

# Konzeptionelles hydrogeologisches Modell zur zeitlichen Bewertungen von Maßnahmenprogrammen für die EU-WRRL in Hessen („Verweilzeitenmodell Hessen“)

W4

GEORG BERTHOLD, JOHANN-GERHARD FRITSCHKE, AXEL THOMAS, FRANK HERRMANN,  
RALF KUNKEL & FRANK WENDLAND

Im Jahr 2011 wurde das „Verweilzeitenmodell Hessen“ in seiner ersten Version abgeschlossen. Das im Auftrag des HLUg und in Zusammenarbeit mit dem Dezernat Hydrogeologie, Grundwasser (W 4) vom Forschungszentrum Jülich (Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre, Institut Agrosphäre, ICG-4) und der BTU Cottbus ab 2007 erarbeitete konzeptionelle hydrogeologische Modell (WENDLAND et al., 2011) ermöglicht eine Analyse und Bewertung von Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone sowie von Verweilzeiten des Grundwassers im oberen Grundwasserleiter der Grundwasserkörper Hessens. Damit steht ein weiteres wichtiges Instrument zur Verfügung, um die Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WFD, 2000) und der EU-Grundwasserrichtlinie (EU-GWD, 2006) zu erfüllen, Grundwasserkörper hinsichtlich ihres chemischen und mengenmäßigen Zustandes und des Trends zu beurteilen und die zeitlichen und räumlichen Auswirkungen von Maßnahmen zur Verminderung von Stoffeinträgen einzuschätzen, die in Grundwasserkörpern mit schlechtem Zustand ergriffen werden. Die Verwendung geeigneter konzeptioneller hydrogeologischer Modelle wird in der Grundwasserrichtlinie (EU-GWD, 2006) als integraler Bestandteil der Ermittlung des chemischen Zustandes gesehen und in den „Common implementation strategies“ der EU-Kommission (z.B. CIS, 2009; 2010) beschrieben. Hiermit ist für den nächsten Zyklus der Bewirtschaftungspläne eine bessere Vorhersage möglich, bis wann die Umweltziele erreicht werden. Die Verwendung von Fristverlängerungen oder weniger strengen Umweltzielen für die Bewirtschaftungspläne nach Artikel 13 der EU-Wasserrahmenrichtlinie kann hiermit besser begründet werden. In der wasserwirt-

schaftlichen Praxis wird nämlich häufig beobachtet, dass wegen der langen Verweilzeiten und geringen Transportgeschwindigkeiten in Sicker- und Grundwasser die Schadstoffgehalte auch dann noch steigen können, wenn gezielte Grundwasserschutzmaßnahmen schon eingeleitet worden sind.

Das Modell beruht ausschließlich auf im HLUg digital verfügbaren Datengrundlagen und wurde landesweit in einer räumlichen Auflösung in einem Raster von 60 m · 60 m umgesetzt. Das konzeptionelle Modell beschreibt konsistent für alle in Hessen ausgewiesenen hydrogeologischen Einheiten das Weg-/Zeitverhalten des Sickerwassers im Boden und in der Grundwasserüberdeckung sowie des Grundwassers im oberen Grundwasserleiter.

Die grundlegende Basis für Betrachtungen des Sickerwasserbereichs und der Verweilzeiten im Grundwasserbereich ist eine flächendeckende Konstruktion der Grundwasseroberfläche für ganz Hessen im mesoskaligen Bereich (z.B. Landschaften, Hydrogeologische Teilräume, Flussgebietseinheiten). Hierfür wurden, wo vorhanden, bereits existierende Grundwassergleichenpläne (v.a. in Lockergesteinsbereichen, z.B. hessisches Ried und Hanau Seligenstädter Senke) verwendet. Den größten Anteil Hessens machen allerdings Festgesteine aus. Für diesen Bereich existiert eine geringere Dichte an Meßpunkten, die zur Modellierung der Grundwasseroberfläche herangezogen werden können. Die punktuell und in unterschiedlicher flächenhafter Verteilung vorhandenen Angaben aus Meßstellen des hessischen Landesgrundwasserdienstes und aus dem Bohrarchiv des HLUg sind nach sorgfältiger Qualitätsprüfung

zusammen mit dem Digitalen Geländemodell und den Höhenlagen der Vorfluter und Daten aus der Bodenkarte 1:50 000 (BDF 50, staunässebeeinflusste Böden) zu einer Ermittlung verwendet worden. Ausgehend von den Vorflutern wurde für 76 hydrogeologische Einheiten der hydrogeologischen Übersichtskarte 1:200 000 (HÜK 200; HANNAPPEL et al. 2003) im Festgesteinsbereich eine statistische Auswertung des Gradienten der Grundwasseroberfläche von Messpunkten bis zum Vorfluter durchgeführt. In Gebieten ohne gemessene Daten konnte dann mithilfe dieses für jede hydrogeologische Einheit gemittelten Gradienten vom Vorfluter ausgehend und unter Berücksichtigung der Geländeoberfläche die Grundwasseroberfläche berechnet werden (HERRMANN, 2010, HERRMANN et al., 2011).

Das konzeptionelle hydrogeologische Modell wird aus drei Teilmodellen aufgebaut, die jeweils unterschiedliche Datengrundlagen haben. Die Berechnungsverfahren werden in WENDLAND et al. (2011) näher beschrieben.

Die **Bodenzone** umfasst den durchwurzelten Bodenbereich bis in die Tiefe von ca. 1 m unter Gelände. Das Wasserspeichervermögen ist für die Bodenzone durch die Angaben zur Feldkapazität in der (BDF 50) charakterisiert, die im Wesentlichen auf der Basis von Angaben zur Bodenart abgeleitet wird. Als eine der wichtigsten Größen zur Berechnung der Verweilzeiten in der Bodenzone wurde die Sickerwasserrate aus der landesweit verfügbaren digitalen Karte zur Grundwasserneubildung (HERGESELL, 2003) in das Modell übernommen.

Als **Grundwasserüberdeckung** wird der gesamte Bereich unterhalb der durchwurzelten Bodenzone bis zur Grundwasseroberfläche bezeichnet. Bei der Berechnung wurde zwischen der oberen und der tieferen Grundwasserüberdeckung unterschieden.

Der Tiefenbereich von 1–2 m unter Flur wurde als obere Grundwasserüberdeckung definiert. In Lockergesteinsregionen liegen für diesen Tiefenbereich Informationen aus der BDF 50 zur Feldkapazität vor, so dass die Verweilzeit analog der Verfahrensweise für die Bodenzone ermittelt wurde. Teilweise wurden hier auch petrografische Angaben aus der HÜK 200 zur Lithologie direkt in Feldkapazitäten übertragen.

Die tiefere Grundwasserüberdeckung umfasst den Bereich von 2 m Tiefe bis hin zur Grundwasseroberfläche, die in Hessen in Tiefen von bis zu 50 m, lokal auch noch tiefer liegen kann.

Insbesondere in Festgesteinsgebieten sind allerdings Informationen über den Bereich unterhalb der durchwurzelten Bodenzone meist sehr eingeschränkt verfügbar. Die Berechnung der Verweilzeit des Sickerwassers in der gesamten Grundwasserüberdeckung von Festgesteinsregionen sowie für den Lockergesteinsbereich ab einer Tiefe unter Flur von über 2 m erfolgte nach dem Verfahren von HÖLTING et al. (1995) zur Ableitung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. Die benötigte Datendichte ist verhältnismäßig gering, so dass sich das Verfahren insbesondere für Analysen auf der Ebene von Bundesländern eignet.

Als Eingangsdaten werden die in der HÜK 200 vorhandenen Angaben zur Gesteinsart des oberen Grundwasserleiters mit Hilfe eines Punktesystems bewertet. Die Wasserwegsamkeit der Gesteine wird durch Punktwerte der Grundwasserüberdeckung einer Schicht pro Meter spezifiziert. Für Lockergesteine resultieren sie im Wesentlichen aus der Petrografie, während bei Festgesteinen das Produkt der Punktzahlen aus der Gesteinsart und einem Strukturfaktor, der die Klüftigkeit, bzw. Verkarstung des Gesteins differenziert, in die Bewertung eingeht. Nach Verrechnung mit einem aus der Sickerwasserrate errechneten Sickerwasserfaktor und der addierten Mächtigkeit der vorkommenden Schichten ergibt sich eine Gesamtpunktzahl, welche über fünf Klassen von „sehr geringe Schutzfunktion“ mit geringen Punktwerten (< 500) bis hin zu „sehr hohe Schutzfunktion“ mit hohen Punktwerten (> 2000) reicht.

Der **obere Grundwasserleiter** umfasst den wassergesättigten Bereich und ist dadurch charakterisiert, dass die Bewegung des Wassers eine deutliche laterale Komponente aufweist. Den oberen Grundwasserleiter bilden in der Regel diejenigen hydrogeologischen Einheiten, die in der HÜK 200 mit verschiedenen hydrochemischen und hydrogeologischen Eigenschaften attribuiert sind und die in den vorhergehenden Schritten gleichfalls für die Berechnungen im Sickerwasserbereich herangezogen wurden. Bei großräumigen (landesweiten) Untersuchungen wie hier können im Gegensatz zu lokalen

numerischen Grundwasserströmungsmodellen im Allgemeinen nur Datengrundlagen ohne Tiefenauf-  
 lösung genutzt werden, hier z. B. die HÜK 200. Da in der Regel auch keine Bohrprofile, Grundwasserstände oder hydrogeologische Schnitte in ausreichender Menge flächendeckend verfügbar sind, bezieht sich die makroskalige Modellierung der Grundwasserfließwege bzw. Grundwasserverweilzeiten häufig auf eine zweidimensionale Aufsicht auf den jeweiligen Grundwasserleiter (DAHAN et al., 2004). Dabei wird das Grundwasserfließsystem durch ein Netzwerk von miteinander verbundenen Zellen nachgebildet (WENDLAND et al., 2004).

Bei der Modellierung des Weg-/Zeitverhaltens der grundwasserbürtigen Abflusskomponenten im oberen Grundwasserleiter auf Basis des WEKU-Modells (KUNKEL, 1994; KUNKEL & WENDLAND, 1997; KUNKEL & WENDLAND, 1999; 2006; WENDLAND, 1992) werden

die Zeiträume quantifiziert, innerhalb der das Sickerwasser vom Ort des Übertritts in den Grundwasserleiter zum grundwasserwirksamen Vorfluter gelangt. Die Verweilzeit hängt von der Fließstrecke und von der Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers ab. Deren Höhe wird durch hydrogeologische Größen, wie dem Durchlässigkeitsbeiwert und dem nutzbaren Hohlraumanteil (Attribute des HÜK 200 Datensatzes), aber auch durch den aus der Morphologie der Grundwasseroberfläche abgeleiteten hydraulischen Gradienten beeinflusst. Im nächsten Schritt wird die Verweilzeit des Grundwassers im Grundwasserleiter für jede Eintragszelle berechnet. Betrachtet wird hierzu die gesamte Fließstrecke von der Eintragszelle des Grundwassers in den Grundwasserleitern bis zum Austritt in ein Oberflächengewässer. Die Grundwasserverweilzeit errechnet sich durch Addition der Einzelverweilzeiten in den Rasterzellen entlang des Fließwegs von der Eintrags- bis zur Austragsstelle.

## Ergebnisse

### Modellierung der Grundwasseroberfläche (oberster Grundwasserleiter)

Die Ausgestaltung der Grundwasseroberfläche ist elementarer Bestandteil für die hydrogeologischen Kenngrößen wie Grundwasserfließrichtung und Verweilzeiten. Aus diesem Grund wurde für Hessen eine flächenhafte Modellierung der Grundwasseroberfläche mit einer räumlichen Auflösung von 20 m · 20 m vorgenommen (HERRMANN, 2010).

Im ersten Schritt der Modellierung wurde eine Gliederung der hessischen Grundwasserleiter in Locker- und Festgesteinsbereiche anhand der Informationen aus der HÜK 200 vorgenommen. Für beide Bereiche wurde mit zwei unterschiedlichen, an die jeweilige Daten-

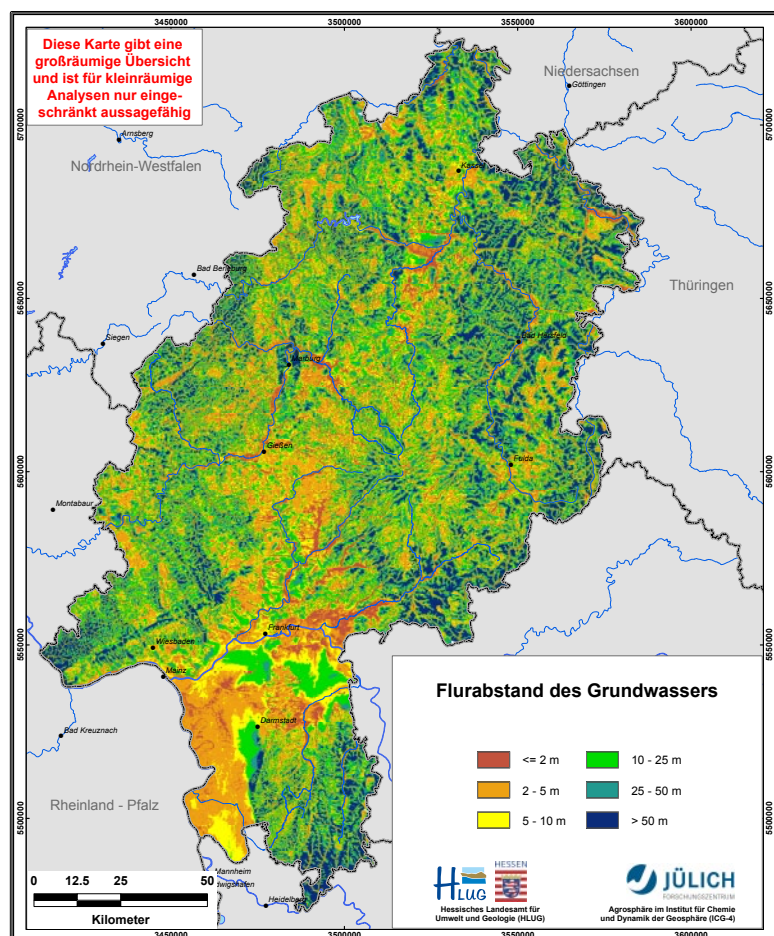


Abb. 1: Flurabstand der modellierten Grundwasseroberfläche in Hessen.

lage angepassten Verfahren eine zusammenhängende, in weiten Teilen plausible Grundwasseroberfläche modelliert (Abb. 1).

## Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone

Durch Summation der berechneten Verweilzeiten des Sickerwassers in der durchwurzelten Bodenzone sowie der oberen und der tieferen Grundwasserüberdeckung ergibt sich die Gesamtzeit, die das Sickerwasser benötigt, um von der Erdoberfläche bis zur Grundwasseroberfläche zu gelangen. Durch Addition der Verweilzeiten in den separat berechneten Tiefenbereichen ergibt sich die Gesamtverweilzeit im Sickerwasserbereich. Die berechneten Sickerwasser- verweilzeiten liegen zwischen weniger als 1 Jahr bis zum Teil deutlich mehr als 25 Jahren. Sickerwasser- verweilzeiten von über 5 Jahren wurden großräumig für Lockergesteinsregionen berechnet. Vor allem für Gebiete wie das hessische Ried und die Hanau-Seligenstädter Senke sowie die Hessische Senke, in denen die Grundwasserüberdeckung von bindigen Abfolgen gebildet wird, wurden im Fall größerer Grundwasserflurabstände sehr hohe Verweilzeiten berechnet. Für Festgesteinsregionen, wie z. B. für den Vogelsberg, Teile des Odenwaldes und das Rheinische Schiefergebirge wurden dagegen selbst bei großen Flurabständen meist nur geringe Verweilzeiten von weniger als 2 Jahren berechnet. Vor allem eine hohe Sickerwasserrate gekoppelt mit entsprechenden petrografischen Eigenschaften waren hierfür maßgeblich.

## Verweilzeiten des Grundwassers im oberen Grundwasserleiter

Die Mittelwerte der Verweilzeiten des Grundwassers im oberen Grundwasserleiter weisen eine große Spannweite zwischen weniger als 1 Jahr und mehr als 25 Jahren auf. In den Lockergesteinsregionen des hessischen Rieds und der Niederhessischen Senke treten zum Teil hohe Grundwasserverweilzeiten auf, die häufig zwischen 10 und mehr als 25 Jahren liegen. Dies resultiert aus den vergleichsweise geringen hydraulischen Gradienten und den relativ langen Fließstrecken. Großflächig geringe Verweilzeiten von weniger als zwei Jahren sind typisch für die Festgesteinsregionen. Vor allem der Vogelsberg, der hohe

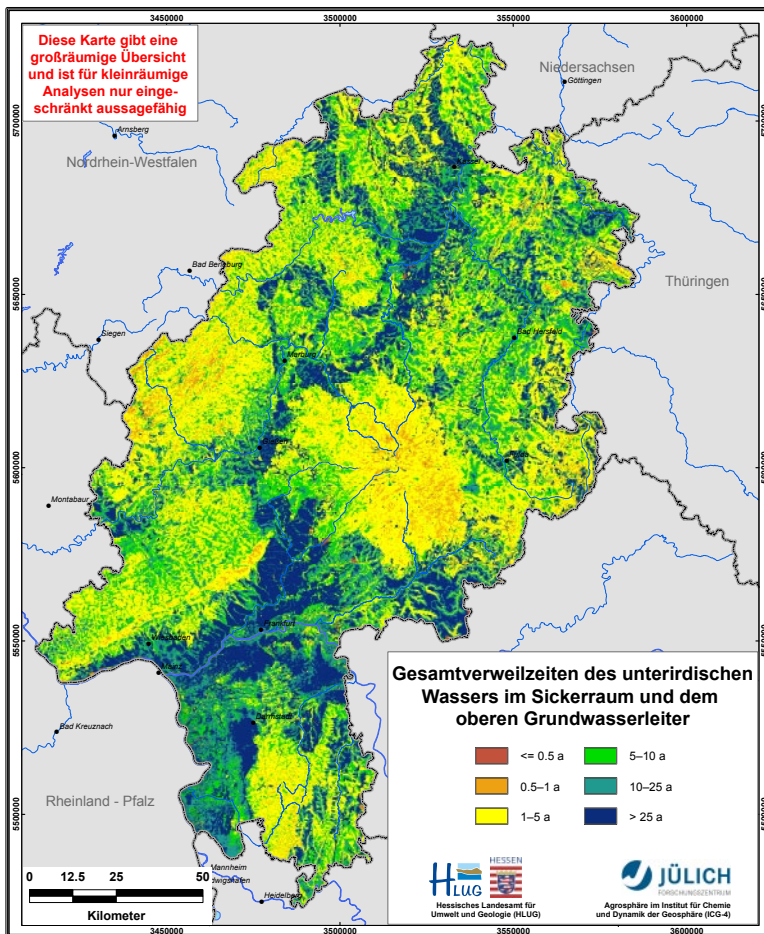
Taunus und das Lahn-Dill-Gebiet mit Verweilzeiten von meist unter einem Jahr treten deutlich aus der Karte hervor. Diese geringen Verweilzeiten ergeben sich aus der hohen Vorfluterichte und den hohen hydraulischen Gradienten verbunden mit örtlich erhöhter Durchlässigkeit durch starke Klüftung. Für den Großteil der Festgesteinsregionen Hessens ist mit Grundwasserverweilzeiten zwischen 2 und 5 Jahren zu rechnen, wobei in Vorfluternähe auch deutlich geringere Werte auftreten können.

## Gesamtverweilzeit des unterirdischen Wassers im Sickerraum und dem oberen Grundwasserleiter

Bei der Gesamtverweilzeit im Sicker- und Grundwasserbereich werden insbesondere in den Festgesteinsregionen die Verweilzeiten des unterirdischen Wassers durch die Passage des Grundwassers durch den Grundwasserleiter bestimmt, da dort die Verweilzeiten in der ungesättigten Zone vergleichsweise gering sind. Aber auch dann ergeben sich für die hydrogeologischen Teilräume (FRITSCHÉ et al., 2003) Verweilzeiten, die 5 Jahre selten überschreiten.

Die Ursachen hierfür sind vielfältig. Im Lahn-Dill-Gebiet ist dies beispielsweise typisch für die dort auftretenden Massenkalken, die sich durch eine hohe Durchlässigkeit auszeichnen, während dies im kristallinen Odenwald an oberflächennah verwitterten Kristallingesteinen mit geringem Grundwasserflurabstand liegt. Im Vogelsberg führt dagegen die ausgesprochene Grundwasserstockwerksgliederung (LESSMANN, 2001) zu den geringen Verweilzeiten im oberen Grundwasserleiter. Mit ca. 5–10 Jahren ergeben sich in den Talfüllungen der Mittelgebirge aufgrund des relativ geringen hydraulischen Gradienten und der bindigen Abfolgen der Grundwasserüberdeckung insgesamt etwas höhere Gesamtverweilzeiten. In den Lockergesteinsregionen überwiegen dagegen meist die Verweilzeiten im Bereich von mindestens 10 Jahren bis über 25 Jahren. Die Verweilzeiten in der ungesättigten Zone können dabei in einigen Fällen Werte annehmen, die nahezu an die der Grundwasserverweilzeiten heranreichen.

Vor allem in Lockergesteinsbereichen können sich eingeleitete Maßnahmen zur Verbesserung des Zu-



**Abb. 2:** Gesamtverweilzeit des unterirdischen Wassers im Sickerraum und dem oberen Grundwasserleiter (WENDLAND et al., 2011).

## Ausblick

Das „Verweilzeitenmodell“ ist ein geeignetes Instrument, um Regionen zu identifizieren, in denen Maßnahmenprogramme zum Schutz des Grundwassers zwar geeignet sind die Ziele der EU-WFD zu erreichen, jedoch aufgrund der langen Verweilzeiten eine Einhaltung der Zeitvorgabe (bis 2015) nicht möglich ist. Bei Beantragungen von Fristverlängerungen kann somit begründet werden, warum ein eingeleitetes Maßnahmenprogramm zwar geeignet ist, die Ziele der EU-WFD zu erreichen, jedoch aufgrund der hydrodynamischen Gegebenheiten eine Einhaltung der Zeitvorgabe in vielen Regionen nicht möglich ist. Zudem sind derartige Informationen ein gutes Instrument für die Öffentlichkeitsarbeit, z. B. zur Argumentation, warum reduzierte Stickstoffgaben in

standes des Grundwassers also erst mit einer Zeitverzögerung von mehr als 10 Jahren im Grundwasser bemerkbar machen. Die berechneten Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone zeigen hierbei die Größenordnung des Zeitraums auf, der berücksichtigt werden muss, um die Effizienz von gezielten Grundwasserschutzmaßnahmen im Hinblick auf Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser beurteilen zu können. In diesem Zusammenhang können die Ergebnisse einen Beitrag dazu liefern, sensible Regionen für die Durchführung von Grundwasserschutzmaßnahmen zu identifizieren, prioritäre Bereiche für das zukünftige Monitoring bzw. die Maßnahmendurchführung auszuweisen und eine Einschätzung über die Erforderlichkeit von Fristverlängerungen oder weniger strenge Umweltziele zu ermöglichen.

der Landwirtschaft nicht zu sofortiger Wirkung im Grundwasser führen.

Insbesondere bei der Konstruktion der Grundwasser Oberfläche in Festgesteinen sind im Vergleich mit regionalen hydrogeologischen Kenntnissen lokal größere Differenzen aufgetreten. Daher erfolgte nach Ablieferung der ersten Modellversion des Verweilzeitenmodells am HLUH zunächst eine Validierung der Grundwasser Oberfläche: Die Möglichkeit einer unabhängigen Validierung der Grundwasser Oberfläche durch Integration der ATKIS-Objektklassen Oberflächengewässer und Quellen (insgesamt 11 820 Objekte) ergibt sich, da diese Daten bislang nicht in die Modellierung eingeflossen sind. Bereits eine visu-

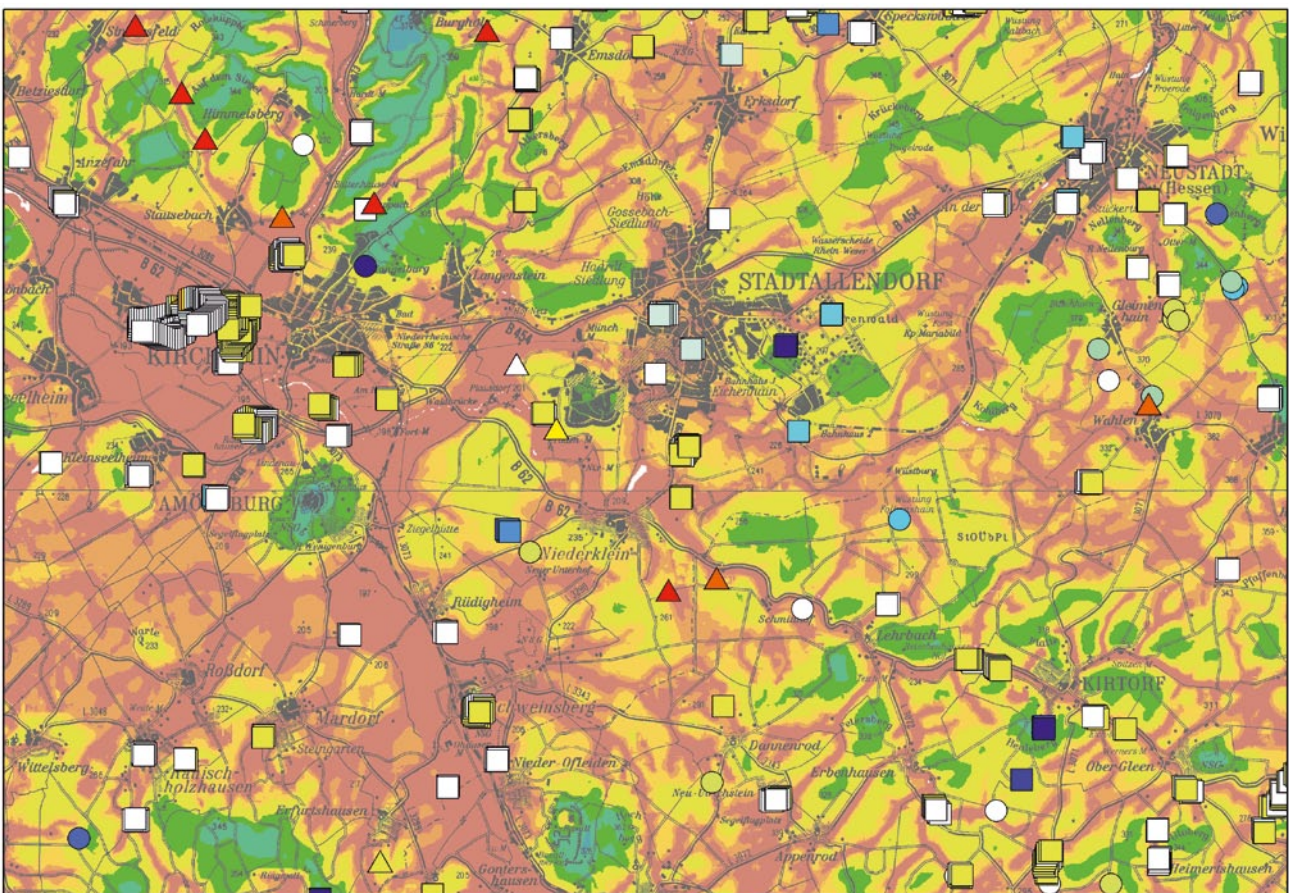
elle Inspektion zeigt, dass die Mehrzahl der Datenpunkte mit  $\pm 2,5$  m nur wenig von der modellierten Oberfläche abweichen (Abb. 3).

Zusätzlich wurden Grundwasserstände von 240 Gewinnungsbrunnen, deren Daten im Rahmen einer Nacherhebung bei Brunnenbetreibern erhalten wurden, in die Validierung einbezogen. Diese Werte zeigen teilweise erheblich höhere Abweichungen (überwiegend unter der modellierten Grundwasseroberfläche), die deutlich über den üblichen Rahmen von Interpolationsfehlern hinausgehen. Aufgrund der Lage in hydrogeologischen Einheiten mit mehreren Grundwasserleitern (z. B. Buntsandstein) kann bei einem Teil dieser Brunnen davon ausgegangen werden, dass die Förderung des Trinkwassers aus tieferen Schichten erfolgt und die gemessenen Grundwasser-

stände nicht den gesuchten obersten Grundwasserleiter repräsentieren. Als weitere Fehlerquelle sind zu tiefe Ruhewasserspiegel aufgrund zu kurzer Pumpenpausen anzusehen, innerhalb der sich der natürliche Ruhewasserspiegel nicht wieder einstellen kann. Im Rahmen der nächsten Modellierung werden diese Informationen bei der Überarbeitung der Grundwasserdatenbank berücksichtigt werden und in die Modellierung einfließen.

Das Gesamtmodell wird somit nach seiner Implementierung am HLOG hinsichtlich der Datengrundlagen ständig weiter verbessert und vervollständigt. Hierbei sind folgende Arbeiten geplant bzw. in Durchführung:

- Regionale hydrogeologische Kenntnisse werden bei der Ausweisung der grundwasserwirksamen



**Abb. 3:** Abweichungen der modellierten Grundwasseroberfläche (Farbkodierung des Flurabstands analog zu Abb.1) zu Höhenangaben von Quellaustritten (Kreise), stehenden Oberflächengewässern (Quadrate) sowie Ruhewasserspiegeln von Grundwassergewinnungstellen (Dreiecke).

Weißer Symbole geben Abweichungen von  $\pm 1,0$ m, blassblaue und hellgelbe Symbole  $>$  bzw.  $<$  1–2,5m sowie dunkelblaue bzw. tiefrote Symbole Abweichungen  $>$  bzw.  $<$  25m von der berechneten Grundwasseroberfläche an.

Vorfluter und einer darauf aufbauende Überarbeitung des digitalen Höhenmodells der Grundwasseroberfläche verstärkt herangezogen.

- Verbesserung der Datengrundlage durch die Erhebung weiterer Grundwasserstände, die z. B. bei Wasserwerksbetreibern vorliegen. Bevorzugt behandelt werden dabei hydrogeologische Einheiten, in denen bisher wenig Daten vorlagen.
- Integration bestehender Grundwassergleichpläne aus vorliegenden hydrogeologischen Beurteilungen (z. B. Sanierungsmaßnahmen, regionale Grundwassermodelle)
- In Festgesteinsregionen wird eine verstärkte Einbeziehung von Informationen über den petrographischen Aufbau des tieferen Untergrundes, z. B. aus Bohrprofilen und Regionalstudien erfolgen.
- Der Einfluss der Bildung von Zwischenabfluss im Boden und in den Deckschichten auf die Verweilzeiten wird quantifiziert.
- Durchführung von Plausibilitätsüberprüfungen

der berechneten Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone durch Einbeziehung von Ergebnissen regionaler Untersuchungen.

- Die Plausibilität der zur Modellierung der Abstandsgeschwindigkeit verwendeten nutzbaren Hohlraumanteile auf der Basis regionaler Kenntnisse wird überprüft.
- Berechnete Abstandsgeschwindigkeiten und Grundwasserverweilzeiten werden durch Einbeziehung von Ergebnissen regionaler Untersuchungen (Tracerversuche bzw. Isotopendaten über Grundwasseralter) verifiziert.
- Quellaustritte und stehende Oberflächengewässer werden bei der Berechnung der Grundwasseroberfläche und Verweilzeiten in vermehrtem Maße berücksichtigt.
- Thematische Überarbeitung der HÜK 200 zur Vermeidung inhaltlicher Differenzen innerhalb hydrogeologischer Einheiten an Blattschnittübergängen des Kartenwerks.

## Literatur:

CIS: Guidance on groundwater status and trend assessment. Common implementations strategy for the water framework directive (2000/60/EC). 82 S.; Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg (2009)

CIS: Guidance on Risk Assessment and the Use of Conceptual Models for Groundwater Common implementations strategy for the water framework directive (2000/60/EC). 67 S.; Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg (2010)

DAGAN, G.: Solute transport in heterogeneous porous formations. *Journal of Fluid Mechanics* 145, 151-177 (1984)

EU-GWD: Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration. L 327/19. 31 S.; Off. J. Eur. Communities (2006)

EU-WFD: Directive 2000/60/EC of the European Parliament and the Council of the European Union of 23 October 2000 establishing a frame-

work for Community action in the field of water policy. L 327. 73 S.; Off. J. Eur. Communities (2000)

FRITSCH, H.-G.; HEMFLER, M.; KÄMMERER, D.; LEßMANN, B.; MITTELBACH, G.; PETERS, A.; PÖSCHL, W.; RUMOHR, S., SCHLÖSSER-KLUGER, I.: Beschreibung der hydrogeologischen Teilräume von Hessen gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL). *Geol. Jb. Hessen* 130, 5-19 (2003)

HANNAPPEL, S.; FRITSCH, H.-G., LESSMANN, B.: Die Erstellung der Hydrogeologischen Übersichtskarte (HÜK 200) in Hessen. *Hessischer Umweltmonitor* 7 (4), 2-10 (2003)

HERGESELL, M.: GIS-based modelling of regional groundwater recharge in Hesse, Germany. *Hydrologie in Hessen*. Vol 1. 102 S., Wiesbaden, Germany (2003)

HERRMANN, F.: Entwicklung einer Methodik zur großräumigen Modellierung von Grundwasserdruckflächen am Beispiel der Grundwasserleiter des Bundeslandes Hessen. Dissertation, 134 S., BTU Cottbus, Cottbus (2010)

- HÖLTING, B.; HAERTLÉ, T.; HOHRBERGER, K.-H.; NACHTIGALL, K. H.; VILLINGER, E.; WEINZIERL, W., WROBEL, J.-P.: Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. Geologisches Jahrbuch, Reihe C 63, 5-24 (1995)
- KUNKEL, R.: Stochastische Modellierung der Nitratbelastung und der Verweilzeiten in den Grundwässern der Bundesrepublik Deutschland, Internal Report, FZJ-STE-IB 4/94, Forschungszentrum Jülich GmbH, Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung, Jülich, Germany (1994)
- KUNKEL, R. & WENDLAND, F.: 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 (1997)
- LESSMANN, B.: Hydrochemische und isopenhydrologische Untersuchungen an Grundwässern aus dem Vulkangebiet Vogelsberg. *Grundwasser* 2/2001, 81-85 (2001)
- WENDLAND, F.: Die Nitratbelastung in den Grundwasserlandschaften „alten“ Bundesländer (BRD). Berichte aus der Ökologischen Forschung. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Germany (1992)
- WENDLAND, F. & KUNKEL, R.: Das Weg-Zeit-Verhalten des Grundwasserabflusses und der Nitratabbau im Grundwasser. In *Wasser- und Nährstoffhaushalt im Elbegebiet und Möglichkeiten zur Stoffeintragsminderung: Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft*. Ed. W. Lahmer & A. Becker; Weißensee-Verlag, Berlin, Germany, S. 108-126 (2004)
- WENDLAND, F.; KUNKEL, R., VOIGT, H. J.: Assessment of groundwater residence times in the pore aquifers of the River Elbe Basin. *Environmental Geology* 46 (1), 1-9 (2004)
- WENDLAND, F.; BERTHOLD, G.; FRITSCHKE, J.-G.; HERRMANN, F.; KUNKEL, R.; VOIGT, H.-J & VERECKEN, H. (2011): Konzeptionelles hydrogeologisches Modell zur Analyse und Bewertung von Verweilzeiten in Hessen. –*Grundwasser, Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (Fachbeiträge): Band 16, Heft 3 (2011), Seite 163-176. Springer-Verlag*