

Veröffentlichung in

Grundwasser, Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (FH-DGG)

Hydrogeologische Notizen

Berichte und Informationen

Fachgespräch der AG Hydrogeologie der Staatlichen Geologischen Dienste zum Thema „Grundwasser-Neubildung“

Informationen zur Grundwasserneubildung werden bei nahezu allen wasserwirtschaftlichen Verfahren benötigt. Aus diesem Grund bieten die Geologischen Dienste bzw. die Wasserwirtschaftsbehörden vieler Bundesländer flächenhafte Informationen zur Grundwasserneubildung an. Dabei werden teils aus fachlichen Gründen, die vor allem mit regional ganz unterschiedlichen hydrogeologischen Gegebenheiten zusammenhängen, teils aus historischen Gründen verschiedene Verfahren verwendet.

Die AG Hydrogeologie der Geologischen Dienste Deutschlands führt regelmäßig Abstimmungsgespräche durch, u. a. um Verfahren und Produkte der Bundesländer inhaltlich abzustimmen und so die bundeslandübergreifende Nutzbarkeit für die Praxis zu erhöhen. In diesem Zusammenhang fand im Herbst 2017 beim Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) im GeoZentrum Hannover ein Fachgespräch zum Thema „Grundwasser-Neubildung“ statt.

Folgende Bundesländer waren vertreten:

Volker Armbruster, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg
Christof Baumeister, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Stefan Broda, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Jörg Elbracht, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Niedersachsen
Gabriele Ertl, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Niedersachsen
Tobias Geyer, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg
Mario Hergesell, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Bernd König, Geologischer Landesdienst Schleswig-Holstein
Alexander Limberg, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin
Lothar Moosmann, Behörde für Umwelt und Energie Hamburg
Jörg Neumann, Bayerisches Landesamt für Umwelt
Björn Panteleit, Geologischer Dienst für Bremen
Annett Peters, Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
Jörg Reichling, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Tobias Schlinsog, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Niedersachsen
Martin Schnepfmüller, Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft, Sachsen-Anhalt
Hansjörg Schuster, Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen
Thomas Walter, Ministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, Saarland

A. Informationen zur Grundwasserneubildung in den Bundesländern

Im Folgenden werden die Verfahren und Ergebnisse aus den Ländern kurz vorgestellt:

Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz (KLIWA-Arbeitsgruppe Grundwasser)

Die öffentliche Trinkwasserversorgung in Süddeutschland stützt sich zum überwiegenden Teil auf die Nutzung natürlicher Grundwasservorkommen (DESTATIS, 2013). Kenntnisse über die Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushalts und die flächenhafte Grundwasserneubildung aus Niederschlag sind daher von großer Bedeutung, um auch zukünftig die Sicherstellung der öffentlichen Trinkwasserversorgung und die Nachhaltigkeit der Ressourcennutzung zu gewährleisten. Für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Grundwassers ist neben der Grundwasserneubildung das nutzbare Grundwasserdargebot maßgebend. Es wird zusätzlich durch die Faktoren Ergiebigkeit der regionalen Grundwasservorkommen, Grundwasserbeschaffenheit, ökologische Verträglichkeit der Entnahme, technische Machbarkeit der Entnahme und nicht zuletzt durch die Wirtschaftlichkeit der Entnahme limitiert.

Das Kooperationsvorhaben KLIWA (Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, www.kliwa.de) der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz untersucht in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt. Im Teilprojekt KLIWA-Grundwasser werden zusammen mit Hessen die seit 1951 aufgetretenen und zukünftig zu erwartenden Veränderungen der Grundwasserverhältnisse näher betrachtet (KLIWA-Berichte, 2012 & 2017). Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag stellt dabei als „Bilanzrest“ eine regional besonders sensitive Größe im Hinblick auf Änderungen des Klimageschehens dar. Die länderübergreifende Langzeitsimulation der Grundwasserneubildung als Ergebnis der Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit GWN-BW (Grundwasserneubildung-Bodenwasserhaushalt) von 1951 - 2015 zeigt keine einheitliche Entwicklung über den Gesamtzeitraum. Besonders seit dem Jahr 2003 weist die überwiegende Mehrheit der Jahre nur unterdurchschnittliche Neubildungsraten auf (KOPP ET AL., 2018).

Das für Süddeutschland länderübergreifend angewendete Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW ist ein modular aufgebautes, deterministisches und flächendifferenziertes Modell zur Berechnung der tatsächlichen Verdunstung, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge (GUDERA & MORHARD, 2015). Die Ermittlung der Grundwasserneubildung erfordert in Gebieten mit schnellen lateralen Abflusskomponenten (reliefierte Festgesteinsgebiete) eine Reduktion der berechneten Sickerwasserrate mittels Baseflow-Index (BFI). Ein regionalisierter BFI kann beispielsweise auf Grundlage von Abflussmessungen regressionsanalytisch ermittelt werden (z.B. LFU, 2009; HERGESELL & BERTHOLD, 2004). Durch den BFI erfolgt eine Separierung in die Abflusskomponenten Direktabfluss und Grundwasserneubildung. In Gebieten mit vernachlässigbar schnellen lateralen Abflusskomponenten (nicht-reliefierte Porengrundwasserleiter) entspricht die Sickerwasserrate näherungsweise der Grundwasserneubildung aus Niederschlag (GUDERA & MORHARD, 2015). Grundwasseraustritte über schwebenden Grundwasserkörpern, Influenz und Effluenz entlang von Oberflächengewässern, laterale Grundwasserströmung (Randzustrom) sowie die Zusickerung und Aussickerung von Grundwasser aus bzw. in andere Grundwasserleiter werden von dem Modell nicht berücksichtigt.

Unter Berücksichtigung der oben genannten methodischen Einschränkungen werden die Modellergebnisse in den einzelnen Ländern routinemäßig für unterschiedliche hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Fragestellungen und Aufgaben verwendet:

- Dimensionierung von Wasserrechten (Wasserrechtsverfahren)
- Ausweisung von Wasserschutzgebieten
- Ermittlung von Verweilzeiten und der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung
- Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser
- Bereitstellung von Eingangsdaten für Grundwassermodelle

- Beurteilung des mengenmäßigen Zustands der Grundwasserkörper gemäß WRRL

Bayern (Ronja Gebel, Jörg Neumann)

Die „Mittlere jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag (1971 - 2000)“ wurde 2009 als eigenständige Karte sowie als Bestandteil des Kartenwerks HK 500 (Hydrogeologische Karte von Bayern 1:500.000) veröffentlicht (LFU, 2009). Für die bayerische Landesfläche beträgt die mittlere Grundwasserneubildung rund 210 mm/a, was einem Anteil von ca. 22 % des mittleren jährlichen Niederschlags entspricht. Die Werte variieren dabei zwischen ≤ 25 mm/a im Gebiet östlich von Würzburg und ≥ 800 mm/a in den Alpen. Die flächendifferenzierten Karten stellen eine großräumige Übersichtsabbildung im Landesmaßstab dar, so dass rasterbezogene Einzelwerte aus methodischen Gründen nicht für Detailaussagen geeignet sind. Eine Neuauflage der Grundwasserneubildungskarte für den Zeitraum 1981 - 2010 erfolgt im ersten Halbjahr 2018.

Neben der Grundwasserneubildung aus Niederschlag wurden räumlich hochaufgelöste Sickerwasserraten auf Basis der Bodenübersichtskarte 1:25.000 unter Anwendung von GWN-BW gerechnet. Neben der Schutzfunktionsberechnung finden die hochaufgelösten Sickerwasserraten auch Berücksichtigung in den Standortauskünften zur oberflächennahen Geothermie, da die Genehmigung und die Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Wärmekollektoren sowie die Art der eingesetzten Technik auch stark von der Bodenfeuchte abhängen.

Hessen (Mario Hergesell)

Für die Referenzperiode 1971 – 2000 beträgt die langjährig mittlere Grundwasserneubildung in Hessen 101 mm/a, d.h. nur 12 % des Niederschlags wird zu Grundwasser. Die Simulationsergebnisse liegen landesweit in einem 100 m Raster vor. Umgerechnet auf die Fläche Hessens werden im langjährigen Mittel (1971 – 2000) jährlich rd. 2,13 Mrd. m³ Grundwasser neu gebildet. Demgegenüber werden im Mittel jährlich rd. 407 Mio. m³ Grundwasser entnommen. Der Vergleich zeigt, dass im langjährigen Mittel hessenweit jährlich rd. 5-fach mehr Grundwasser neu gebildet als gefördert wird. Allerdings ist die Grundwasserneubildung durch eine ausgeprägte jährliche und periodische Variabilität gekennzeichnet. Die Jahreswerte unterliegen extremen Schwankungen, der Schwankungsbereich beträgt mehr als 200 mm (KLIWA, 2017).

Bei der Verwendung der Modellergebnisse müssen die Vereinfachungen des Modells und der Maßstab bzw. die Auflösung der Eingangsdaten (z.B. HÜK 200, ATKIS-Landnutzung) berücksichtigt werden. Das Modell wurde ursprünglich für großräumige Betrachtungen auf regionaler Maßstabsebene (1:200.000) konzipiert.

Rheinland-Pfalz (Christoph Baumeister)

Neben einer abflussbasierten Grundwasserneubildungsberechnung aus Pegelwerten unter der Annahme das die Gewässer in Trockenzeiten ausschließlich aus dem Basisabfluss gespeist werden (WUNDT, 1958; KILLE, 1970), und anschließender Regionalisierung, wurden räumlich hochaufgelöste Sickerwasserraten auf Basis der Bodenübersichtskarte 1:25.000 unter Anwendung von GWN-BW berechnet. Daraus ergibt sich ein mittleres natürliches Grundwasserdargebot in Rheinland-Pfalz von etwa 2 Milliarden m³/a. Das entspricht einer Neubildungshöhe von 102 mm/a oder 12 % des mittleren Niederschlagsdargebots von etwa 16.300 Mio. m³/a.

Unterschiedliche klimatische, bodenkundliche und geologische Gegebenheiten bedingen eine ungleiche Verteilung der Grundwasservorräte im Land. Überdurchschnittliche Niederschläge in Verbindung

mit guten Speichereigenschaften der Gesteine bewirken hohe Grundwasserneubildungsraten im Pfälzerwald, im Bitburger Land, im Raum Gerolstein und im Vulkangebiet der Osteifel. Trotz zum Teil hoher Niederschläge liegt die Grundwasserneubildung im Rheinischen Schiefergebirge und im Nordpfälzer Bergland in Folge schwerer Böden und geringer Speicherkapazität der Gesteine weit unter dem Landesdurchschnitt. Gute Speichereigenschaften der Gesteine in Verbindung mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen führen im Gebiet der Vorderpfalz, im Neuwieder Becken sowie im Raum Mainz/Bingen zu mittleren Neubildungsraten.

Berlin (Alexander Limberg)

Die genaue Kenntnis der Grundwasservorräte ist für das Land Berlin unerlässlich, da das Wasser für die öffentliche Wasserversorgung von Berlin zu 100 % aus dem Grundwasser gewonnen wird (im Jahr 2017 waren es 217 Millionen m³). Dieses Grundwasser wird von neun Wasserwerken nahezu vollständig (90 %) aus dem eigenen Stadtgebiet gefördert. Zur Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsrate wurde für Berlin das an der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Berlin entwickelte und programmierte komplexe Modell ABIMO angewendet (Glugla & Fürtig 1997, Glugla & Müller 1997, Glugla & Eylich 1993, Glugla & König 1989, Glugla et al. 1999). Grundlage waren u.a. die langjährigen Mittelwerte des Niederschlags der Jahresreihe 1961 bis 1990, Bodendaten (Feldkapazitäten), Daten zur Vegetationsstruktur, Versiegelungsgrade und Daten zur Kanalisation versiegelter Oberflächen. Das Berechnungsverfahren greift auf die Datenbestände des Informationssystems Stadt und Umwelt zu. So wurde für ca. 25.000 Einzelflächen zuerst der Gesamtabfluss (Niederschlag minus Verdunstung) und dann der Oberflächenabfluss und die Versickerung (Sickerwasserrate) bestimmt. Auf den bindig ausgebildeten Grundmoränen-Hochflächen (Geschiebemergel) wurde die Grundwasserneubildung mit aufwändig ermittelten Korrekturfaktoren aus der Sickerwasserrate umgerechnet. Die Karte der Grundwasserneubildung wurde 2003 erstmalig erstellt und 2007 und 2013 aktualisiert. Sie ist im Umweltatlas von Berlin veröffentlicht http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/db217_03.htm. Die Grundwasserneubildungsrate variiert auf rd. 80 % der Landesfläche zwischen 50 und 200 mm/Jahr, im Durchschnitt sind es 141 mm/Jahr (flächengewichteter Mittelwert). Die Darstellung der Grundwasserneubildung auf der Karte erfolgt flächendifferenziert gesondert für die 20.000 Blockteilflächen. Es ist zu beachten, dass die Berechnungen für Sickerwasserraten unter Berücksichtigung der Versiegelung durchgeführt wurden. Dies bedeutet, dass die angegebenen Werte der Grundwasserneubildung einen Mittelwert über versiegelte und unversiegelte Bereiche einer dargestellten Blockfläche einschließlich des sie umgebenden Straßenlandes wiedergeben. Da die Versiegelung und die unterschiedlichen Kanalisierungsgrade den Wasserhaushalt erheblich beeinflussen, sind die angegebenen Werte nicht auf die unversiegelten Bereiche der jeweiligen Flächen übertragbar.

Niedersachsen (Gabriele Ertl, Tobias Schlinsog)

Nachdem für die Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung für Niedersachsen in den 1980er Jahren das Modell „Dörhöfer & Josopait“ (DÖRHÖFER & JOSOPAIT 1980) und seit 1998 das Modell „GROWA“ („Großräumiger Wasserhaushalt“, u.a. KUNKEL et al. 2006, WENDLAND et al. 2003) genutzt wurden, rückte mit dem wachsenden Bewusstsein zu den Fragen des Klimawandels die Notwendigkeit einer innerjährlichen Betrachtung des Wasserhaushaltes in den Fokus. Im Zuge dessen entwickelte das Forschungszentrum Jülich in Zusammenarbeit mit dem LBEG das Wasserhaushaltsmodell „mGROWA“ („monatlicher Großräumiger Wasserhaushalt“, HERRMANN et al. 2013). Damit können die wesentlichen Komponenten des Wasserhaushaltes des Festlandes (tatsächliche Evapotranspiration, Gesamtabfluss, Abflusskomponenten Direktabfluss, Drainageabfluss und Grundwasserneubildung) in

hoher räumlicher (100 m Raster) und zeitlicher Auflösung (Tage bzw. Monate) auf Landesebene über lange Zeiträume (hydrologische Perioden) simuliert werden. Im Jahr 2013 wurde die erste Version vom LBEG veröffentlicht, die derzeit überarbeitet und aktualisiert wird. Das Modell mGROWA ist rasterbasiert und deterministisch. Im ersten Programmschritt wird die tatsächliche Evapotranspiration in Tagesschritten für verschiedene Standorte berechnet. Im zweiten Schritt wird der resultierende Gesamtfluss mit Hilfe von Base Flow Indizes (BFI) separiert.

2018 findet eine Aktualisierung von mGROWA statt. Zu den Neuerungen zählen u.a. aktuelle Landnutzungsdaten mit einer geänderten Zuteilung zu den Landnutzungsklassen. Das Digitale Geländemodell DGM50 wird vom DGM25 abgelöst. Anstatt der Hydrogeologischen Übersichtskarte 1:200.000 wird die Geologische Karte 1:50.000 für die Festlegung der BFI-Werte verwendet. Der Flurabstand (BÜK50) wird künftig im Jahresgang eingehen.

Des Weiteren findet im Rahmen einer Klimawirkungsanalyse eine Simulation möglicher Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen statt. Anhand aktueller Klimaprojektionsdaten sollen so besonders betroffene Bereiche identifiziert werden, um Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln, die langfristig eine nachhaltige Nutzung des Grundwasserdargebotes ermöglichen. Hierbei stehen drei Zeitabschnitte im Mittelpunkt der Untersuchungen: 1971-2000 als Referenzperiode, 2021-2050 als nahe Zukunft und 2071-2100 als ferne Zukunft.

Bremen (Björn Panteleit)

Aufgrund der räumlichen Nähe wird in Bremen die Grundwasserneubildung analog zum Vorgehen in Niedersachsen bestimmt. Aktuell findet daher das Wasserhaushaltsmodell „mGROWA“ („monatlicher Großräumiger Wasserhaushalt“, HERRMANN et al., 2013) auch im Bereich des Bundeslandes Bremen Anwendung.

Im Projekt FREEWAT (DE FILIPPIS et al, 2017) hat der GdF im Rahmen einer Fallstudie eine Klimawirkungsanalyse für den Bereich der Stadt Bremerhaven durchgeführt. Hierbei wurden mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Grundwasser für die Jahre 2040, 2070 und 2100 simuliert. Neben einem Meeresspiegelanstieg sind hierbei auch veränderte Grundwasserneubildungsraten eingeflossen (PANTELEIT et al, 2018). Diese resultierten aus dem Modell mGROWA mit Eingangsdaten aus den Prognosen des regionalen Klimamodells WETTREG2010 (HERRMANN et al., 2017).

Weitere zeitlich höher aufgelöste Simulationen sind ebenso geplant, wie auch eine Aktualisierung der mGROWA-Eingangsdaten.

Sachsen-Anhalt (Martin Schnepfmüller)

Sachsen-Anhalt ist, bedingt durch seine geomorphologische Ausprägung, im Verhältnis zum übrigen Bundesgebiet durch geringe Niederschlagsraten und dazu relativ hohe Verdunstungsraten gekennzeichnet. Die höchsten Niederschläge > 700 mm/a und daraus resultierende Neubildungsraten > 100 mm/a finden sich im Harz. Die übrige Landesfläche Sachsens-Anhalts befindet sich im s.g. Regenschatten des Harzes bzw. in dessen Einflussbereich und weist mittlere Niederschläge < 650 mm/a und Neubildungsraten < 100 mm/a auf. Rund 42 % der Landesfläche besitzt nach aktuellen Berechnungen mit dem Modellierungssystem ArcEGMO© (www.arcegmo.de, Klimareihe 1971 bis 2000) weniger als 25 mm/a Grundwasserneubildung. Die Grundwasserneubildung ist hier die Summe aus schnellem Grundwasserzwischenabfluss (RG1) und langsamen Grundwasserbasisabfluss (RG2). Die Summe des gesamten unterirdischen Abflusses (RU) wird aus dem hypodermischen Abfluss (Interflow, RH), dem

Drainageabfluss (RD) und der Grundwasserneubildung (GWN) gebildet. Der Mittelwert (ohne Flächenwichtung) über die Fläche Sachsen-Anhalts für GWN beläuft sich aktuell auf rund 35 mm/a und für RU auf 64 mm/a.

Aufgrund der genannten Verhältnisse bestehen überwiegend Brennpunkte zwischen Grundwasserbilanz/Naturschutz/WRRL und Grundwassernutzungen und unter Berücksichtigung der Nitratproblematik ergeben sich lange Grundwasserfließ- und –verweilzeiten, die die Bewertung von Maßnahmen erschweren.

Bis Ende des Jahres 2018 sollen die Modelldaten für das Modellsystem ArcEGMO© aktualisiert und die Klimareihe 1981 bis 2010 (REGNIE Daten des DWD) eingearbeitet werden. Es werden weiterhin Verbesserungen in der Methode in Bezug auf die Versiegelung, Anschlussgrade und Kanalisationstypen vorgenommen. Des Weiteren erfolgen Verbesserungen bei der Betrachtung des Kapillaraufstieges und der Grundwasserverlagerungen. Durch die Verbesserung/Anpassung der Modelldaten besteht die Hoffnung ein differenziertes Bild der Grundwasserneubildungsverhältnisse in Sachsen-Anhalt zu erlangen.

Zusammenfassung

Im Rahmen eines von der AG Hydrogeologie der Geologischen Dienste Deutschlands initiierten Fachaustauschs zur Berechnung der Grundwasserneubildung wurden verschiedene Verfahren vorgestellt und diskutiert. Bei der Diskussion zur Vergleichbarkeit der Grundwasserneubildungsdaten wurde festgestellt, dass der Eingangswert Niederschlag die Bilanzgröße mit der mit Abstand höchsten Sensitivität ist. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse sollte die Verwendung einheitlicher Niederschlagsdaten erreicht werden, die vom Deutschen Wetter Dienst (DWD) bereitgestellt werden sollten.

In vielen Bundesländern liegen langjährige Erfahrungen zum Einsatz von Daten zur Grundwasserneubildung in der wasserwirtschaftlichen Praxis vor. Dabei zeigt sich, dass die unterschiedlichen, auf die jeweiligen hydrogeologischen und klimatischen Verhältnisse angepassten Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung realitätsnahe Ergebnisse liefern und somit eine wichtige Grundlage für wasserwirtschaftliche Planungen und Entscheidungen sind.

Dr. Jörg Elbracht, Gabriele Ertl und Dr. Bernd Leßmann

Literatur:

DÖRHÖFER, G. & JOSOPAIT, V. (1980): Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. – Geol. Jb., **C 27**: 45–65; Stuttgart.

DE FILIPPIS, G., BORSI, I., FOGLIA, L., CANNATA, M., MANSILLA, V.V., VASQUEZ-SUNE, E., GHETTA, M., ROSSETTO, R. (2017): Software tools for sustainable water resources management: the GIS-integrated FREEWAT platform. Rend. Online Soc. Geol. Ital., 42: 59–61.

DESTATIS (2013): Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserversorgung – Öffentliche Wasserversorgung. – Fachserie 19, Reihe 2.1.1; (<https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/WasserOeffentlich.html>).

GLUGLA, G. & KÖNIG, B. (1989): Der mikrorechnergestützte Arbeitsplatz Grundwasserdargebot. - Wasserwirtschaft-Wassertechnik, **39 (8)**: 178 – 181, Berlin.

GLUGLA, G., EYRICH, A. (1993): Ergebnisse und Erfahrungen bei der Anwendung des BAGROV-GLUGLA-Verfahrens zur Berechnung von Grundwasserhaushalt und Grundwasserneubildung im Lockergestein Norddeutschlands. - Kolloquium Hydrogeologie, **10/93**: 22 – 26; Erfurt.

GLUGLA, G., FÜRTIG, G. (1997): Abflußbildung in urbanen Gebieten. - Schriftenreihe Hydrologie/Wasserwirtschaft, **14**: 140-160; Bochum.

GLUGLA, G., MÜLLER, E. (1997): Grundwasserneubildung als Komponente der Abflussbildung. In: Leibundgut, C. & Demuth, S. [Hrsg.]: Grundwasserneubildung. Freiburger Schriften zur Hydrologie, **5**: 23 -35; Freiburg.

GLUGLA, G., GOEDECKE, M., WESSOLEK, G., FÜRTIG, G. (1999): Langjährige Abflußbildung und Wasserhaushalt im urbanen Gebiet Berlin. - Wasserwirtschaft, **89** (1): 34 – 41; Wiesbaden.

GUDERA, T. & MORHARD, A. (2015): Hoch aufgelöste Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung mit GWN-BW. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **59** (5): 205-216; Koblenz (DOI: 10.5675/HyWa_2015,5_1).

HERGESELL, M. & BERTHOLD, G. (2004): Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch die Regionalisierung des Baseflow-Index (BFI). – Jahresbericht 2004 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie: 47-66; Wiesbaden.

HERRMANN, F., CHEN, S., HEIDT, L., ELBRACHT, J., ENGEL, N., KUNKEL, R., MÜLLER, U., RÖHM, H., VERECKEN, H. & WENDLAND, F. (2013): Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Modell mGROWA. - Hydrologie u. Wasserbewirtschaftung, **57** (5): 206-224; Koblenz.

HERRMANN, F., HÜBSCH, L., ELBRACHT, J., ENGEL, N., KELLER, L., KUNKEL, R., MÜLLER, U., RÖHM, H., VERECKEN, H. & WENDLAND, F. (2017): Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung **61** (4): 244-260.

KILLE, K. (1970): Das Verfahren MoMnQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. – Z. dt. geol. Ges., Sonderh. Hydrogeologie: 89–95; Hannover.

KLIWA (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien. - KLIWA Berichte, **17**: 112 S.; Karlsruhe (<http://www.kliwa.de/publikationen-hefte.htm>)

KLIWA (2017): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951 2015). - KLIWA Berichte, **21**: 102 S.; Karlsruhe (<http://www.kliwa.de/publikationen-hefte.htm>).

KOPP, B., BAUMEISTER, C., GUDERA, T., HERGESELL, M., KAMPF, J., MORHARD, A., NEUMANN, J. (2018): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen von 1951 bis 2015. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **62** (2); DOI: 10.5675/HyWa_2018,2_1; In Druck.

KUNKEL, R., BOGENA, H., TETZLAFF, B. & WENDLAND, F. (2006): Digitale Grundwasserneubildungskarte von Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Hamburg und Bremen: Erstellung und Auswertungsbeispiele. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung: **50 (5)**, 212–219; Koblenz.

LFU (2009): Hydrogeologische Karte von Bayern 1:500.000 – Blatt 4: Mittlere Grundwasserneubildung aus Niederschlag (1971-2000), Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof.

PANTELEIT, B., JENSEN, S., SEITER, K., SIEBERT, Y. (2018): Das Bremerhavener Grundwasser im Klimawandel - Eine FREEWAT-Fallstudie – Grundwasser: 23: ([HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S00767-017-0385-9](https://doi.org/10.1007/s00767-017-0385-9)).

WENDLAND, F., KUNKEL, R., TETZLAFF, B. & DÖRHÖFER, G. (2003): GIS-based determination of the mean long-term groundwater recharge in Lower Saxony. – Environmental Geol.: **45(2)**: 273–278; New York.

WUNDT, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. In: Grahmann, R.: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung. Forsch. dt. Landeskunde, **104**: 47–54; Remagen.