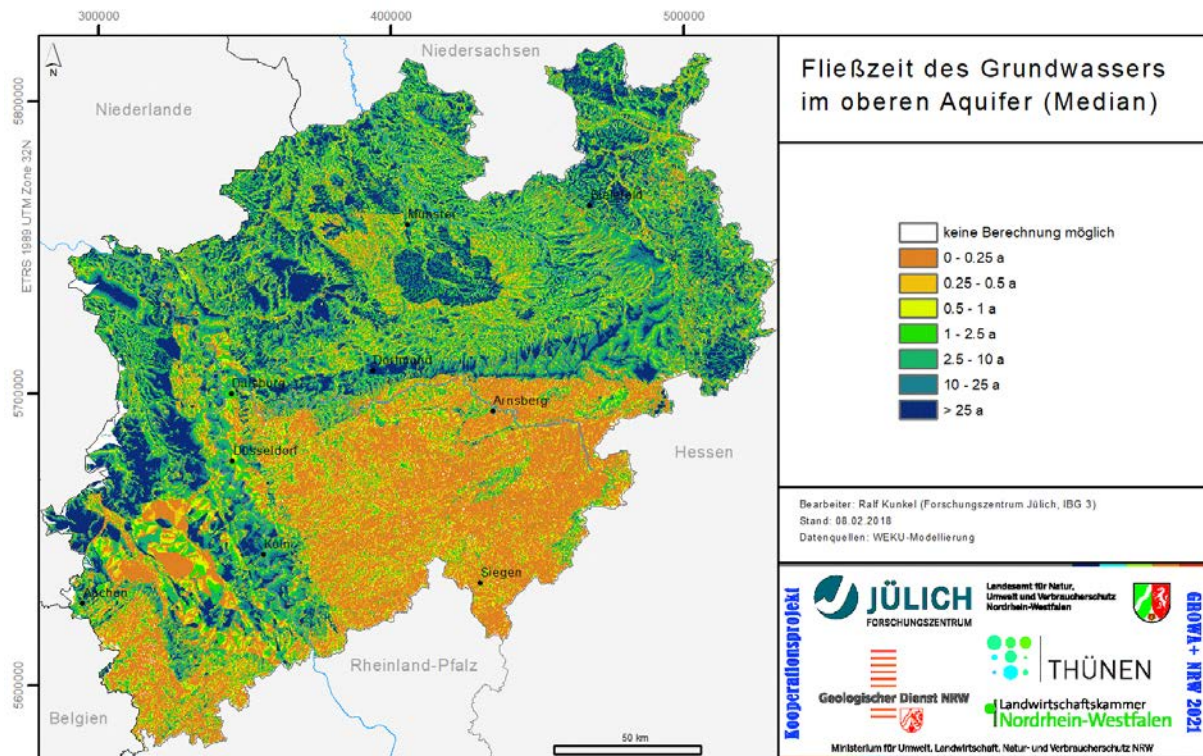
In den Festgesteinsregionen, und dort speziell in den Gebieten, die durch und paläozoische Schiefer geprägt sind, treten meist Werte zwischen 1 und 10 m/d auf. Vor allem die kurzen Fließstrecken, die meist hohen hydraulischen Gradienten und die geringen nutzbaren Hohlraumanteile sind hierfür verantwortlich. In den Festgesteinsaquiferen der Westfälischen Bucht und des Weserberglandes liegen die modellierten Abstandsgeschwindigkeiten in der Größenordnung der Abstandsgeschwindigkeiten, die für die Lockergesteinsregion ermittelt wurden, d.h. bei unter 0.1 m/d. Hauptursache sind hier die im Vergleich zu den paläozoischen Schiefen erhöhten nutzbaren Hohlraumanteile der mesozoischen Gesteine sowie die insgesamt flacheren hydraulischen Gradienten.

## **7.2 Modellergebnis zur Fließzeit des Grundwassers im Aquifer**

Bei der Ermittlung der Fließzeiten des Grundwassers im oberen Aquifer wird die gesamte Fließstrecke betrachtet, die das Grundwasser von der Einsickerung in den oberen Aquifer bis zum Austritt in den jeweiligen grundwasserwirksamen Vorfluter zurücklegt. In die Berechnung gehen neben der im vorherigen Kapitel beschriebenen Abstandsgeschwindigkeiten (Abb. 7-1) im Grundwasser auch die Fließrichtungen und die grundwasserwirksamen Vorfluter benötigt (Abb. 5-8) ein.

Die in Abb. 7-2 dargestellten Fließzeiten des Grundwassers im oberen Aquifer weisen eine große Spannweite zwischen weniger als 1 Jahr und mehr als 25 Jahren auf. Hohe Fließzeiten ergeben sich überall dort, wo geringe Abstandsgeschwindigkeiten in Kombination mit langen Fließstrecken bis zum Vorfluter auftreten. In den Lockergesteinsregionen des Niederrheinischen Tieflands treten dort deshalb gehäuft Fließzeiten von 25 Jahren und mehr auf. Ähnlich hohe Fließzeiten ergeben sich für einige Festgesteinsregionen in der Westfälischen Bucht, vor allem dort, wo Kalkgesteine mit hoher Wasserspeicherefähigkeit im Untergrund anstehen, so dass das Gewässernetz wenig dicht und damit die Fließstrecken bis zum Vorfluter lang sind.

Großflächig geringe Fließzeiten von weniger als einem Jahr sind typisch für die Festgesteinsaquifere des Rheinischen Schiefergebirges. Sie ergeben sich dort aus der -durch die geringere Wasserwegsamkeit der Schiefergesteine bedingten- hohen Vorfluterdichte und damit einhergehenden kurzen Fließstrecken des Grundwassers sowie den topografiebedingt hohen hydraulischen Gradienten.

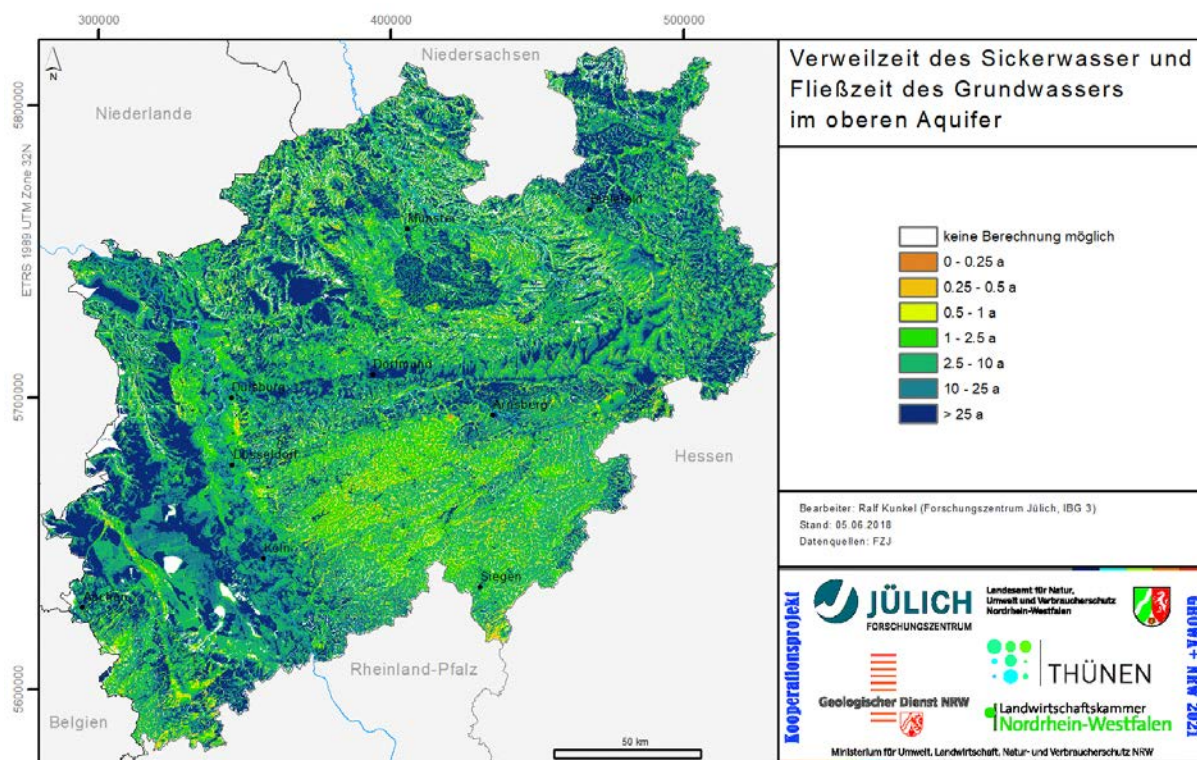


**Abb. 7-2:** Fließzeit des Grundwassers im oberen Aquifer

Die mittleren Grundwasserfließzeiten geben jeweils die Zeiträume an, die das Grundwasser benötigt, um vom Ort der Einsickerung in den Grundwasserraum bis zum jeweiligen grundwasserwirksamen Vorfluter zu gelangen. An dieser Stelle sei ausdrücklich betont, dass die berechneten Fließzeiten sich immer auf den grundwasserbürtigen Abflussanteil beziehen. Wie bereits ausgeführt wurde, stellt der grundwasserbürtige Abflussanteil nicht in allen Regionen die dominierende Abflusskomponente dar. So trägt beispielsweise der grundwasserbürtige Abfluss in Gebieten, die künstlich entwässert werden oder die einen sehr geringes Speichervermögens im Untergrund haben, z.B. Tongesteine, häufig weniger als 10 % zum Gesamtabfluss bei. In diesen Regionen beziehen sich die angegebenen Verweilzeiten daher nicht auf die regional dominante Abflusskomponente. Dies ist bei der Interpretation und Anwendung der Ergebnisse unbedingt zu berücksichtigen.

## 8 Aggregierte Verweil- und Fließzeiten bis Vorflutereintritt

Durch Summation der berechneten Gesamtverweilzeit in der ungesättigten Zone (Abb. 6-6) mit den Fließzeiten im Aquifer kann abgeschätzt werden, wie lange das Wasser von der Einsickerung in den Boden an der jeweiligen Rasterzelle bis zum Austritt in den grundwirksamen Vorfluter benötigt (siehe Abb. 8-1).



**Abb. 8-1:** Aufsummierte Verweil- und Fließzeiten von der Einsickerung in den Boden bis zum Austritt in ein Oberflächengewässer

Wie Abbildung 8-1 zeigt, umfassen die so ermittelten Verweil- und Fließzeiten einen weiten Bereich zwischen weniger als 1 Jahr und mehr als 25 Jahren. Dabei zeigt sich, dass die Verweil- und Fließzeiten im Festgestein durchweg gering sind und 10 Jahre selten übersteigen. Insbesondere im Westteil der Niederrheinischen Bucht treten jedoch bedeutend höhere Verweil- und Fließzeiten auf, die weniger durch die Verweilzeiten bei der Passage der ungesättigten Zone bestimmt sind, als vielmehr durch die hohen Fließzeiten in der gesättigten Zone. Die hohen Verweilzeiten in den Grundwasserdeckschichten sind durch geringe Sickerwasserraten und hohe Flurabstände bedingt, so dass dort die Verweilzeit in der ungesättigten Zone in einigen Teilregionen die Grundwasserfließzeiten übertreffen kann.

## 9 Szenario – Analyse: Verweil- und Fließzeiten im Rheinischen Revier bei sumpfungsunbeeinflussten Verhältnissen

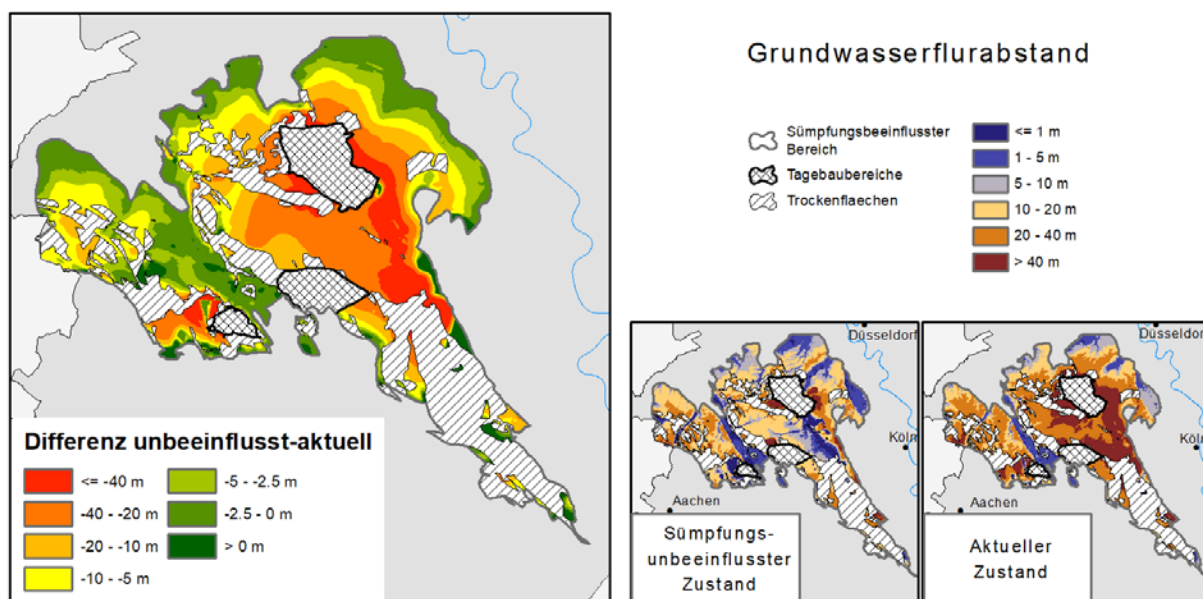
Basierend auf einem vom LANUV zur Verfügung gestellten Shape-file des derzeit sumpfungsbeeinflussten Bereiches wurde eine Szenario-Analyse durchgeführt, in der untersucht wurde, ob und in welcher Weise sich die Verweil- und Fließzeiten in den aktuell sumpfungsbeeinflussten Regionen im Rheinischen Revier ändern, wenn die Bergbaumaßnahmen zum Ende gekommen sind. Bis auf das digitale Modell der Grundwasseroberfläche bzw. die hieraus abgeleiteten Größen (Flurabstand, hydraulischer Gradient) wurden alle Eingabedatensätze und Modellkonfigurationen in unveränderter Form übernommen. Vorgegangen wurde hierbei in folgender Weise:

- I. In das von DELTA h erstellte digitale Modell der Grundwasseroberfläche wurden Grundwassergleichen aus dem Jahr 1955 implementiert, die sumpfungsunbeeinflusste Verhältnisse repräsentieren sollen.
- II. Auf dieser Basis wurde der mittlere Flurabstand bestimmt und die für die Verweil- und Fließzeitenmodellierung wesentlichen Wasserhaushaltsgrößen (Sickerwasserhöhe und Grundwasserneubildungshöhe) ermittelt.
- III. Anschließend wurden analog zu den in den Kap. 3.2 und Kap. 3.3 beschriebenen Verfahren die Verweilzeiten im Boden und in den Grundwasserdeckschichten bestimmt.
- IV. Basierend auf dem digitalen Modell der Grundwasseroberfläche, welches in einem gesonderten Szenario die sumpfungsunbeeinflusste Situation 1955 repräsentiert, wurden die Änderungen in der Hydrodynamik -vor allem bei den hydraulischen Gradienten- abgebildet
- V. Abschließend wurden analog zu dem in Kap. 4 beschriebenen Verfahren die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers bzw. die hieraus sich ergebenden Fließzeiten des Grundwassers bestimmt.

Die folgenden Abbildungen für den „sumpfungsunbeeinflussten Zustand“ zeigen ausschließlich die Situation innerhalb der Gebietskulisse des von Sumpfungsmaßnahmen beeinflussten Bereichs im Rheinischen Revier. Im Vordergrund stehen die im Vergleich zur sumpfungsbeeinflussten Ist-Situation zu erwartenden Unterschiede. Dargestellt ist jeweils die Differenz zwischen sumpfungsunbeeinflusstem Zustand und aktuellem Zustand.

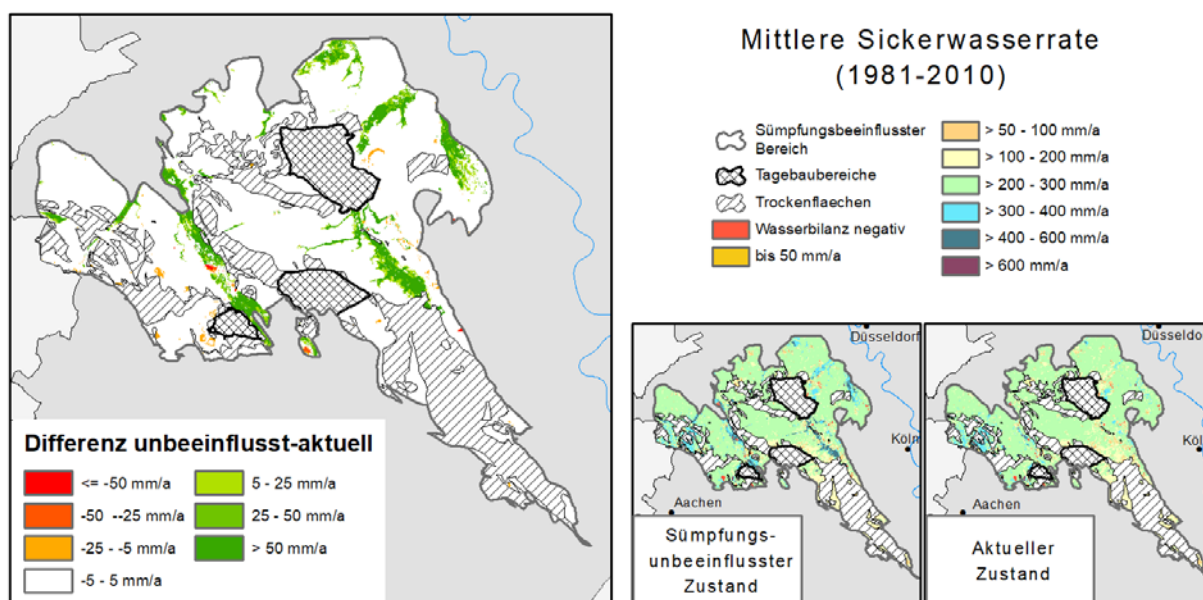
Hinsichtlich des Flurabstands des Grundwassers zeigen die in Abb. 9-1 dargestellten Beträge Differenzen von bis zu 50 m Metern und mehr. Es ist zu erwarten, dass der Flurabstand des Grundwassers um die in der Abb. 9-1 angegebenen Beträge abnimmt. Die entsprechenden Veränderungen infolge des Grundwasseranstiegs zeigen die Abb. 9-2 bis 9-10.





**Abb. 9-1:** Änderungen im Flurabstand des Grundwassers

Wie Abb. 9-2 zeigt treten Auswirkungen auf die Sickerwasserrate nur in den Flussniederungen auf. Durch den im sümpfungsunbeeinflussten Zustand hier vorhandenen Grundwassereinfluss kann gebildetes Sickerwasser kapillar im Boden wieder aufsteigen und dann innerhalb eines Bilanzjahres auch teilweise wieder versickern. Dadurch erhöht sich die Sickerwasserrate gegenüber dem aktuellen Zustand.



**Abb. 9-2:** Änderungen in der Sickerwasserrate

Aus Abb. 9-3 geht hervor, dass sich bei der Grundwasserneubildung im sümpfungsunbeeinflussten Zustand eine Abnahme von bis zu mehr als 75 mm/a ergeben kann, hiervon aber überwiegend nur Bereiche in den Flussniederungen von Rur und Erft betroffen sind. Ursache ist der dort zu erwartende Anstieg des Grundwasserflurabstands bis in den Tiefenbereich des Bodens, aus dem ein kapillarer Aufstieg von Wasser erfolgen kann, so dass entsprechend



mehr Wasser für den Verdunstungsprozess zur Verfügung steht und sich die (Netto-) Grundwasserneubildung in diesen Bereichen entsprechend verringert. Da in denselben Bereichen die Sickerwasserrate im sumpfungsunbeeinflussten Zustand erhöht ist (s.o.) verringert sich in diesen Regionen die Verweilzeit des Sickerwassers im Boden um max. 0.75 Jahre (Abb. 9-4).

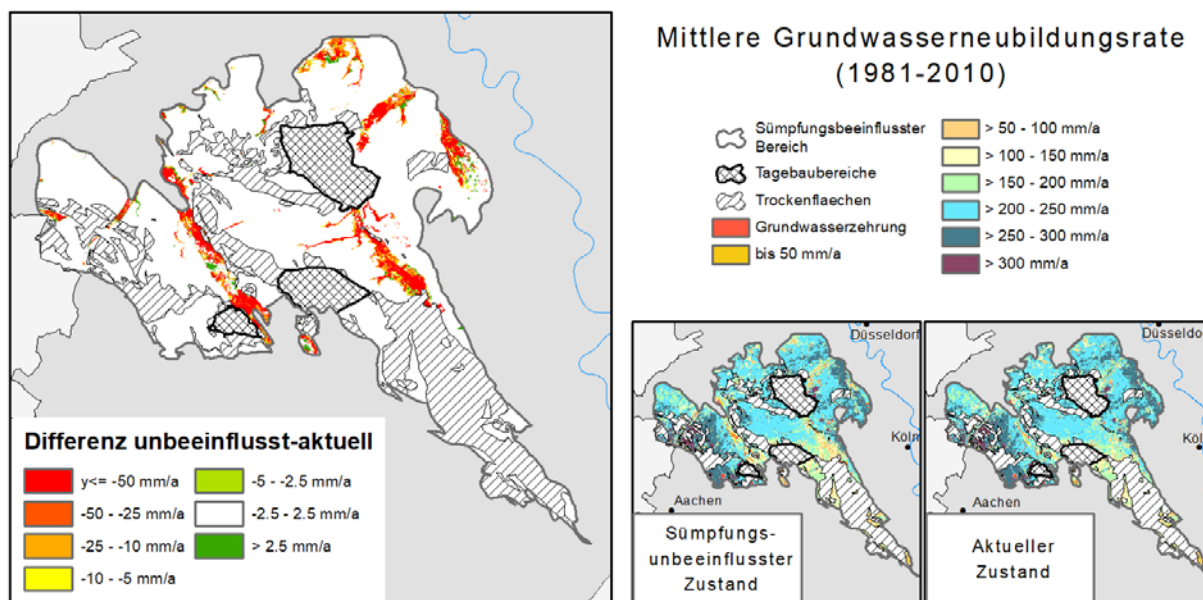


Abb. 9-3: Änderungen in der Grundwasserneubildungsrate

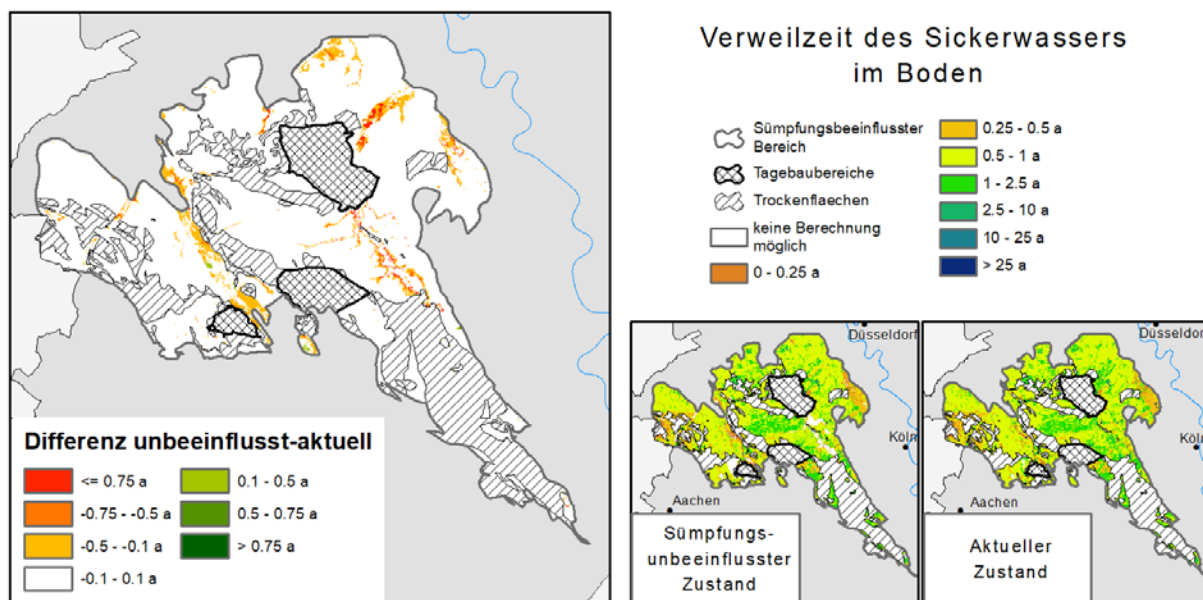
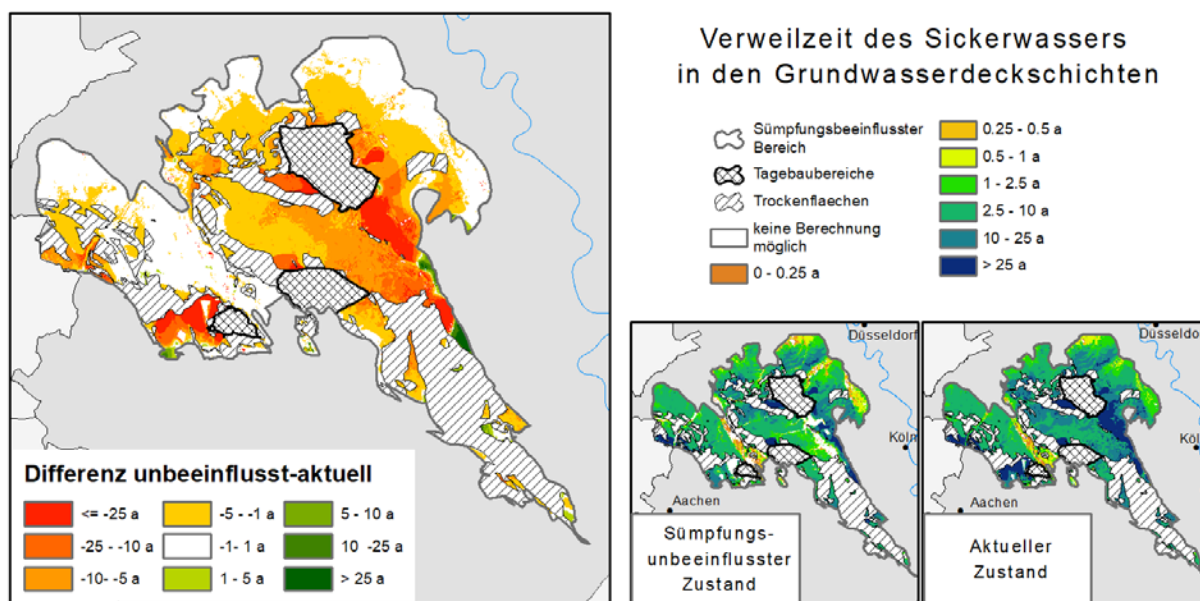
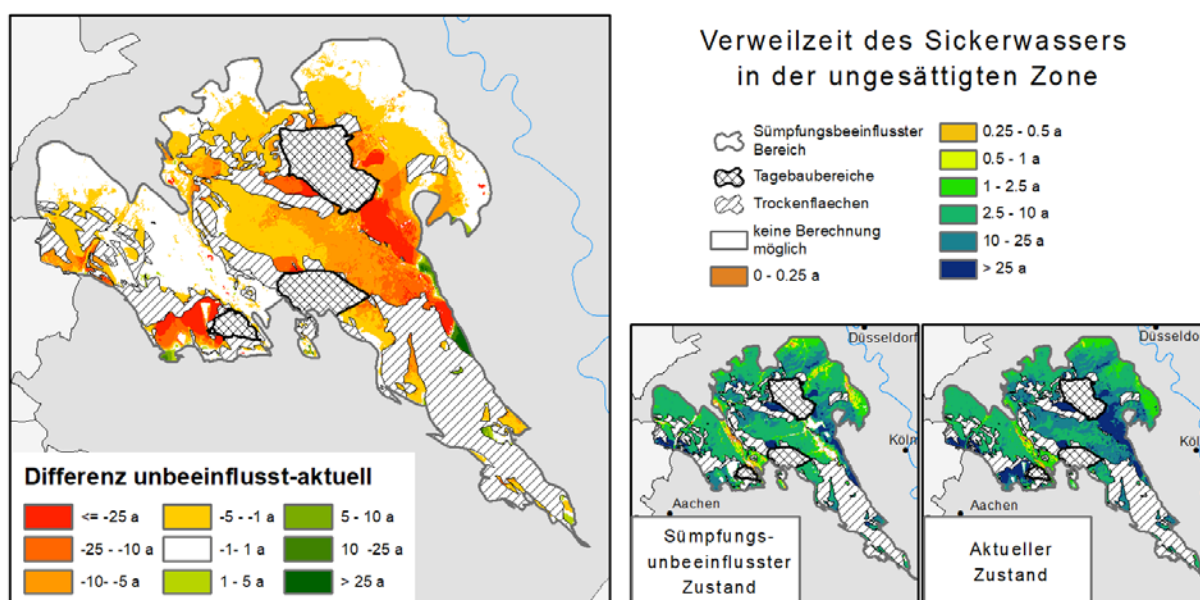


Abb. 9-4: Änderungen in der Verweilzeit des Sickerwassers im Boden

Im Hinblick auf die Verweilzeiten des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung (Abb. 9-5) bzw. in der gesamten ungesättigten Zone (Abb. 9-6) zeigen sich aufgrund der hohen Unterschiede beim Flurabstand (Abb. 9-1) im Einflussbereich der Sümpfungen entsprechende Abnahmen zwischen 5 und 25 Jahren. Nach DIN 19732 (vgl. Gleichung 3.3) verringert sich bei einer Abnahme des Flurabstands um 40 m und einer Grundwasserneubildung von 150 mm - selbst bei den in der Köln-Aachener Bucht verbreiteten Kiesen und Sanden mit geringem Wasserspeichervermögen mit einem beispielhaft angenommenen geringen FK-Wert von 5 mm - die Verweilzeit von 20 a auf ca. 6 Jahre.



**Abb. 9-5:** Änderungen in der Verweilzeit des Sickerwassers in den Grundwasserdeckschichten



**Abb. 9-6:** Änderungen in der Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone

Der zu erwartende Anstieg des Grundwassers in dem von Sümpfungsmaßnahmen beeinflussten Bereich des Rheinischen Reviers hat Auswirkungen auf die hydrodynamischen Verhält-

nisse im oberen Aquifer. Vor allem die hydraulischen Gradienten (Abb. 9-7) sind hiervon betroffen. Außerhalb der Kernbereiche der Tagebaue nehmen die hydraulischen Gradienten um weniger als ca. 0.1% ab, wohingegen innerhalb der Kernbereiche eine Abnahme von bis zu 5% und mehr erwartet werden kann. Wie zu erwarten nimmt die Abstandsgeschwindigkeit (Abb. 9-8) bedingt durch die geringeren hydraulischen Gradienten ab, und zwar in einer Größenordnung von ca. 1 m/d bis mehr als 10m/d.

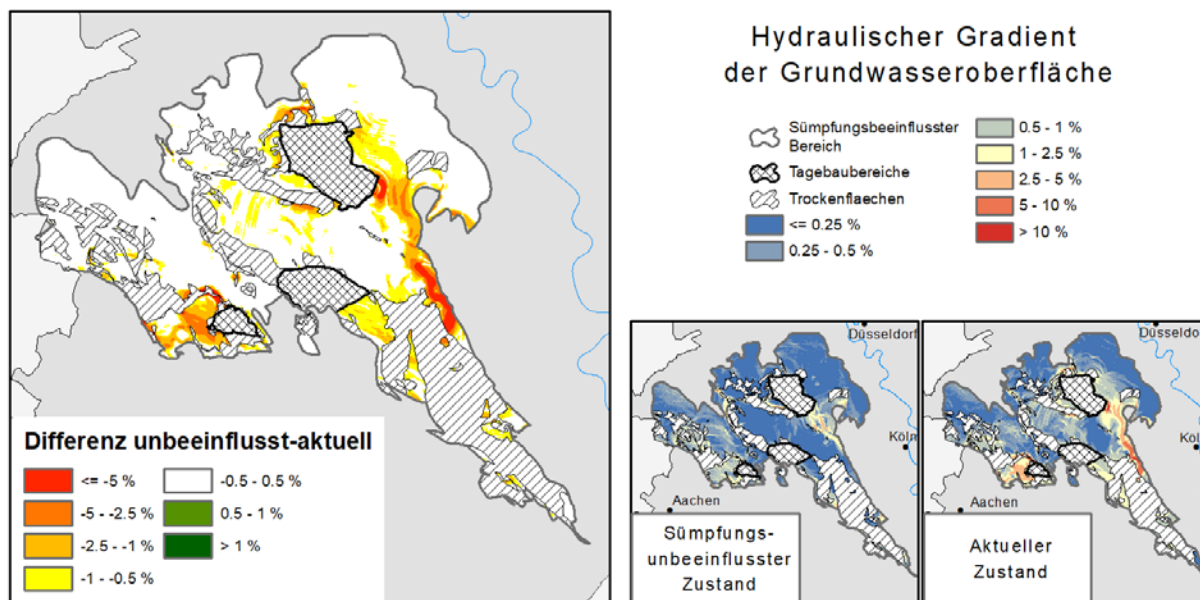


Abb. 9-7: Änderungen im hydraulischen Gradienten der Grundwasseroberfläche

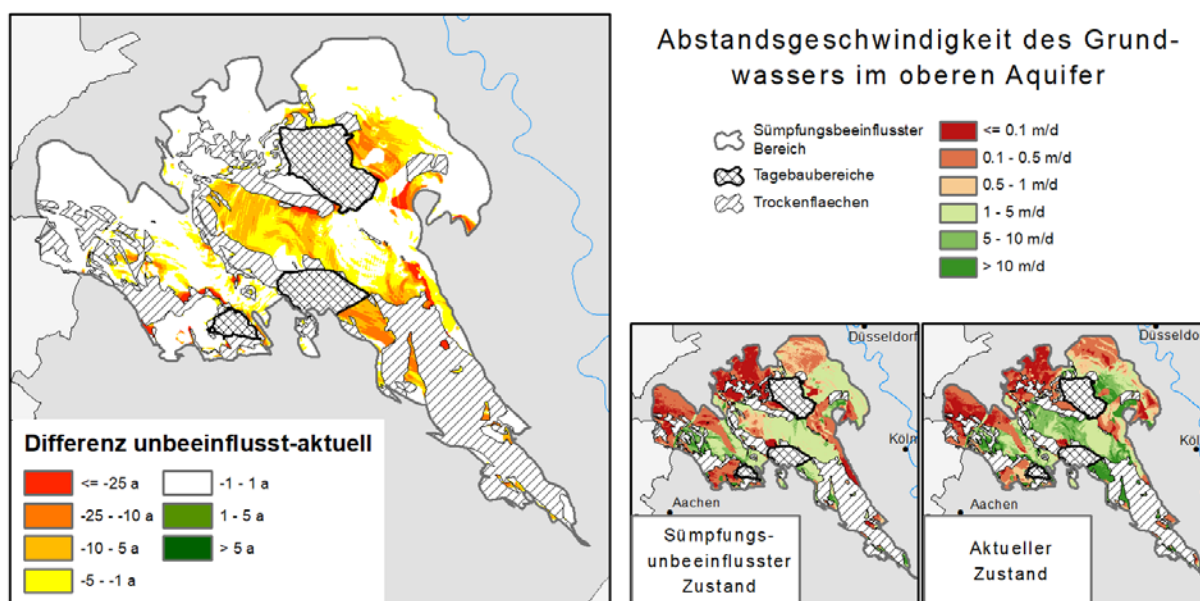
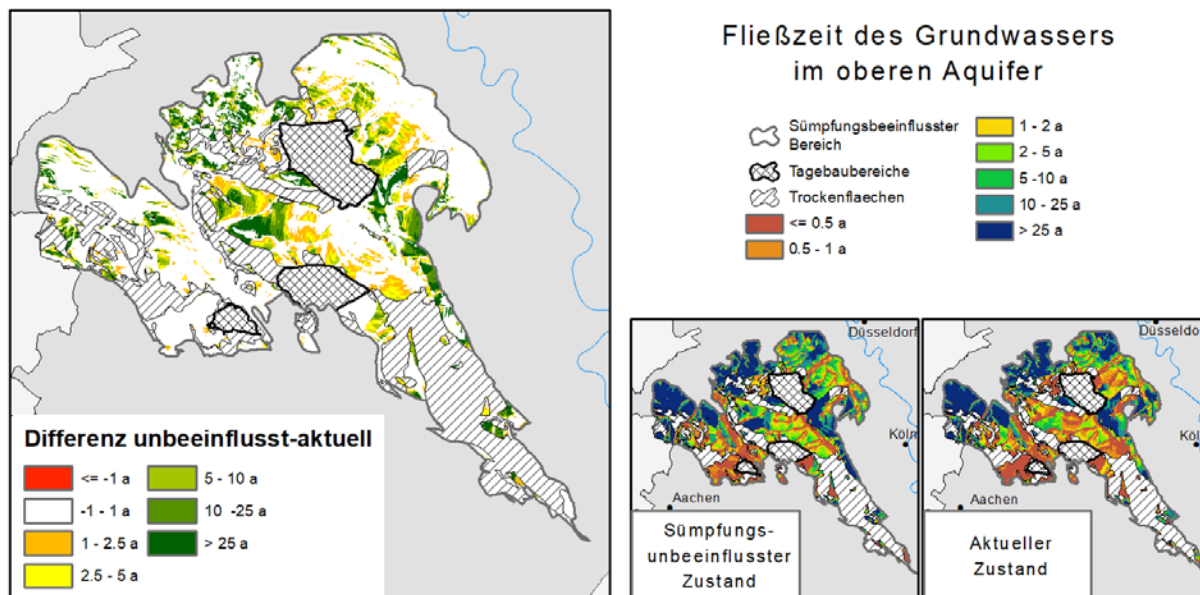


Abb. 9-8: Änderungen in der Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

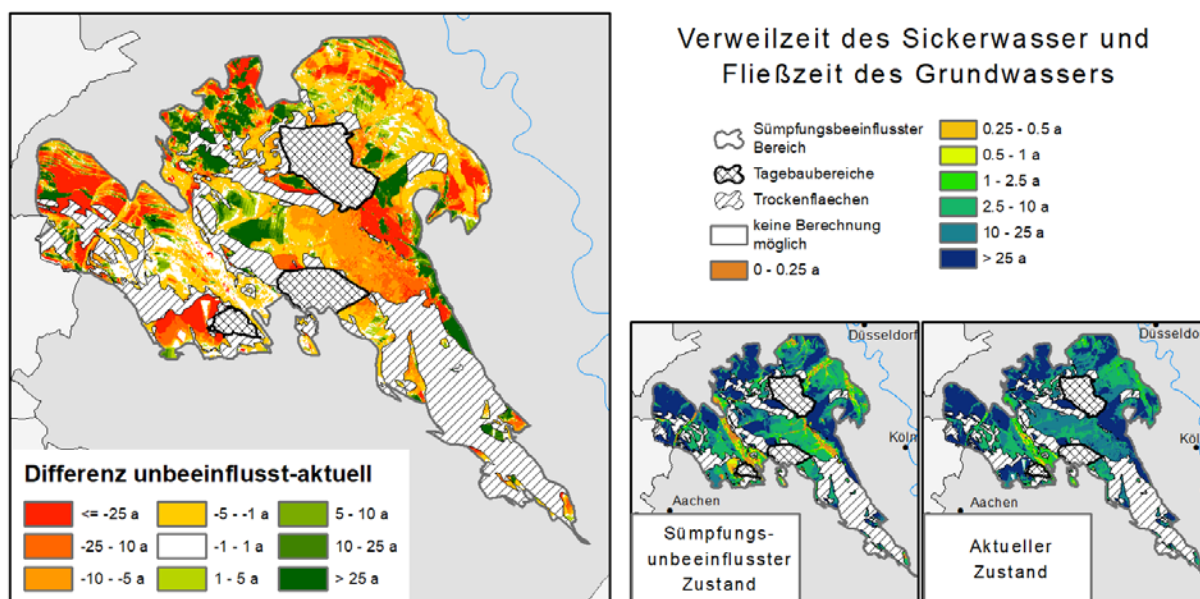


Die in Abb. 9-8 dokumentierte Änderung in der Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers setzt sich in Form einer Erhöhung der Fließzeit des Grundwassers (Abb. 9-9) bis Vorflutereintritt fort. So liegen die diesbezüglichen Änderungen in einer Größenordnung von ca. 1 Jahr bis mehr als 10 Jahren.



**Abb. 9-9:** Änderungen in der Fließzeit des Grundwassers

Bei der Gesamtsumme der Verweil- und Fließzeiten (Abb. 9-10) ergeben sich für den sümpfungsunbeeinflussten Zustand gegenüber dem aktuellen Zustand in einigen Bereichen Abnahmen von bis zu 25 a während in anderen Bereichen Zunahmen von ebenfalls bis zu 25 Jahren auftreten. In Teilbereichen bewirkt der abnehmende Flurabstand eine Abnahme der Verweilzeit in der ungesättigten Zone während die dort auftretende Abnahme des hydraulischen Gradienten eine Zunahme der Fließzeit im oberen Aquifer verursacht. Diese beiden gegenläufigen Effekte bewirken in diesen Bereichen, dass sich die Gesamtsummen der Verweil- und Fließzeiten nur geringfügig verändern.



**Abb. 9-10:** Gesamtsumme der Änderungen bei den Verweil- und Fließzeiten

Anhand von Abb. 9-10 wird allerdings auch deutlich, dass insgesamt die Abnahmen der Verweil- und Fließzeiten dominieren. Wie sich die beschriebenen Veränderungen in der Verweilzeit im Boden und Grundwasserdeckschichten sowie der Fließzeit im Aquifer im Zusammenspiel mit den Denitrifikationsprozessen in Böden und Aquifer auf die resultierenden Nitratkonzentrationen im Sickerwasser bzw. auf die N-Einträge in die Vorfluter auswirken, wird in den Teilberichten V und VII gesondert behandelt.



## 10 Verweil- und Fließzeitermittlung auf Grundwasserkörperebene

Für konkrete Einzelfallbetrachtungen an Messstellen, z.B. für die Suche nach einer Verschmutzungsquelle im Einzugsgebiet eines konkreten Trinkwasserbrunnens, sind zur Ermittlung der Verweil- und Fließzeiten im allgemeinen numerische Strömungsmodellierungen erforderlich. Deren Einsatz erfordert neben dem numerischen Rechenaufwand regionales Expertenwissen und lokale, zumeist aufwendige Datenerhebungen. Letzteres gilt auch für Altersdatierungen durch Tracer, mit denen sich Grundwasseralter direkt bestimmen lassen. Für einen Einsatz auf Landesebene kommen solche Verfahren schon aus Kostengründen nicht in Frage. Daher wurde für die hier zu bearbeitende Fragestellung, bei der es um Einstufungen auf Ebene der Grundwasserkörper geht, ein anderes, flächenbezogen durchführbares, Verfahren gewählt.

Im Rahmen der Umsetzung der EG-WRRL (2000) dienen Grundwassermessstellen vor allem dazu, den mengenmäßigen und chemischen Zustand der Grundwasserkörper zu ermitteln und die Wirksamkeit von Maßnahmenprogrammen, z.B. zur Reduktion des Nitratsintrags ins Grundwasser, zu überprüfen. Sie stehen daher nicht für sich bzw. für den konkreten Ort der Überwachung, sondern haben eine „repräsentative Funktion“ zur Darstellung der Beschaffenheit des zu beobachtenden Grundwasserkörpers und dessen anthropogene Beeinflussung durch die im Gebiet jeweils relevanten Landnutzungen. In der Praxis werden Grundwassermessstellen in einem Grundwasserkörper (GWK) dort installiert, wo im Hinblick auf die hydrogeologische Standortsituation sowie die festgestellten Belastungen eine große Repräsentativität vorliegt. Abnehmende Konzentrationen (Trends) an repräsentativen Grundwassermessstellen können nach entsprechender Verweil- und Fließzeit (Reaktionszeit) eine erfolgreiche und zielführende Umsetzung von Maßnahmenprogrammen an der betreffenden Grundwassermessstelle belegen. Die Verweil- und Fließzeit bis zum Erreichen einer Messstelle hängt von der Positionierung der Messstelle und deren Ausbau ab.

Die derzeitige Zusammensetzung des Grundwassermonitoringmessnetzes hinsichtlich Messstellenverteilung und Ausbau (Filterober- und Unterkante in Bezug auf den Ruhewasserspiegel und die Geländeoberkante) können vor diesem Hintergrund als „repräsentative“ Grundlage für die Ermittlung von Reaktionszeiten der jeweiligen Messnetze auf GWK-Ebene angesehen werden. Da bereits die Auswahl der Messstellen für das Grundwassermonitoringmessnetz unter dem Aspekt der Repräsentativität getroffen wurde, können über die typischerweise festzustellende Filterlage und Positionierung dieser Messstellen „repräsentative“ Verweil- und Fließzeiten auf GWK-Ebene abstrahiert werden. Durch Verwendung der statistischen Kenngrößen zu den im GWK verteilten Messstellen (hinsichtlich Filterlage und –länge) können somit repräsentative Verweil- und Fließzeiten bis zum Erreichen typischerweise vorhandener Brunnen, Pegel und sonstigen Grundwasseraufschlüsse für einen GWK im obersten wasserwirtschaftlich bedeutenden Grundwasserleiter abgeleitet werden.

## 10.1. Verweilzeiten in der ungesättigten Zone

Die in Kap. 3 beschriebenen Verfahren nach DIN 19732 und Hölting et al. (1995) zur Ermittlung der Verweilzeiten im Boden und in den Grundwasserdeckschichten bis zum Erreichen der Grundwasseroberfläche kommen auch bei der Verweil- und Fließzeitenermittlung auf GWK-Ebene zum Einsatz. Für die flächenhafte Anwendung des Verfahrens auf Landesebene wurden Datengrundlagen aus auf Bundeslandebene verfügbaren Kartenwerken eingesetzt. Die gleichen Datengrundlagen wurden für die Berechnung der Verweilzeiten auf GWK-Ebene übernommen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für die Verweilzeitenermittlung auf GWK-Ebene – sofern vorhanden – auch Daten aus lokalen Datenerhebungen bzw. Lokalestudien übernommen werden können.

## 10.2. Fließzeitenermittlung mit dem Teufe- Neubildungsverfahren

Das Teufe- Neubildungsverfahren Hansen et al. (2018) basiert auf einer Kombination eines einfachen Wasserbilanzansatzes mit der Beschreibung der Grundwasserströmung nach Darcy.

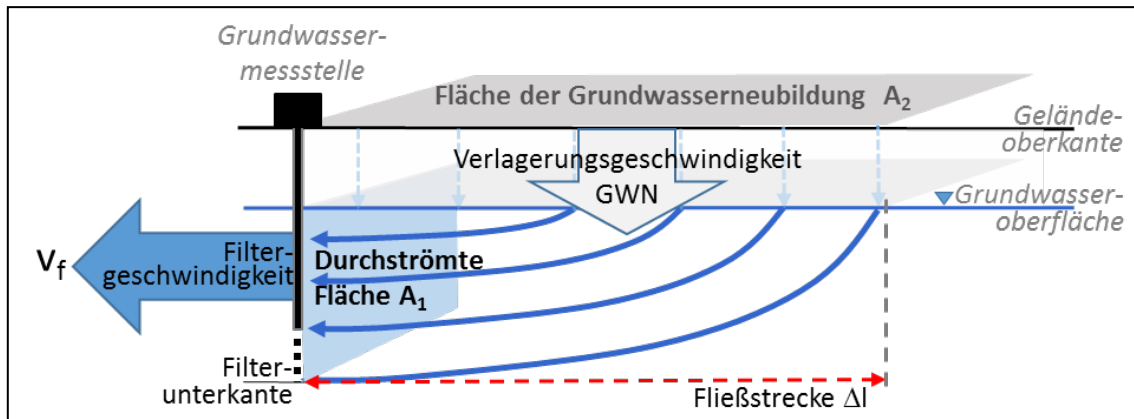
Die Wasserbilanz bezieht sich auf einen Stromstreifen mit einer spezifischen Fläche im Zustrom einer Grundwassermessstelle (Abb. 10-1). Für eine vereinfachte Berechnung wird dessen Breite standardmäßig auf einen Meter festgelegt. Wasser, welches innerhalb der spezifischen Fläche ( $A_2$ ) versickert und als Grundwasserneubildung die gesättigte Zone erreicht, muss auf Höhe der Messstelle eine definierte Fläche ( $A_1$ ) mit einer bestimmten Filtergeschwindigkeit durchströmen.

$$\boxed{\frac{A_1}{A_2} = \frac{GWN_{Mittel}}{v_f}} \quad (Gl. 10-1)$$

mit:

|                  |                                                                |
|------------------|----------------------------------------------------------------|
| $A_1$ :          | Durchströmte Querschnittsfläche im Grundwasserleiter [ $m^2$ ] |
| $A_2$ :          | Fläche der Grundwasserneubildung im Zustrom [ $m^2$ ]          |
| $GWN_{Mittel}$ : | mittlere Grundwasserneubildung auf der Fläche $A_2$ [ $m^2$ ]  |
| $v_f$ :          | Filtergeschwindigkeit [ $m/s$ ]                                |

Flächen und Geschwindigkeiten stehen hierbei entsprechend Gl. 10-1 im Verhältnis zueinander. Je größer die Fläche der Grundwasserneubildung ( $A_2$ ) relativ zu der durchströmten Fläche  $A_1$  ist, desto größer ist auch die Filtergeschwindigkeit gegenüber der Verlagerungsgeschwindigkeit, mit der das Wasser bei der Neubildung in das Grundwasser übertritt (GWN). Auch die Grundwasserneubildung weist die Dimension einer Geschwindigkeit auf [ $mm/a$ ].



**Abb. 10-1:** Schematische Darstellung der zugrundeliegenden Abhängigkeiten des Teufen-Neubildungsverfahrens.

Unter stationären Bedingungen sind die Volumenströme durch die Bilanzflächen A1 und A2 identisch. Die Größe der Bilanzfläche A1 ergibt sich aus der grundwassererfüllten Mächtigkeit oberhalb eines Bezugsniveau (z.B. die Filtertiefe der Messstelle) sowie der Breite des Stromstreifens (standardmäßig ein Meter).

Formell werden die über die Filtertiefe (F) und Breite des Stromstreifens (b) sowie über Fließstrecke und Breite (b) definierten Flächen in der Gl. 10-2 ins Verhältnis zur mittleren Grundwasserneubildungsrate und Filtergeschwindigkeit gesetzt. Die Breite (b) des Stromstreifens ist für beide Flächen gleich und kann daher in der Gl. 10-2 herausgekürzt werden. Bei bekannter Grundwasserneubildung im Zustrom der Messstelle und Filtergeschwindigkeit im Bereich der Messstelle kann die Größe der erforderlichen Neubildungsfläche berechnet werden. Da die Breite des Stromstreifens in beiden Flächen gleich ist, geht letztendlich nur die Fließstrecke als Variable ein, um die für den äquivalenten Volumenstrom aus der Neubildung benötigte Fläche zu erreichen:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{(F - GWO) \cdot b}{\Delta l \cdot b} = \frac{GWN_{Mittel}}{v_f} \quad (\text{Gl. 10-2})$$

mit:

- F:* Filtertiefe [m NHN oder m u GOK]  
*GWO:* Lage der Grundwasseroberfläche [m NHN oder m u GOK]  
*b* Breite des Stromstreifens, standardmäßig 1 m [m]  
*Δl* Fließstrecke [m]  
 übrige Erläuterungen siehe Gl. 10-1

Ersetzt man die Filtergeschwindigkeit durch den hydraulischen Gradienten im Zustrom der Messstelle und den  $k_f$ -Wert, ergibt sich schließlich die Fließstrecke wird zu:

$$\boxed{\text{Fließstrecke } \Delta l = \frac{(F - GWO) \cdot v_f}{GWN_{\text{Mittel}}} = \frac{(F - GWO) \cdot k_f \Delta h}{GWN_{\text{Mittel}} \Delta l}} \quad (\text{Gl. 10-3})$$

mit:

$\Delta h$             hydraulischer Gradient [ ]

$k_f$             Durchlässigkeitsbeiwert der Grundwasser führenden Gesteine [m/s]

übrige Erläuterungen siehe Gl. 10-1 und Gl. 10-2

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

Durch Einsetzen der Gl. 10-3 in die Darcy-Gleichung ergibt sich die folgende vereinfachte Formulierung zur Berechnung der Fließzeit (Gl. 10-4):

$$\boxed{t = (F - GWO) \frac{n_{eff}}{GWN_{\text{Mittel}}}} \quad (\text{Gl. 10-4})$$

mit:

$t$ :            Fließzeit [a]

$n_{eff}$ :        speichernutzbare / durchflusswirksames Porenvolumen

übrige Erläuterungen siehe Gl. 10-1, Gl. 10-2 und Gl. 10-3

### 10.3. Datengrundlagen

Die meisten Eingabedaten, die zur Fließzeitermittlung mit dem Teufe- Neubildungsverfahren benötigt werden, sind bereits in Kap. 5 in Zusammenhang mit der flächendeckenden Fließ- und Verweilzeitenmodellierung diskutiert worden (nutzbarer Hohlraumanteil, vgl. Abb. 5-20, Grundwasserneubildung, vgl. Abb. 5-22 und Modell der Grundwasseroberfläche, vgl. Abb. 5-5). Ergänzend werden grundwassermessstellenbezogene Datengrundlagen benötigt (Filteroberkante, Filterunterkante). Tab 10-1 fasst die Datengrundlagen zur Anwendung des Teufe-/Neubildungsverfahrens zusammen.

**Tabelle 10-1:** Datengrundlagen für die Berechnung der Fließzeiten im Grundwasser

| Parameter                                                   | Datenquelle<br>punktbezogene Berechnung    |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Mittlere kf-Wert des Profilabschnittes zwischen GWO und FUK | HK 100 (GD NRW)                            |
| Höhe der Grundwasseroberfläche                              | Messstellenbezogene Angabe                 |
| Filterunterkante und Filteroberkante                        | Messstellenbezogene Angabe                 |
| Hydraulischer Gradient                                      | Delta h – Modell der Grundwasseroberfläche |
| Grundwasserneubildung                                       | mGROWA-Modellergebnis                      |
| Durchflusswirksamer Hohlraumanteil                          | WEKU-Modellergebnis                        |

## 10.4 Generelle Überlegungen und Vorgehensweise zur Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten auf Grundwasserkörperebene

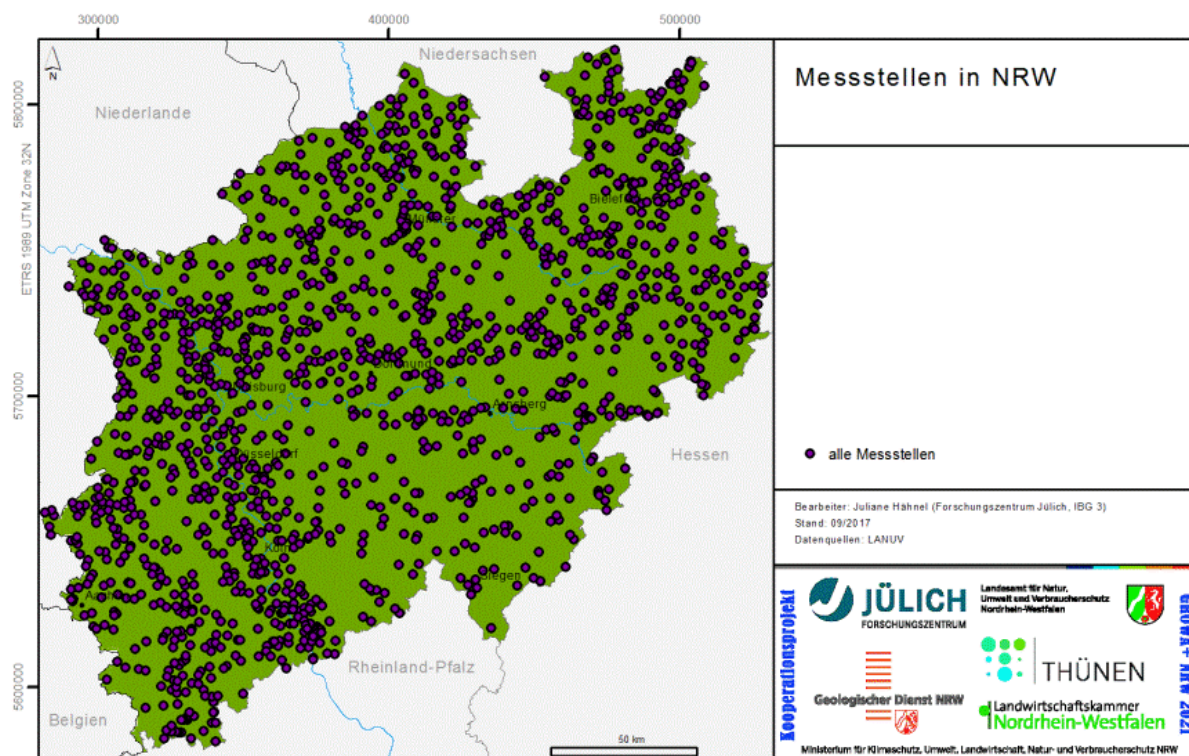
Für die wasserwirtschaftliche Praxis sind weniger die im Rahmen der Arbeit von Hansen et al. (2018) explizit für Einzelmessstellen bestimmten Verweil- und Fließzeiten von Relevanz als vielmehr repräsentative Verweil- und Fließzeiten für Grundwasserkörper. Für das vom Bundesland NRW aufgebauten Grundwassermonitoringmessnetz wurden bereits solche Grundwassermessstellen ausgewählt, bei denen im Hinblick auf die hydrogeologische Standortsituation sowie die festgestellten qualitativen Belastungen eine große Repräsentativität vorliegt. Dementsprechend können diese Messstellen auch als geeignete Grundlage für die Ermittlung von repräsentativen Verweil- und Fließzeiten (Reaktionszeiten) auf GWK-Ebene angesehen werden.

Idealerweise stehen für ein Bundesland so viele nach den oben beschriebenen Kriterien ausgewählte repräsentative Grundwassermessstellen zur Verfügung, dass für jeden GWK repräsentative Reaktionszeiten abgeleitet werden können. Auf diese Weise könnte zudem die Wirkung regionaler hydrogeologischer Unterschiede auf die Verweil- und Fließzeiten sehr gut abgebildet werden.

In NRW standen für die hier durchgeführte Auswertung zu Messstellenausbau bzw. Messstellenverteilung (Filterlage, Filtertiefe) landesweit insgesamt 1134 Grundwassermessstellen des aktuellen Monitoringmessnetzes (Stand 12/2017) mit den dazu notwendigen Angaben zur Verfügung. (Abb. 10-2). Die räumliche Verteilung und Dichte des Grundwassermonitoringmessnetzes ist jedoch vor allem in der Festgesteinsregion NRWs für eine landesweit konsistente Anwendung des Teufe-Neubildungsverfahrens auf Ebene von Grundwasserkörpern zu gering. Aus diesem Grunde wurden zunächst zwölf Gebiete, basierend auf den so genannten Teileinzugsgebieten (TEZG) gemäß den Einteilungen nach EG-Wasserrahmenrichtlinie als Gebietskulisse für die Verweil- und Fließzeitermittlung gewählt. Abb. 10-3 zeigt deren geografische Lage, in Tab 10-2 ist Verteilung der Grundwassermessstellen auf die aggregierten Teileinzugsgebiete und deren Verteilung hinsichtlich der Filtertiefen dargestellt, und zwar für das



20%-, 50%- und 80%-Perzentil der für die weiteren Schritte als repräsentativ angesehenen Filtermitten der Grundwassermessstellen in den TEZG.



**Abb. 10-2:** in NRW verfügbare Messstellen zum Grundwasser

Zwar werden durch die Auswahl der TEZG als räumliche Bezugskulisse regionale hydrogeologische Unterschiede in TEZG mit heterogenen hydrogeologischen Verhältnissen (Bsp. Rur-Einzugsgebiet), die sich unter Umständen auf den typischen Messstellenausbau auswirken können, nicht in voller Detailliertheit abgebildet, jedoch ist bei dieser Gebietskulisse sichergestellt, dass eine dennoch regionaltypische Messstellenverteilung bei der für die Anwendung des Teufe-/Neubildungsverfahrens benötigten Angaben zu den Filtertiefen verwendet werden kann, so dass repräsentative Verweil- und Fließzeiten für alle GWK flächendeckend in NRW abgeleitet werden können.

Wie aus Tab 10-2 hervorgeht, wurden in die Ermittlung der für die TEZG repräsentativen Filtertiefen auf TEZG-Ebene Daten aus insgesamt 1134 Grundwassermessstellen NRWs einbezogen. Unterschiede in der Verteilung der Messstellen auf die Teileinzugsgebiete zwischen 36 (Emscher) und 199 (Ems/Haase) sind bedingt durch die unterschiedliche Größe und wirtschaftliche Bedeutung der Teileinzugsgebiete sowie durch unterschiedliche Anforderungen an die jeweilige Messstellendichte, die sich insbesondere dadurch unterscheidet, ob nur eine überblicksweise oder auch eine operative Überwachung in einem GWK gefordert ist.

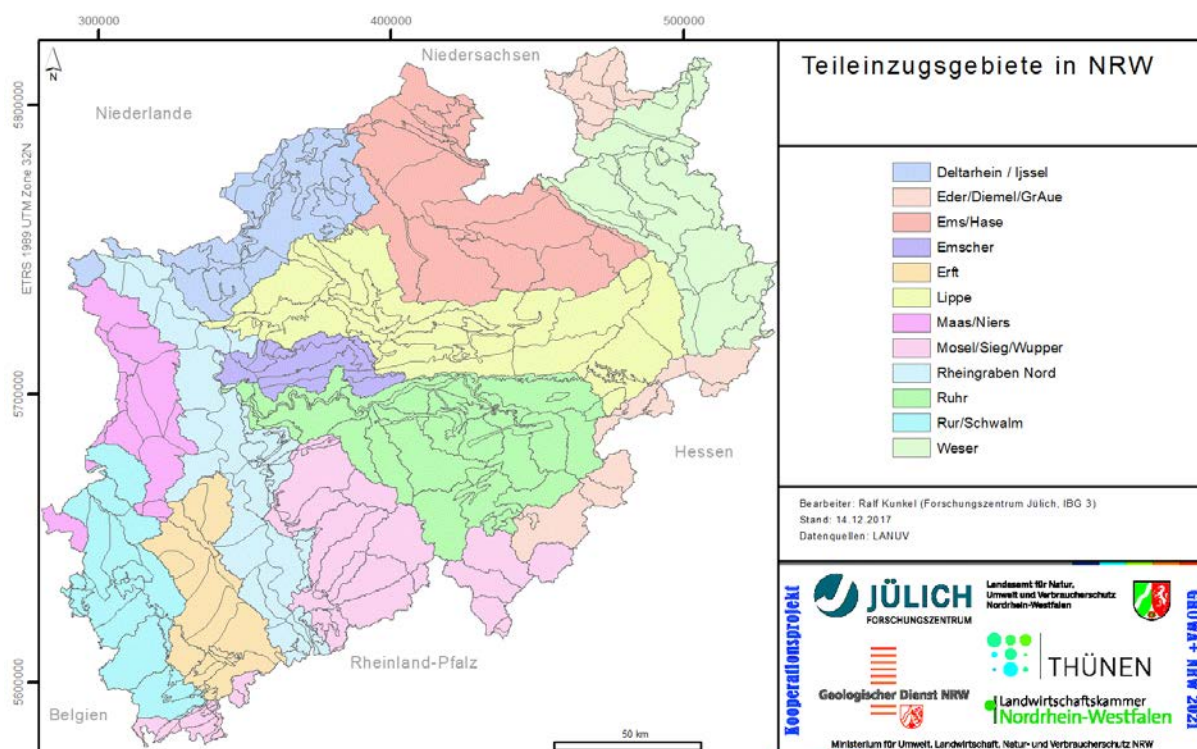


Abb. 10-3: Teileinzugsgebiete NRW

Tabelle 10-2: Anzahl der Grundwassermessstellen und Lage der 20%-, 50%- und 80%-Perzentile der Filtertiefen in den Teileinzugsgebieten NRW

| Teileinzugsgebiete |                     | Anzahl Grundwassermessstellen | Filtermitte unter Grundwasseroberfläche (m) |            |             |
|--------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|------------|-------------|
|                    |                     |                               | P 20                                        | P 50       | P 80        |
| 1                  | Mosel/Sieg/Wupper   | 46                            | 1.4                                         | 4.5        | 14.9        |
| 2                  | Rheingraben Nord    | 155                           | 2.4                                         | 5.7        | 9.6         |
| 3                  | Erft                | 64                            | 2.1                                         | 4.0        | 9.0         |
| 4                  | Ruhr                | 46                            | 1.0                                         | 7.9        | 18.0        |
| 5                  | Emscher             | 36                            | 2.4                                         | 4.1        | 6.0         |
| 6                  | Lippe               | 163                           | 2.6                                         | 3.5        | 7.4         |
| 7                  | Deltarhein / IJssel | 88                            | 2.7                                         | 4.0        | 9.0         |
| 8                  | Maas/Niers          | 80                            | 3.5                                         | 5.9        | 9.1         |
| 9                  | Rur/Schwalm         | 80                            | 2.7                                         | 5.0        | 15.3        |
| 10                 | Ems/Hase            | 199                           | 3.0                                         | 4.6        | 8.7         |
| 11                 | Weser               | 132                           | 2.7                                         | 6.0        | 19.2        |
| 12                 | Eder/Diemel/GrAue   | 45                            | 2.0                                         | 5.5        | 15.4        |
| <b>NRW Gesamt</b>  |                     | <b>1134</b>                   | <b>2.6</b>                                  | <b>4.8</b> | <b>10.5</b> |

Das 20%-Perzentil der Filtermitten liegt in den 12 Teileinzugsgebieten zwischen 1,0 Meter (Teileinzugsgebiet Ruhr) und 3,5 Metern (Teileinzugsgebiet Maas/Niers) unter der Grundwasseroberfläche (Ruhewasserspiegel). Beim 50%-Perzentil treten dagegen Werte zwischen 3,5 Metern (Teileinzugsgebiet Lippe) und 7,9 Metern (Ruhr) auf. Erwartungsgemäß liegen die 80%-Perzentile der Filtermitten in den Teileinzugsgebieten am höchsten, und zwar zwischen 6,0 Metern (Teileinzugsgebiet Emscher) und 19,2 Metern (Teileinzugsgebiet Weser).

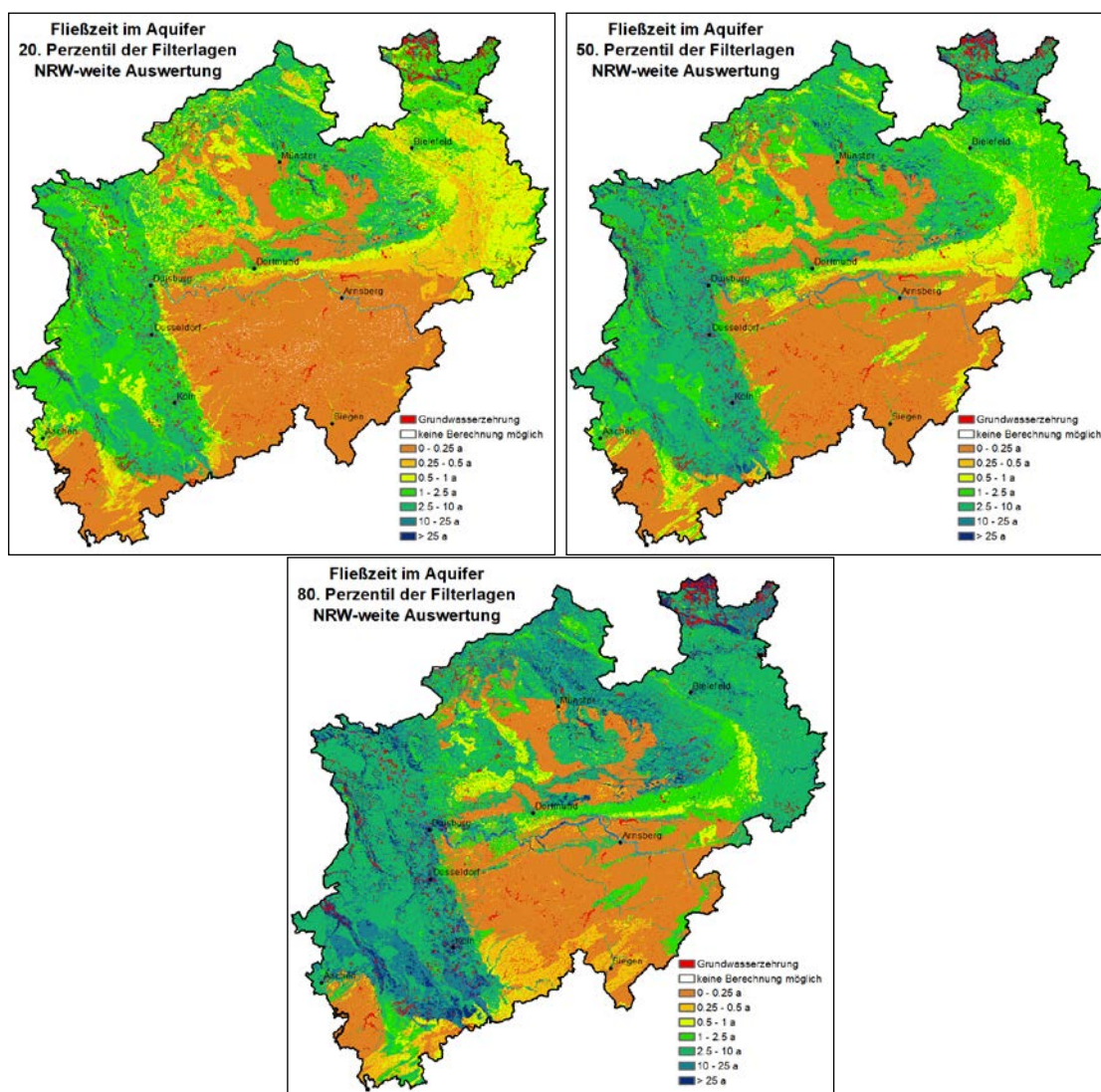
## **10.5 Ergebnisse zur Verweil- und Fließzeitermittlung für GWK**

In den folgenden Kapiteln sind die wesentlichen Arbeitsschritte und Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

### **10.5.1 Grundwasserfließzeiten auf Rasterebene auf Basis der für Teileinzugsgebiete ermittelten Filtertiefen**

Zur Fließ- und Reaktionszeitermittlung wurde das Teufe-Neubildungsverfahren eingesetzt. Hierzu wurden in einem ersten Schritt flächendeckend für NRW auf Rasterbasis die Fließzeiten nach Gl. 10.4 berechnet. Während die Eingabedaten Grundwasserneubildung und nutzbarer Hohlraumanteil bekannt waren, musste eine Annahme über die Filtertiefen getroffen werden. Hierzu wurden die in Tab. 10.2 aufgeführten und auf Basis der Teileinzugsgebiete ermittelten Filtertiefen herangezogen. Für die teileinzugsgebietsbezogenen Perzentile der Filtertiefen (P 20, P 50, P 80) wurden in einem ersten Schritt nach Gl. 10.4 für jede Rasterzelle die Fließzeiten im Aquifer bis zum Erreichen der jeweiligen Filtertiefe abgeschätzt.

In Abbildung 10-4 sind die sich ergebenden Fließzeiten des Grundwassers im Aquifer bis zum Erreichen der 20%-, 50%- und 80%-Perzentile der Filtermitten der Grundwassermessstellen in den Teileinzugsgebieten dargestellt.



**Abb. 10-4:** Fließzeiten des Grundwassers für die 20%- und 50%- Perzentile (oben) der Filtermitten und für das 80%-Perzentil) in den Teileinzugsgebieten

Wie Abb. 10-4 zeigt, liegen die Fließzeiten des Grundwassers in der Festgesteinsregion unabhängig von den Perzentilen der Filtermitten bei weniger als einem Jahr. In der Lockergesteinsregion sind die Fließzeiten aufgrund der höheren effektiven Hohlraumanteile erwartungsgemäß größer als in der Festgesteinsregion. Zudem sind in der Lockergesteinsregion die Unterschiede der Fließzeiten zwischen den Perzentilen größer und liegen zwischen weniger als 5 Jahren beim 20%-Perzentil und mehr als 25 Jahren beim 80%-Perzentil.

### 10.5.2 Reaktionszeit innerhalb der Rasterflächen und Häufigkeitsverteilung der Reaktionszeiten auf Ebene der Grundwasserkörper

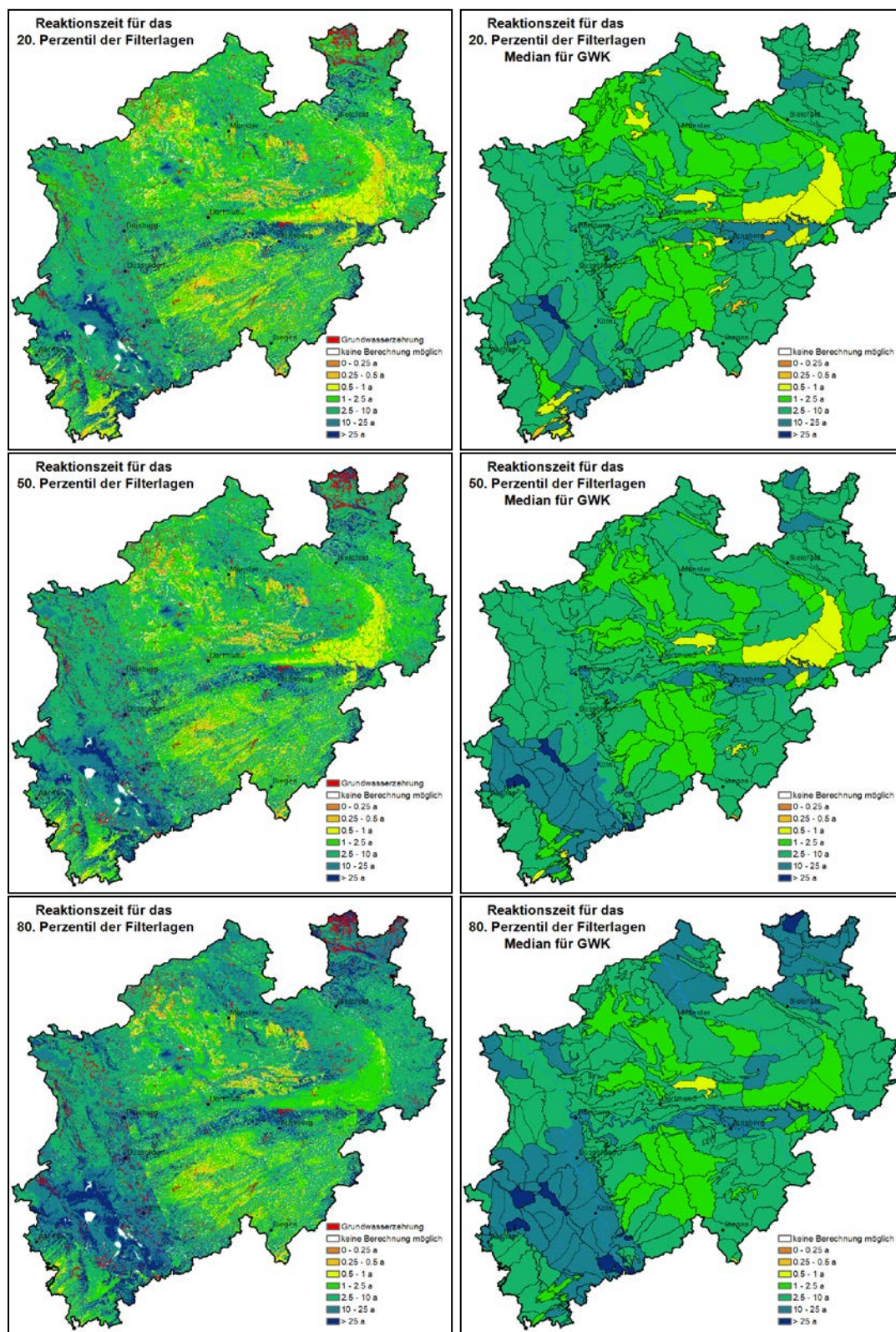


Die Reaktionszeit ist definiert als die Summe aus der Verweilzeit in der ungesättigten Zone und der Grundwasserfließzeit. In einem zweiten Schritt wurden durch Addition der Verweilzeiten die Reaktionszeiten für jede Rasterzelle ermittelt. Um zu Aussagen für Grundwasserkörper zu kommen wurden die Messstellenausbaubedingt variierenden Reaktionszeiten für die P20, P50 und P80 Perzentile der Filtertiefen in einem dritten Schritt über die Fläche der einzelnen GWK gemittelt. Ausgegeben wurde absprachegemäß der Median aller ausbaubedingt variierenden Reaktionszeiten in einem GWK.

Abb. 10-5 (links) zeigt die durch Summation der berechneten Verweilzeit in der ungesättigten Zone (siehe Abb. 6-5) mit den über das Teufe-/Neubildungsverfahren berechneten Fließzeiten des Grundwassers im Aquifer bis zum Erreichen der 20%-, 50%- und 80%-Perzentile der Filtermitten der Grundwassermessstellen für die einzelnen Rasterzellen der Teileinzugsgebiete. Die Reaktionszeiten umfassen einen weiten Bereich zwischen weniger als 0,5 Jahren und mehr als 25 Jahren. Dabei zeigt sich, dass die Verweil- und Fließzeiten von den 20%-, über die 50%- bis zu den 80%-Perzentilen der mittleren Filtertiefen erwartungsgemäß zunehmen. Die großen Unterschiede zwischen Locker- und Festgestein, die sich bei den Fließzeiten des Grundwassers zeigen, gleichen sich durch die im Allgemeinen höheren Grundwasserflurabstände und die dadurch bedingten höheren Verweilzeiten in der ungesättigten Zone ein Stück weit an.

Abb. 10-5 (rechts) zeigt die basierend auf den 20%-, 50%- und 80%-Perzentilen der einzelnen Rasterzellen (Abb. 10-5, links) ermittelten Reaktionszeiten auf der Ebene von Grundwasserkörpern. Die Reaktionszeiten auf GWK-Ebene nehmen von den 20%-, über die 50%- bis zu den 80%-Perzentilen erwartungsgemäß zu. Am deutlichsten sind die Unterschiede in den GWKs der Lockergesteinsregion. Dort verdoppeln sich die Verweil- und Fließzeiten in vielen GWKs. In vielen GWKs der Niederrheinischen Bucht nimmt so beispielsweise die Reaktionszeit von 2,5 – 5 Jahren für die 20%- Perzentile auf häufig 5-10 Jahre für die 80%- Perzentile bzw. in der Köln-Aachener Bucht von 5-10 Jahren auf 10 - 25 Jahre zu. In den GWKs der Lockergesteinsregion des Münsterlandes verdoppeln sich die Verweil- und Fließzeiten ebenfalls, jedoch liegen die Werte auf einem insgesamt niedrigeren Niveau als in den linksrheinischen GWKs und bleiben selbst beim 80%-Perzentilwert unterhalb von 10 Jahren. Bei den GWKs der Festgesteinsregion sind die Unterschiede zwischen den Perzentilen dagegen deutlich geringer. Selbst der 80%-Perzentilwert der Reaktionszeit eines GWK liegt dort in der Regel in der gleichen Klasse wie der Verweil- und Fließzeitenwert des 20%-Perzentilwerts.





**Abb. 10-5:** 20%-, 50%- und 80%-Perzentile der Reaktionszeiten (links) und als Median für die Grundwasserkörper (rechts)

### 10.5.3 Räumliche Verteilung der Reaktionszeiten innerhalb der GWK

Auf Basis der Verweil- und Fließzeiten des 50%- Perzentils der Filterlagen wurde abschließend eine Analyse der räumlichen Verteilung der Reaktionszeiten innerhalb der 275 GWK vorgenommen, die sich – unabhängig vom Messstellenausbau – v.a. aufgrund der räumlich unterschiedlichen Standortbedingungen innerhalb der GWK ergibt.

Tab. 10-3 zeigt beispielhaft die sich für einzelne GWK ergebenden Häufigkeitsverteilungen der Reaktionszeiten für die in Abb. 10-6 (links Mitte) angegebenen Klassengrenzen der Kartenlegende. Die in Tab. 10-3 ausschnittsweise dargestellten Ergebnisse liegen in identischer Weise für alle 275 Grundwasserkörper NRWs vor. Bei Bedarf können mit GIS leicht Auswertungen für weitere Gebietskulissen erzeugt werden.

**Tabelle 10-3:** beispielhafte Häufigkeitsverteilung der standörtlich variierenden Reaktionszeiten für das 50%-Perzentil der Filtertiefen auf Ebene der Grundwasserkörper

| Gwk_ID | Fläche (ha) | Zehrgebiete | 0 - 2.5 a | 0.25 - 0.5 a | 0.5 - 1 a | 1 - 2.5 a | 2.5 -10 a | 10 - 25 a | > 25 a |
|--------|-------------|-------------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 258_01 | 1861        | 4.8%        | 4.6%      | 15.6%        | 15.6%     | 11.9%     | 22.0%     | 22.7%     | 2.6%   |
| 258_02 | 15384       | 2.8%        | 2.5%      | 3.2%         | 5.5%      | 16.1%     | 55.9%     | 12.7%     | 1.4%   |
| 258_03 | 874         | 2.9%        | 6.6%      | 67.3%        | 15.6%     | 4.1%      | 2.1%      | 1.3%      | 0.2%   |
| 26_01  | 6325        | 3.3%        | 1.1%      | 3.1%         | 9.8%      | 16.1%     | 53.8%     | 12.3%     | 0.6%   |
| 26_03  | 2473        | 2.1%        | 7.3%      | 12.7%        | 52.6%     | 24.3%     | 0.4%      | 0.2%      | 0.5%   |
| 26_04  | 76          | 6.6%        | 0.0%      | 2.6%         | 7.9%      | 21.1%     | 59.2%     | 2.6%      | 0.0%   |
| 27_01  | 9658        | 6.4%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.1%      | 0.1%      | 62.1%     | 16.3%     | 15.0%  |
| 27_02  | 7745        | 3.7%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 0.2%      | 64.9%     | 18.4%     | 12.7%  |
| 27_03  | 14366       | 6.7%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 0.7%      | 74.7%     | 8.9%      | 9.0%   |
| 27_04  | 16104       | 9.4%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 1.6%      | 75.1%     | 7.8%      | 6.1%   |
| 27_05  | 10312       | 3.1%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 0.4%      | 68.6%     | 7.6%      | 20.3%  |
| 27_06  | 10696       | 5.7%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 1.0%      | 73.7%     | 11.7%     | 8.0%   |
| 27_07  | 6247        | 9.6%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 16.8%     | 66.3%     | 4.8%      | 2.5%   |
| 27_08  | 30447       | 3.6%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 0.2%      | 76.7%     | 13.8%     | 5.8%   |
| 27_09  | 15232       | 2.8%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 0.0%      | 71.9%     | 17.0%     | 8.3%   |
| 27_10  | 22136       | 2.4%        | 0.0%      | 0.1%         | 0.5%      | 0.8%      | 57.1%     | 24.3%     | 14.7%  |
| 27_11  | 2840        | 1.3%        | 2.3%      | 2.6%         | 8.4%      | 13.5%     | 44.8%     | 22.3%     | 4.8%   |
| 27_12  | 2057        | 1.6%        | 0.8%      | 1.0%         | 6.7%      | 30.9%     | 44.7%     | 12.7%     | 1.7%   |
| 27_13  | 17507       | 3.9%        | 1.1%      | 1.6%         | 5.9%      | 17.8%     | 35.1%     | 20.3%     | 14.4%  |
| 27_14  | 7359        | 3.6%        | 0.3%      | 0.5%         | 2.2%      | 7.1%      | 53.5%     | 29.9%     | 3.0%   |
| 27_15  | 1690        | 5.0%        | 0.1%      | 0.1%         | 10.2%     | 37.1%     | 22.6%     | 8.8%      | 16.1%  |
| 27_16  | 1498        | 2.3%        | 0.0%      | 0.1%         | 5.9%      | 34.5%     | 12.6%     | 19.8%     | 24.8%  |
| 27_17  | 14007       | 3.1%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 0.8%      | 67.4%     | 18.9%     | 9.8%   |
| 27_18  | 17461       | 0.3%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 0.4%      | 52.7%     | 35.4%     | 11.2%  |
| 27_19  | 19175       | 0.2%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 0.1%      | 27.2%     | 48.2%     | 24.3%  |
| 27_20  | 17511       | 0.4%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 0.1%      | 63.0%     | 23.8%     | 12.6%  |
| 27_21  | 2798        | 0.1%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 0.3%      | 12.1%     | 53.6%     | 34.0%  |
| 27_22  | 10013       | 0.0%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 0.0%      | 32.9%     | 46.0%     | 21.1%  |
| 27_23  | 11618       | 1.2%        | 0.0%      | 0.0%         | 0.0%      | 0.2%      | 13.7%     | 52.7%     | 32.2%  |

## 10.6 Anwendbarkeit und Grenzen des Teufe-/Neubildungsverfahrens

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

Die Anwendung des Verfahrens sollte beschränkt werden auf:

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

Fließzeiten für komplexere Strömungsverhältnisse in Grundwasserleitern können nicht oder nur bedingt mit dem Verfahren wiedergegeben werden. Für diese Fälle sowie für konkrete Einzelfallbetrachtungen, z.B. bei der Suche nach einer Verschmutzungsquelle im Einzugsgebiet eines Trinkwasserbrunnens, sind im Allgemeinen numerische Strömungsmodellierungen erforderlich. Deren Einsatz erfordert neben dem numerischen Rechenaufwand regionalen Expertenwissen und lokale, zumeist aufwendige Datenerhebungen. Letzteres gilt auch für Altersdatierungen durch Tracer, mit denen sich Grundwasseralter direkt bestimmen lassen. Für einen Einsatz auf Landesebene kommen solche Verfahren schon aus Kostengründen nicht in Frage.

Die in Tab. 10-3 beispielhaft für einzelne Grundwasserkörper dargestellte Häufigkeitsverteilungen der Reaktionszeiten für das 50%-Perzentil der Filtermitten auf Ebene der Grundwasserkörper können dann als Anhaltswerte für die Verweil- und Fließzeiten in einem GWK interpretiert werden, wobei unterstellt wurde, dass die Grundwassermessstellen dort installiert wurden, wo im Hinblick auf die hydrogeologische Standortsituation sowie die festgestellten Belastungen eine große Repräsentativität vorliegt. Die Repräsentativität einer Grundwassermessstelle ist für sich alleine aber noch kein Beleg für die konsistente und flächendeckende Umsetzung von Maßnahmen im gesamten GWK. In diesem Zusammenhang besteht die Gefahr, dass kleinräumig und ausschließlich im Zustrom von Messstellen umgesetzte Grundwasserschutzmaßnahmen in Kombination mit den Fließzeitergebnissen des Teufe-/ Neubildungsverfahrens unzulässiger Weise für Zielerreichungsprognosen für einen GWK verwendet werden. Die Anwendung des Teufe-/ Neubildungsverfahrens für diesen Zweck ist nicht zulässig käme einer manipulativen „Messstellensanierung“ gleich.

## 11 Zusammenfassung

Als Grundlage für Zielerreichungsprognosen und die Begründung von Fristverlängerungen im Rahmen der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie wurden im Projekt GROWA+ - NRW 2021 Berechnungen von Verweilzeiten des Sickerwassers im Boden und in den Grundwasserdeckschichten sowie von Fließzeiten des Grundwassers im oberen Aquifer vorgenommen. Im diesem Zusammenhang wurden einerseits flächenhafte Verweil- und Fließzeiten bis zum Eintritt in einen Vorfluter auf Bundeslandsebene ermittelt. Andererseits wurden, ausgehend von den Monitoringmessstellen des Grundwasserbeobachtungsmessnetzes in NRW, abstrahierte Verweil- und Fließzeiten auf Grundwasserkörperebene berechnet.

### Kompartimente zur Verweil- und Fließzeitermittlung

Für die Berechnung der Verweil- und Fließzeiten wurde der Untergrund in drei Tiefenbereiche unterschieden.

- Die Bodenzone umfasst den durchwurzelten Bodenbereich in der Tiefe von 0 - max. 1,5 Meter unter Flur, je nach Bodenart bzw. Vegetation.
- Die Grundwasserdeckschichten beginnen unterhalb des durchwurzelten Bodenbereichs und reichen bis hin zur Grundwasseroberfläche.
- Der obere Aquifer umfasst den wassergesättigten Bereich und ist dadurch charakterisiert, dass die Bewegung des Wassers eine deutliche laterale Komponente aufweist.

### Datengrundlagen und Berechnungsansätze zur Verweil- und Fließzeitenmodellierung

Der Grund für diese Auftrennung des Untergrundes waren die unterschiedlichen Datengrundlagen, die zur Ableitung der Verweil- und Fließzeiten zur Verfügung standen und die den Einsatz von zum Teil unterschiedlich detaillierten Berechnungsansätzen nahelegten.

Zur Berechnung der **Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone** wurde wie folgt verfahren:

- Für den durchwurzelten Bodenbereich konnte landesweit das Verfahren nach DIN 19732 eingesetzt werden. Die Bodenzone konnte über Angaben aus der Bodenkarte 1:50.000 flächendeckend charakterisiert werden.
- Die Verweilzeitermittlung für die Grundwasserdeckschichten von Lockergesteinsaquiferen erfolgte ebenfalls über das Verfahren nach DIN 19732, jedoch wurden unterschiedliche Datengrundlagen verwendet. Aus der Bodenkarte 1:50.000 standen für Teilgebiete Parameter bis zu einer Tiefe von ca. 2 Metern zur Verfügung. Für weitere Teilgebiete NRWs stand eine Karte der bindigen Deckschichten zur Verfügung. Die meisten Datengrundlagen für diesen Tiefenbereich wurden der Hydrogeologische Übersichtskarte NRWs entnommen.
- Für die Verweilzeitermittlung in den Grundwasserdeckschichten des Festgesteinsbereichs kann das Verfahren nach DIN 19732 nicht eingesetzt werden, weil Daten zum Wasserspeichervermögen bzw. zur Wasserwegsamkeit der Deckschichten hier nicht vorhanden bzw. nicht sinnvoll darstellbar sind. Stattdessen wurde auf das semi-qualitative Verfahren nach Hölting et al. (1995) zurückgegriffen. Die generalisierten Angaben in der Hydrogeologischen Übersichtskarte NRW zur Gesteinsbeschaffenheit der Grund-



wasserdeckschichten im Festgesteinsbereich und weiteren zur Abschätzung von Verweilzeiten in den Deckschichten des Festgesteinsbereichs verwendbaren Informationen reichten für den Einsatz dieses Verfahrens aus.

Für die Berechnung der **Fließzeit des Grundwassers** wurden zwei Verfahren eingesetzt:

- Die Fließzeitermittlung bis Vorflutereintritt erfolgte über das WEKU-Modell (Kunkel & Wendland, 1997). Die benötigten Datengrundlagen (Morphologie der Grundwasseroberfläche, hydrodynamische Parameter) standen landesweit konsistent zur Verfügung.
- Für die Fließzeitermittlung auf Grundwasserkörperebene wurde das Teufe-/Neubildungsverfahren nach Hansen et al. (2018) eingesetzt. Hierfür standen grundwassermessstellenbezogene Datengrundlagen der Grundwassermessstellen des WRRL-Messnetzes aus NRW zur Verfügung, aus denen Fließzeiten abstrahiert wurden, deren ermittelte Häufigkeitsverteilung innerhalb der GWK die gewünschten Angaben für die GWK zulässt.

#### Modellergebnisse zur Verweilzeit in der ungesättigten Zone

Für die Bodenzone wurden Verweilzeiten im Sickerwasser im Bereich von etwa 3 Monaten bis etwa 2,5 Jahren berechnet. Besonders geringe Verweilzeiten ergeben sich dort, wo hohe Grundwasserstände mit (relativ) hohen Sickerwasserraten und Böden mit geringer nutzbarer Feldkapazität korrelieren. Besonders hohe Verweilzeiten ergeben sich dort, wo bindige Böden (hohe nutzbare Feldkapazitäten) in Kombination mit äußerst geringen Sickerwasserhöhen auftreten.

Die berechneten Verweilzeiten in der Grundwasserüberdeckung sowie die Gesamtzeiten, die das Sickerwasser benötigt, um von der Erdoberfläche bis zur Grundwasseroberfläche zu gelangen, umfassen eine Wertespanne zwischen weniger als 3 Monaten und mehr als 25 Jahren. Insbesondere bei großen Flurabständen, wie sie in der Köln-Aachener Bucht und im Verbreitungsgebiet von bindigen Deckschichten auftreten, sind Sickerwasserverweilzeiten von 10 Jahren und mehr keine Seltenheit. Dort, wo im Lockergesteinsbereich relativ hohe Grundwasserstände mit relativ hohen Sickerwasserraten korrelieren, wie z.B. entlang des Rheins und im Münsterland, überwiegen Sickerwasserverweilzeiten von weniger als 2,5 Jahren. In einer ähnlichen Größenordnung bewegen sich die Verweilzeiten in den grundwasserfernen Bereichen der Festgesteinsregion. Geringe Verweilzeiten von weniger als einem halben Jahr ergeben sich in der Lockergesteinsregion für grundwassernahe Standorte im Münsterland und am Niederrhein sowie in den Festgesteinsregionen für Bereiche, wo verkarstete Gesteine im Untergrund anstehen, wie z.B. in der Paderborner Hochfläche.

#### Modellergebnisse zur Fließzeit im Aquifer bis Vorflutereintritt

Die berechneten Grundwasserfließzeiten beziehen sich immer auf den grundwasserbürtigen Abflussanteil, der allerdings nicht in allen Regionen die dominierende Abflusskomponente darstellt. Dies ist bei der Interpretation und Anwendung der Ergebnisse zu berücksichtigen. Es errechnen sich Werte, die in einem Bereich zwischen weniger als 0,25 Jahren und mehr als 25 Jahren variieren können. Da die Niederrheinische Bucht in einer relativ niederschlagsarmen Region liegt und die Lockergesteinssedimente, die dort anstehen, eine hohe Wasserdurchlässigkeit aufweisen, ist die Gewässernetzdichte relativ gering. Dementsprechend sind die Fließstrecken des Grundwassers und in der Folge auch die Fließzeiten bis zum Vorfluter relativ

hoch und liegen weit verbreitet bei über 10 Jahren. Ähnliche Fließzeiten ergeben sich für das Münsterland. Große Bereiche der Festgesteinsregion weisen dagegen Fließzeiten von weniger als 0,25 Jahren auf. Bedingt sind diese durch eine Kombination aus geringen Abstandgeschwindigkeiten (bedingt durch hohe hydraulische Gradienten) und der für niederschlagsreiche Regionen typischen hohen Vorfluterdichte.

#### Modellergebnisse zur Verweil- und Fließzeit im Aquifer bis Vorflutereintritt

Durch Summation der berechneten Gesamtverweilzeit in der ungesättigten Zone mit den Fließzeiten im Aquifer wurde ermittelt, wie lange das Wasser von der Einsickerung in den Boden bis zum Austritt in den grundwirksamen Vorfluter benötigt. Hierbei zeigten sich Verweil- und Fließzeiten einen weiten Bereich zwischen weniger als 0,5 Jahren und mehr als 25 Jahren. Insbesondere im Westteil der Niederrheinischen Bucht treten hohe Gesamtzeiten auf, die sowohl durch hohe Verweilzeiten bei der Passage der ungesättigten Zone, als auch durch hohe Fließzeiten im Grundwasser, bestimmt sind. Die Verweil- und Fließzeiten im Rheinischen Schiefergebirge sind durchweg geringer und übersteigen nur selten 10 Jahre. Vor allem die durch die steilen hydraulischen Gradienten bedingten geringen Fließzeiten im Grundwasser haben dort maßgeblichen Einfluss.

#### Verweil- und Fließzeiten im Rheinischen Revier bis Vorflutereintritt bei sumpfungsunbeeinflussten Verhältnissen

In einer Szenario-Analyse wurde untersucht, ob und in welcher Weise sich die Verweil- und Fließzeiten in den aktuell sumpfungsbeflügelten Regionen im Rheinischen Revier ändern, wenn die Bergbaumaßnahmen zum Ende gekommen sind. Es zeigt sich hierbei, dass aufgrund des im Gebiet vorherrschenden geringen Wasserspeichervermögens der Deckschichten in der Köln-Aachener Bucht trotz der im sumpfungsunbeeinflussten Zustand deutlich geringeren Sickerstrecke nur unwesentlich kürzere Verweilzeiten des Sickerwassers zu erwarten sind. Die Fließzeiten im Grundwasser werden sich wegen der geringeren hydraulischen Gradienten jedoch signifikant erhöhen, so dass im Vergleich zur aktuellen (sumpfungsbeflügelten) Situation insgesamt höhere Fließzeiten von bis zu 10 Jahren auftreten.

#### Verweil- und Fließzeiten eines abstrahierten Grundwassermonitoringmessnetzes

Als Grundlage für Zielerreichungsprognosen und für die Begründung von Fristverlängerungen im Rahmen der Umsetzung der EG-WRRL sind vor allem Verweil- und Fließzeiten (Reaktionszeiten) auf GWK-Ebene –und nicht etwa für Einzelmessstellen– relevant. Die einzelnen Messstellen des Grundwassermonitoringmessnetzes können in diesem Zusammenhang hinsichtlich ihrer räumlichen Verteilung (Filterlagen, Filterlängen) als „repräsentative“ Grundlage für die Ermittlung von Reaktionszeiten auf GWK-Ebene angesehen werden. Da die Messstellen für das Grundwassermonitoringmessnetz so ausgewählt sind, dass sie für einen GWK als repräsentativ angesehen werden können, wurde die statistische Verteilung der Ausbaudaten dieser Messstellen als Eingangsgröße für das Teufe-Neubildungsverfahren gewählt, so dass „repräsentative“ Verweil- und Fließzeiten auf GWK-Ebene abstrahiert werden können.

Die Verweil- und Fließzeitermittlung auf Grundwasserkörperebene erfolgte basierend auf dem Teufe-Neubildungsverfahren (Hansen et al., 2018). Ergänzend zu landesweit verfügba-

ren Datengrundlagen (Morphologie der Grundwasseroberfläche, hydrodynamische Parameter) wurden hierbei grundwassermessstellenbezogene Datengrundlagen (z.B. zur Filteroberkante und zur Filterunterkante) verwendet.

Hierbei ergaben sich für die meisten GWK in NRW Verweil- und Fließzeiten (Reaktionszeiten) zwischen 2,5 und 10 Jahren. Höhere Reaktionszeiten zwischen 10 und 25 Jahren wurden vor allem für viele GWK im südlichen Teil der Köln-Aachener Bucht ermittelt. Geringere Reaktionszeiten von weniger als 2,5 Jahren wurden vor allem für GWK im Rheinischen Schiefergebirge sowie für die Regionen ermittelt, in denen in den GWK verkarstete Kalksteine dominieren.

Die Reaktionszeiten auf GWK-Ebene können als Anhaltswerte für die Verweil- und Fließzeiten in einem GWK interpretiert werden, unter der Prämisse, dass die Messstellen jeweils so installiert sind, dass im Hinblick auf die hydrogeologische Standortsituation eine große Repräsentativität vorliegt. Die mit diesem Verfahren ermittelten Verweil- und Fließzeiten können somit genutzt werden, um belastbare Angaben nach einer landesweit konsistenten Methodik zu den erforderlichen Fristverlängerungen aufgrund natürlicher Gegebenheiten für die GWK liefern zu können. Dabei sei hervorgehoben, dass die fristgemäße Maßnahmenumsetzung zur Erreichung der Umweltziele vorausgesetzt wird. Fristverlängerungen über das Jahr 2027 hinaus sind nur noch durch natürliche Gründe (z.B. sehr lange Verweil- und Fließzeiten) möglich.

Eine Verwendung der Angaben für andere spezielle Fragestellungen ist jedoch nicht bzw. nur bedingt sinnvoll. Die vorliegende, rein hydraulisch vorgenommene Verweil- und Fließzeitermittlung für das abstrahierte Grundwassermonitoringmessnetz kann nicht die sachverständige Prüfung durch den Bearbeiter bei Spezialfällen, wie z.B. bei der Altlastenbearbeitung (Grundwassersanierungen spezifischer Schadstoffe, Havarien), ersetzen. In diesem Fall sollten Strömungsmodelle, ggf. gekoppelt mit schadstoffspezifischer Sickerwasserprognose- und hydrochemischen Grundwassermodellen zur Stoffausbreitung, eingesetzt werden. Lediglich für den Parameter Nitrat oder andere gelöste Salze sind die Angaben auf GWK-Ebene verwendbar.

## 12 Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 5. Aufl. 438 S. Hannover
- AHUJA, L. R., D. K. CASSEL, R. R. BRUCE & B. B. BARNES (1988): Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. *Soil Science*, 404-411. BLA-GEO, 2004
- BUSCH, K. F. & L. LUCKNER (1973): Geohydraulik. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- DIN 19732 (2011): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotenzials von nichtsorbierbaren Stoffen, Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4049-3 (1994): Deutsches Institut für Normung e.V.: Hydrogeologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. DIN-Taschenbuch, 211, Beuth-Verlag; Berlin 1994, S. 242ff.
- EU-WRRL (2000): European Parliament and Council of the European Union, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. . Official Journal of the European Communities.
- EU-GWRL (2006): Richtlinie 2006/118/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 12. Dezember 2006 zum Schutze des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung, 13 S., Brüssel.
- HANSEN, C., KÜBECK, C., KUNKEL, R. & WENDLAND, F. (2018, IN VORBEREITUNG): Arbeitshilfe zur Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie - Ermittlung von Verweil- und Fließzeiten.- Abschlussbericht.- 95 S.
- HANSEN, C., KÜBECK, C., WENDLAND, F. & KUNKEL, R. (2017): Kurzanleitung für die messstellenbezogene Ermittlung von Fließ- und Verweilzeiten.- unveröffentlichter Projektbericht. 15 S.
- HERRMANN, F., KELLER, L., KUNKEL, R., VEREECKEN, H., WENDLAND, F. (2015): Determination of spatially differentiated water balance components including groundwater recharge on the Federal State level – A case study using the mGROWA model in North Rhine-Westphalia (Germany).- *Journal of Hydrology: Regional Studies* 294-312.
- HÖLTING, B., T. HAERTLÉ, K.-H. HOHBERGER, K. H. NACHTIGALL, E. VILLINGER, W. WEINZIERL & J.-P. WROBEL (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. *Geologisches Jahrbuch, Reihe C*, 63, 5-24.
- KÖNIG & KÖNIG (2017):
- KUNKEL R. & WENDLAND, F. (2010): Aufbau eines konzeptionellen hydrogeologischen Modells für die zeitliche Bewertung von Maßnahmenprogrammen in Hessen unter Einbeziehung der Monitoring-Messnetze der EG – Wasserrahmenrichtlinie.- Projektbericht FZ Jülich. 64 S.
- KUNKEL, R. & F. WENDLAND (1997): WEKU - A GIS-supported stochastic model of groundwater residence times in upper aquifers for the supraregional groundwater management. *Environmental Geology*, 30 (1-2), 1-9.
- KUNKEL, R. & F. WENDLAND (1999): Das Weg-/Zeitverhalten des grundwasserbürtigen Abflusses im Elbeinzugsgebiet. *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment*, Vol 19. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Germany.
- MAROTZ, W. (1968): Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund. the-sis thesis, Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany.
- MÜLLER, U. & RAISSI, F. (2002): Arbeitshilfe für bodenkundliche Stellungnahmen und Gutachten im Rahmen der Grundwassernutzung.- *Arb.-H. Boden* 2002/2, 49 S.
- TETZLAFF, B., KUHR, P., VEREECKEN, H. U. WENDLAND, F. (2009): Aerial photograph-based delineation of artificially drained areas and their relevance for water balance and nutrient modeling in large river basins.- *Physics and Chemistry of the Earth* 34, 552 – 564..
- WENDLAND, F., KREINS, P., KUHR, P., KUNKEL, R., TETZLAFF, B. & VEREECKEN, H. (2010): Räumlich differenzierte Quantifizierung der N- und P-Einträge in Grund- und Oberflächenwasser in NRW unter besonderer Berücksichtigung diffuser landwirtschaftlicher Quellen.- *Forschungszentrum Jülich, Reihe Energie und Umwelt*, Bd. 88, 231 S.





Landesamt für Natur, Umwelt und  
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10  
45659 Recklinghausen  
Telefon 02361 305-0  
[poststelle@lanuv.nrw.de](mailto:poststelle@lanuv.nrw.de)

[www.lanuv.nrw.de](http://www.lanuv.nrw.de)