

J. Meßer, R. Ohlenbusch, M. Getta

Entwicklung eines instationären Prognosewerkzeuges zur Berechnung der Klimawandel- bedingten Veränderungen der Grundwasserneubildung

Gefördert durch:



ENTWICKLUNG EINES INSTATIONÄREN PROGNOSEWERKZEUGES ZUR BERECHNUNG DER KLIMAWANDEL-BEDINGTEN VERÄNDERUNGEN DER GRUNDWASSERNEUBILDUNG

Johannes Meßer, Renke Ohlenbusch, Michael Getta

Emschergenossenschaft

www.eglv.de

dynaklim-Publikation Nr. 14 / Oktober 2011



Entwicklung eines instationären Prognosewerkzeuges zur Berechnung der Klimawandel-bedingten Veränderungen der Grundwasserneubildung

Im Forschungs- und Netzwerkprojekt *dynaklim* untersucht die Emschergenossenschaft u. a. die wasserwirtschaftlichen Auswirkungen von klimabedingten Veränderungen des Grundwasserhaushalts in den urbanen Siedlungsgebieten. Dazu sollen mit Hilfe der vorliegenden numerischen Grundwassermodelle unter Berücksichtigung der Realisationsergebnisse des regionalen Klimamodells COSMO-CLM realistische Auswirkungsszenarien und Anpassungsstrategien für die Siedlungsentwässerung abgeleitet werden. Zur Abbildung der innerjährlichen Verschiebungen der Niederschläge ist es erforderlich, die Grundwasserneubildung als ausschlaggebende Wasserhaushaltsgröße für die Modellierung instationär und flächendifferenziert zu berechnen. Da bislang keine verifizierten instationären Wasserhaushaltsmodellansätze verfügbar sind, wurde in Anlehnung an die bisher bekannten Verfahren ein geeignetes Werkzeug entwickelt, dass bei der instationären Erweiterung der stationär kalibrierten Grundwassermodelle die Massenbilanz erhält. Auf Grund der speziellen Anforderungen des hochurbanen Emschergebietes wurde das Verfahren nach Meßer 2008 gewählt.

Die damit durchgeführten stationären und instationären Nachkalibrierungen der Grundwassermodelle weisen eine gute Anpassung auf. Aus der klimatischen Bodenwasserbilanz wurden Trends bis zu den Jahren 2050 und 2100 im Emschergebiet berechnet. Im Ergebnis ist zu erwarten, dass die Grundwasserstände größeren innerjährlichen Schwankungen unterliegen werden als heute.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Konzept und Methodik	4
2.1	Auswahl des Berechnungsverfahrens	6
2.2	Berechnungsverfahren	7
3	Zu erwartende Wasserhaushaltsänderungen im Emschergebiet	10
4	Ergebnisse	14
4.1	Grundwasserneubildung und Jahresgang der Wasserhaushaltsgrößen	14
4.2	Langfristige Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	16
4.3	Aktualisierung der Grundwassermodelle	18
4.3.1	Grundwassermodell Nettebach	19
4.3.2	Grundwassermodell Wanne-Nord	22
5	Zusammenfassung	23
6	Fazit und Ausblick	24
	Literaturverzeichnis	27

Abbildungen

Abb. 1:	Grundwassermodelle im Gebiet der Emscher-genossenschaft	5
Abb. 2:	Berücksichtigte Parameter und Verfahrensgang zur Berechnung der instationären Grundwasserneubildung	8
Abb. 3:	Monatliche Grundwasserneubildung unterschiedlicher Böden und Flurabstände bei Grünlandnutzung und geringer Hangneigung	9
Abb. 4:	Jahresniederschlag WWJ 1962 bis 2009, CLM 1, CLM 2 und Bochum (gemessen)	12
Abb. 5:	Sommerniederschlag 1962 bis 2010, CLM 1, CLM 2 und Bochum (gemessen)	12
Abb. 6:	Grasreferenzverdunstung WWJ 1962 bis 2010, CLM 1, CLM 2 und Bochum (gemessen)	13
Abb. 7:	Grundlagendaten für die Grundwasserneubildungsberechnung	14
Abb. 8:	Flächendifferenzierte Grundwasserneubildungsrate im Emschergebiet	15
Abb. 9:	Einzugsgebietsbezogene Grundwasserneubildungsrate im Emschergebiet	15
Abb. 10:	Grundwasserneubildungsrate im Jahresverlauf im Emschergebiet (Mittel 1961-1990)	16
Abb. 11:	Gesamtabfluss-, Direktabfluss- und Grundwasserneubildungsrate für eine typische Fläche im Emschergebiet (geringe Hangneigung, sandig-lehmiger Boden, mittlere Flurabstände, 60-80 % Befestigung (24 % Emschergebiet), CLM 1)	17

Abb. 12:	Gesamtabfluss-, Direktabfluss- und Grundwasserneubildungsrate für eine typische Fläche im Emschergebiet (geringe Hangneigung, sandig-lehmiger Boden, mittlere Flurabstände, 60-80 % Befestigung (24 % Emschergebiet), CLM 2)	17
Abb. 13:	Grundwasserneubildungsrate im Jahresverlauf für eine typische Fläche im Emschergebiet (geringe Hangneigung, sandig-lehmiger Boden, mittlere Flurabstände, 60-80 % Befestigung (24 % Emschergebiet), CLM 1 unten und CLM 2 oben) für die 3 Zeitschnitte	18
Abb. 14:	Grundwasserneubildung nach Meßer (2008) am Beispiel des Grundwassermodells Nettebach	19
Abb. 15:	Änderungen bei der Grundwasserneubildung (Differenz zwischen den Verfahren Meßer 2008 - 1997) im Grundwassermodell Nettebach	19
Abb. 16:	Durch die Aktualisierung der Neubildung verursachte Potentialdifferenzen im Grundwassermodell Nettebach	20
Abb. 17:	Potentialdifferenzen im Grundwassermodell Nettebach nach automatischer Kalibrierung der Durchlässigkeitsbeiwerte mit dem Programm SPRING nach 10 Iterationsschritten	20
Abb. 18:	Änderungen bei der Grundwasserneubildung (Differenz zwischen den Verfahren Meßer 2008 - 1997) im Grundwassermodell Wanne-Nord	22
Abb. 19:	Aktualisierte Grundwasserneubildung und instationäre Kalibrierung über 36 Monate am Beispiele Wanne-Nord	23

Tabellen

Tab. 1:	Trend der Klimadaten gemäß CLM 1	11
Tab. 2:	Trend der Klimadaten gemäß CLM 2	11

1 Einleitung

Die EmscherGenossenschaft untersucht im *dynaklim*-Projekt u. a. die wasserwirtschaftlichen Auswirkungen von klimabedingten Veränderungen des Grundwasserhaushalts in den urbanen Siedlungsgebieten. Die Änderungen der Grundwasserstände können insbesondere in Stadtgebieten zu negativen Auswirkungen auf die Bebauung, die Infrastruktur, Altlasten und alle Anlagen der Siedlungswasserwirtschaft führen. Aufgrund der Langfristigkeit wasserwirtschaftlicher Planungen sind Veränderungen des Klimas, wie sie für die nächsten 50 bis 100 Jahre erwartet werden, bereits jetzt von großer Bedeutung.

Mit Hilfe der bei der EmscherGenossenschaft vorliegenden numerischen Grundwassermodelle sollen unter Berücksichtigung der Realisationsergebnisse des regionalen Klimamodells COSMO-CLM (CLM-Community 2008) die Veränderungen des Grundwasserstands bestimmt und daraus realistische Auswirkungsszenarien und Anpassungsstrategien für die Siedlungsentwässerung abgeleitet werden. Zur Abbildung der prognostizierten innerjährlichen Verschiebungen der Niederschläge ist es erforderlich, die Grundwasserneubildung als ausschlaggebende zeitabhängige Wasserhaushaltsgröße für die Grundwassermodellierung instationär und flächendifferenziert zu berechnen. Da bislang keine verifizierten instationären Wasserhaushaltsmodellansätze verfügbar sind, sollte in Anlehnung an das Verfahren BAGLUVA (ATV-DVWK 2002) zur Berechnung der Verdunstung in Kombination mit einer Berechnung der klimatischen Bodenwasserbilanz (DVWK 1996) und der Grundwasserneubildungsrechnung (z.B. nach Meßer 1997) ein geeignetes Prognosewerkzeug entwickelt werden.

Ziel der EmscherGenossenschaft ist es, durch Anpassungen der Bewirtschaftungsmaßnahmen eine sichere und nachhaltige Entwässerung zu garantieren. Die Erarbeitung von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel soll im Sinne einer integralen Wasserwirtschaft erfolgen, um die bestehenden Wechselwirkungen zwischen dem Niederschlagsgeschehen, den Grundwasserständen, den Gewässern und dem Abwassersystem zu berücksichtigen.

2 Konzept und Methodik

Mit Hilfe der vorliegenden und zu erarbeitenden Grundwasserströmungsmodelle (Abb. 1) wird der Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserstände und -abflüsse sowie die naturnahe Regenwasserbewirtschaftung untersucht. Mit den Modellen lassen sich für die ausgewählten Betrachtungszeiträume (2021-2050 und 2071-2100) flächendeckend die zu erwartenden Flurabstände stationär und instationär berechnen und Gebiete mit dem Risiko einer temporären Vernässung oder Überflutung ausweisen. Daneben ermöglichen sie die Bilanzierung der grundwasserbürtigen Abflüsse und geben Hinweise auf ggf. zukünftig trocken fallende Gewässer.

Für rund 70 % des Emscher-Einzugsgebietes (865 km²) stehen verschiedene großräumige stationäre Grundwasserströmungsmodelle zur Verfügung (Abb. 1), die zur Ermittlung von Klimawandel bedingten Veränderungen der Grundwasserstände eingesetzt werden sollen. Im Vorfeld müssen die vorhandenen Modelle an die aktuelle Grundwassersituation angepasst (Grundwassermessstellen und Gewässerpegel, neue Vermessungsdaten) und unter Berücksichtigung der inzwischen erfolgten wasserwirtschaftlichen Maßnahmen aktualisiert werden. Ergänzend wird für den Stadtbereich von Dortmund ein neues großräumiges Grundwassermodell (Erweiterungsbereich Dortmund, Abb. 1) erstellt. Dieses Modell deckt auch Teile des Lippeeinzugsgebietes (Seseke) mit ab.

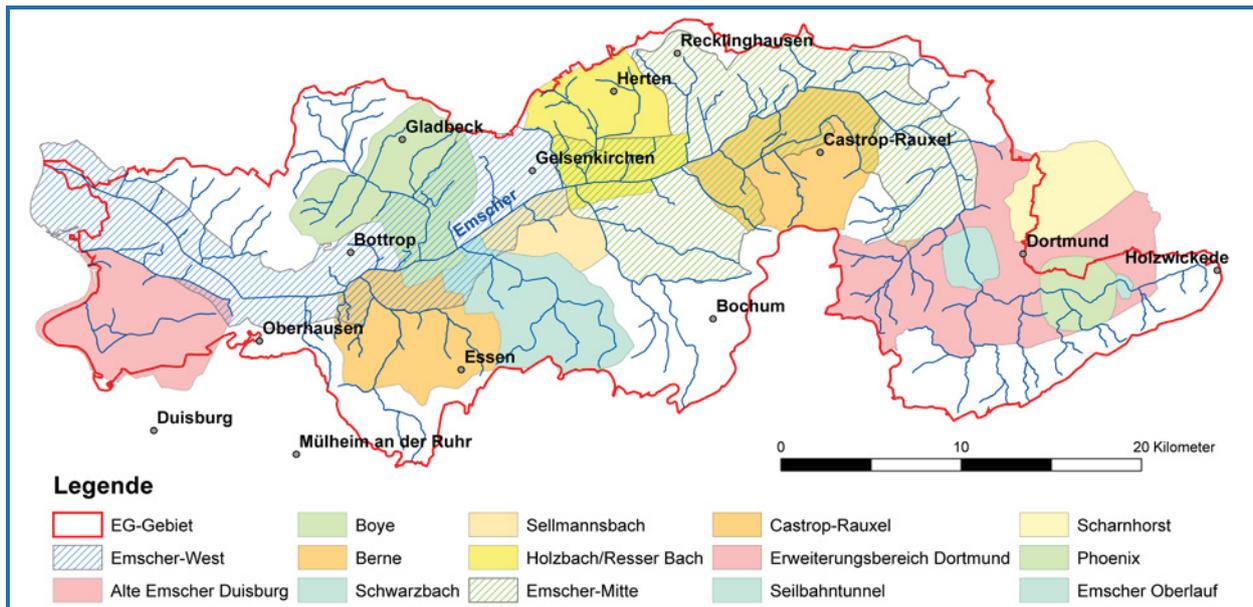


Abb. 1: Grundwassermodelle im Gebiet der Emschergenossenschaft

In den eingesetzten Grundwassermodellen ist die Höhe der Grundwasserneubildung eine der maßgeblichen Randbedingungen, die durch den Einfluss des Klimawandels Veränderungen unterliegt. Die Höhe der Grundwasserneubildung bestimmt den Niedrigwasserabfluss der Oberflächengewässer und ist eine wesentliche Eingangsgröße für wasserwirtschaftliche Modellsimulationen. Bislang wurden zur Kalibrierung für die regionalen Grundwassermodelle im Emschergebiet langjährige mittlere Grundwasserneubildungswerte nach dem Verfahren nach Meßer (1997) verwendet. Die Ermittlung der Grundwasserneubildung geht dabei von der Berechnung der Jahreswasserbilanz aus. Die wesentlichen Veränderungen für den Wasserhaushalt durch den prognostizierten Klimawandel ergeben sich jedoch nicht aus der Jahresbilanz, sondern aus den innerjährlichen Veränderungen. Um die Auswirkungen auf den Grundwasserstand und den Niedrigwasserabfluss prognostizieren zu können, sind daher instationäre Berechnungen der Wasserhaushaltsgrößen in Monatsschritten für den Jahresverlauf erforderlich.

Zur Berechnung der flächendifferenzierten instationären Grundwasserneubildung sollte deshalb ein Verfahren entwickelt werden, dass bei der instationären Erweiterung der bereits stationär kalibrierten Grundwassermodelle die Massenbilanz erhält. Dazu muss die jährliche Grundwasserneubildungsrate auf die Monate aufgeteilt und der Jahresgang der Wasserhaushaltsgrößen für den aktuellen Ausgangszustand und die Projektionszeiträume (2021-2050 und 2071-2100) flächendifferenziert ermittelt werden.

Die Ergebnisse der instationären Grundwasserneubildungsberechnungen können sowohl für die Grundwassermodelle als auch für die hydrologischen Gebietsmodelle als Randbedingung herangezogen werden. Mit den instationär kalibrierten Grundwassermodellen stehen dann Werkzeuge bereit, mit denen instationäre Berechnungen der Auswirkungen auf die Grundwasserstände und den grundwasserbürtigen Abfluss durchgeführt werden können.

2.1 Auswahl des Berechnungsverfahrens

Als Eingangsdaten für die Grundwassermodellierung kommen grundsätzlich die Berechnungen über Bodenwasserhaushaltsmodelle oder über die Grundwasserneubildung, ermittelt aus der Wasserhaushaltsgleichung, in Betracht. Mit Bodenwasserhaushaltsmodellen (z.B. SWAP) ist man in der Lage, zeitlich sehr hoch aufgelöst (Tagesschritte) die Sickerwasserrate zu berechnen. Insbesondere für urbane Räume mit den entsprechenden Besonderheiten im Hinblick auf den Befestigungsgrad und den daraus resultierenden Direktabfluss gibt es keine verwendbaren Applikationen der Bodenwasserhaushaltsmodelle. Darüber hinaus ist die Berechnung der täglichen Sickerwasserrate für das Ziel der Untersuchungen nicht erforderlich, da der Grundwasserstand vergleichsweise träge auf Einträge reagiert.

Aus diesen Gründen wurde entschieden, die Grundwasserneubildung auf der Basis der Wasserhaushaltsgleichung zu berechnen.

Hierzu wurden in der Vergangenheit verschiedene Berechnungsverfahren publiziert. Zu nennen sind insbesondere die Methoden nach

- BAGROV/GLUGLA,
- RENGER & WESSOLEK und
- DORHÖFER & JOSOPAIT.

Bei den Verfahren BAGROV/GLUGLA (Bagrov 1953, Bamberg et al. 1980, Glugla et al. 1976) und RENGER & WESSOLEK (Renger et al. 1980, 1986, 1990, Sponagel et al. 1983) wird generell nicht die Grundwasserneubildung berechnet, sondern lediglich die reale Verdunstung, die vom Niederschlag subtrahiert den Gesamtabfluss ergibt. Bei DORHÖFER & JOSOPAIT (1980) schließt sich die Aufteilung des Gesamtabflusses in den Direktabfluss und den grundwasserbürtigen Abfluss an. Letzterer ist nach den Gleichungen 1 und 2 bei fehlender Entnahme der Grundwasserneubildung gleichzusetzen (Schroeder et al. 1990). Bei verschiedenen weiteren Autoren (Bogena et al. 2003, Neumann 2004, Hergesell et al. 2005) erfolgt die Aufteilung des Gesamtabflusses über einen Baseflow-Index (BFI), der aus Auswertungen der Pegeldata von Gewässern abgeleitet wird. Hier ist allerdings Vorsicht geboten, da wasserwirtschaftliche Einflüsse auf das Abflussgeschehen berücksichtigt werden müssen (z.B. Im- und Export von Wasser über die Wasserscheide, Talsperren und andere den Abfluss regulierende Einflüsse). Die Jahreswerte der Grundwasserneubildung bzw. der grundwasserbürtige Abfluss wird nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$\dot{h}_{AGW} = \dot{h}_N - \dot{h}_V - \dot{h}_{Ad} \quad (1)$$

$$\dot{h}_{Ad} = (\dot{h}_N - \dot{h}_V) \cdot \frac{p}{100} \quad (2)$$

$$\dot{h}_{AGW} = \text{grundwasserbürtiger Abflussrate (mm/a)}$$

$$\dot{h}_N = \text{Niederschlagsrate (mm/a)}$$

$$\dot{h}_V = \text{Evapotranspirationsrate (mm/a)}$$

$$(\dot{h}_N - \dot{h}_V) = \text{Gesamtabflussrate (mm/a)}$$

$$\dot{h}_{Ad} = \text{Direktabflussrate (mm/a)}$$

$$p = \text{Direktabflussanteil am Gesamtabfluss (\%)}$$

Die drei oben genannten grundlegenden Berechnungsverfahren sind vielfach modifiziert und angewandt worden. Das aktuelle Verfahren BAGROV/GLUGLA ist im Merkblatt M 504 (ATV-DVWK 2002) detailliert dargestellt. Weiterentwicklungen des Verfahrens RENGER & WESSOLEK sind bei Bogena et al. (2003) und Grossmann et al. (1999) zu finden. Das Verfahren von DORHÖFER & JOSOPAIT wurde abgewandelt und verfeinert von Schroeder et al. (1990) und von Meßer (1997, 2008) für Bearbeitungen im urbanen Raum weiterentwickelt. Für alle genannten Verfahren liegen Programm-Module zur Berechnung in einem Geoinformationssystem (GIS) vor.

Bei mehreren Anwendungen wurden die Berechnungsergebnisse mit Auswertungen von Abflussmessungen nach Wundt (1958) bzw. Kille (1970) verglichen und mehr oder weniger gute Übereinstimmungen gefunden. Zur Bearbeitung des Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD) wurde ein Verfahrenvergleich durchgeführt und die Ergebnisse mit Auswertungen von Abflussmessungen verglichen (Neumann et al. 2001, Neumann 2004). Im Rahmen der Entwicklung und Anwendung eines makroskaligen Verfahrens kommt Neumann (2004) dabei zu dem Schluss: „Auf der Grundlage der betrachteten 106 Einzugsgebiete zeigt der Ansatz von MEßER, bezogen auf Trendverlauf und Korrelation, die beste Anpassung aller genannten Modellversionen, während die Modifikationen nach SCHROEDER & WYRWICH, GROWA 98 sowie insbesondere die ursprüngliche Version von DÖRHÖFER & JOSOPAIT größere Streuungen und systematische Abweichungen zeigen“. Das Verfahren nach Meßer (2008) ist an die örtlichen Gegebenheiten insbesondere auf die Urbanität angepasst.

Die Ergebnisse der Verfahren sind grundsätzlich vergleichbar. Bei der jeweiligen Problemstellung ist vor der Anwendung immer auch die Verwendbarkeit der Verfahren zu prüfen. Beispielsweise wurde die Methode von RENGER & WESSOLEK in einem niederschlagsarmen Raum entwickelt. Die reale Verdunstung ist bei diesem Verfahren sehr stark vom Niederschlag abhängig, so dass in niederschlagsreichen Gebieten zu hohe reale Verdunstungswerte berechnet werden. Dass die potenzielle Verdunstung von den Höhenlagen zum Flachland zunimmt, während die reale Verdunstung bei gleichen Boden- und Nutzungsbedingungen abnimmt, erscheint unrealistisch, zumal die Länge der Vegetationszeit zunimmt. Die Methode zur Berechnung der realen Verdunstung nach RENGER & WESSOLEK ist somit nicht in ganz Nordrhein-Westfalen verwendbar. Die Berechnungen mit dem Verfahren GROWA (Bogena et al. 2003, Kunkel et al. 2006) für Nordrhein-Westfalen stehen insofern unter einem Vorbehalt. Darüber hinaus ist die Ableitung des Direktabflusses aus dem Baseflow-Index der Vorfluter in urbanen Räumen nicht möglich. Beispielsweise wird der Abfluss der Emscher zu einem großen Teil durch den Abfluss aus den Kläranlagen geprägt, deren Wasser überwiegend aus dem Einzugsgebiet von Ruhr und Lippe stammt.

Aus den genannten Gründen kommt das Verfahren nach Meßer (2008) zur Anwendung.

2.2 Berechnungsverfahren

Ziel der Bearbeitung ist die flächendifferenzierte Bestimmung der langjährig mittleren und monatlichen Grundwasserneubildung und der anderen Wasserhaushaltsgrößen. In Abb. 2 sind die benötigten Eingangsdaten bzw. die verwendeten Grundlagen (eckige Rahmen) und die berechneten Größen (gerundete Rahmen) sowie die Beziehungen zueinander gemäß dem Verfahren von Meßer (2008) angegeben. Für die Berechnung von Verdunstung und Direktabfluss wird eine Flächenverschneidung der jeweils notwendigen Grundlagenparameter mit dem Programmsystem ArcInfo durchgeführt. Für jede in sich homogene Kleinfläche werden die beiden Größen in mm/a berechnet.

Entwicklung eines instationären Prognosewerkzeuges zur Berechnung der Klimawandel-bedingten Veränderungen der Grundwasserneubildung

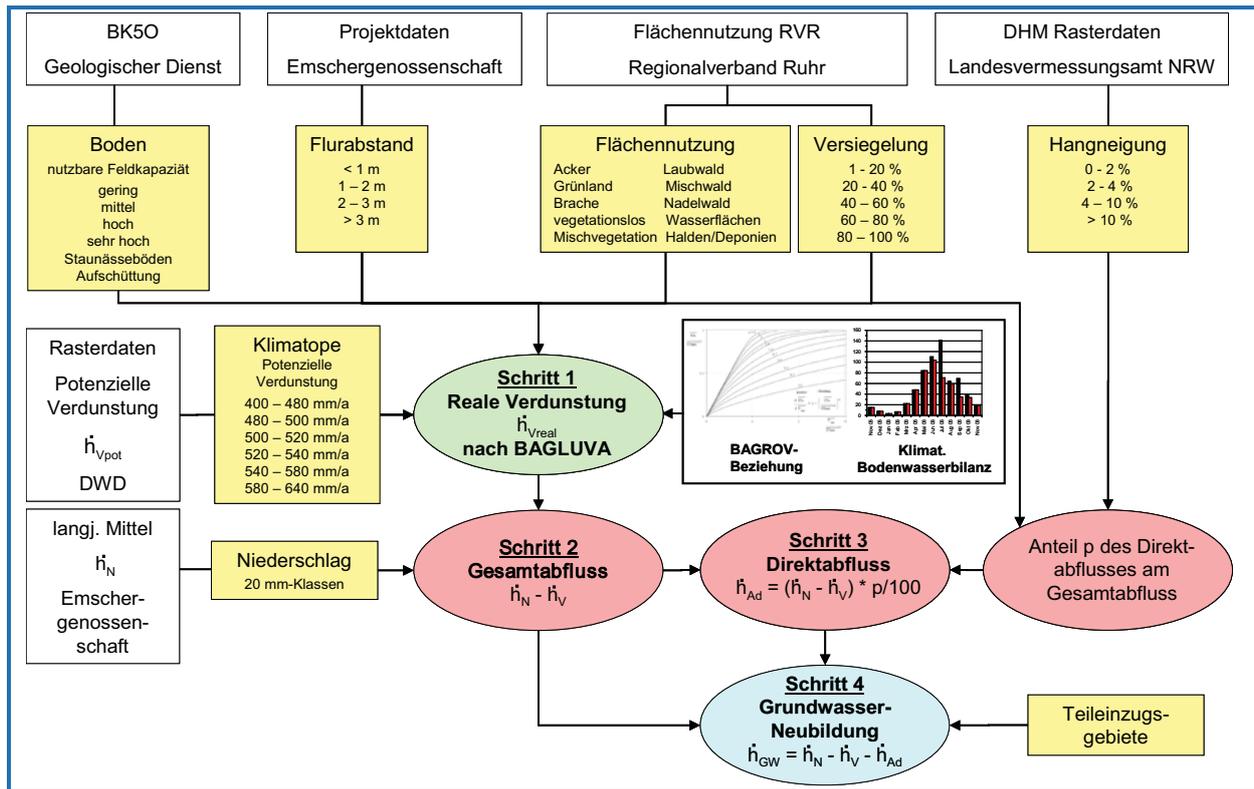


Abb. 2: Berücksichtigte Parameter und Verfahrensgang zur Berechnung der instationären Grundwasserneubildung

Die Berechnung der **Verdunstung** erfolgt für die verschiedenen Kombinationen von Klimatope, Boden, Flurabstand und Flächennutzung nach dem Verfahren BAGLUVA (Verfahren nach BAGROV und GLUGLA zur Bestimmung vieljähriger Mittelwerte von tatsächlicher Verdunstungs- und Abflusshöhe (ATV-DVWK 2002, Glugla et al. 2003). Aus der Gras-Referenzverdunstung wird dabei die maximale Verdunstung ermittelt. Die Verdunstung befestigter Flächen wird Wessolek et al. (1997) entnommen bzw. nach Glugla et al. (1995) bzw. Glugla et al. (1999) berechnet.

Der **Gesamtabfluss** ist die Differenz aus Niederschlag und Verdunstung gemäß Wasserhaushaltsgleichung. Auf Grund der hohen Niederschläge und der relativ geringen Verdunstung in den Mittelgebirgen nimmt der Gesamtabfluss vom Tiefland zu den höheren Lagen deutlich zu.

Vom Gesamtabfluss wird im nächsten Schritt der **Direktabfluss** (Gl. 2) abgetrennt. Die Berechnung des Direktabflusses erfolgt über die Bestimmung des Anteils p am Gesamtabfluss. Der Direktabflussanteil nimmt mit steigendem Flurabstand ab und ist bei bindigen Böden deutlich größer als bei nicht bindigen Böden. Es wird ferner davon ausgegangen, dass der Direktabflussanteil p am Gesamtabfluss von Acker- bzw. Grünland über Mischvegetation bis zum Wald abnimmt. Auch auf Waldstandorten ist bei hohen Hangneigungen bzw. gering durchlässigen Böden ein deutlicher Direktabfluss zu verzeichnen.

Durch eine Verschneidung der flächendifferenzierten Ergebnisse von Niederschlag, Verdunstung und Direktabfluss erhält man nach Gleichung 1 die **Grundwasserneubildung** für jede in sich homogene Kleinfläche. Durch eine weitere Verschneidung mit z.B. Teileinzugsgebieten kann die berechnete Grundwasserneubildung weiterverarbeitet werden. Die bei der Flächenverschneidung zwangsläufig entstehenden Kleinstflächen werden eliminiert.

Beim Verfahren BAGLUVA wird zunächst nur die jährliche reale Verdunstung ermittelt. Um die monatliche Grundwasserneubildung zu berechnen, bietet sich die Aufteilung der Jahressumme anhand der klimatischen Bodenwasserbilanz gemäß ATV-DVWK (2002) an. Diese Vorgehensweise hat den

Vorteil, dass die mit einer jährlichen Grundwasserneubildung kalibrierten vorhandenen Grundwassermodelle nicht grundsätzlich neu kalibriert werden müssen. Für jede Kombination von Eingangsdaten aus Niederschlag, potenzieller Verdunstung, Böden, Flurabstand, Flächennutzung, Befestigung und Hangneigung wird mit der klimatische Bodenwasserbilanz zunächst die reale Verdunstung und anschließend gemäß der Wasserhaushaltsgleichung der Gesamtabfluss, der Direktabfluss und die Grundwasserneubildung berechnet. In bestimmten Fällen wird dabei auch der Direktabflussanteil im Jahresverlauf variiert. Dies betrifft beispielsweise den Laubwald, da hier die sommerliche Belaubung den Direktabflussanteil am Gesamtabfluss mindert, und landwirtschaftlich genutzte Flächen mit geringen Flurabständen, da durch die Dränierung der Direktabfluss im Winter erhöht ist.

Die aus der Verdunstungsberechnung nach BAGLUVA berechnete jährliche Grundwasserneubildung wird auf dieser Grundlage prozentual auf die Monate aufgeteilt. Einen Sonderfall bilden Flächen mit geringen Flurabständen, da hier eine Zehrung aus dem Grundwasser im Sommer zugelassen werden muss und dies über prozentuale Aufteilungen nicht darstellbar ist. In diesen Fällen wurde die prozentuale Verteilung der realen Verdunstung (nicht der Grundwasserneubildung) auf die einzelnen Monate verwendet und die Wasserhaushaltsgleichung für alle betroffenen Flächen neu gelöst. Der resultierende Bilanzfehler in der Jahressumme wurde gewichtet auf die Monate aufgeteilt, beträgt aber insgesamt nur wenige mm/a. In Abb. 3 sind als Beispiel die Ergebnisse im Jahresverlauf für verschiedene Böden und Flurabstände bei Grünlandnutzung und geringer Hangneigung dargestellt. Deutlich erkennbar ist die hohe winterliche Grundwasserneubildung bei geringer nutzbarer Feldkapazität (Sandböden) und hohen Flurabständen, während bei geringen Flurabständen die Grundwasserneubildung im Winter geringer ist und im Sommer eine Zehrung eintritt. Staunässeböden nehmen eine Sonderstellung ein.

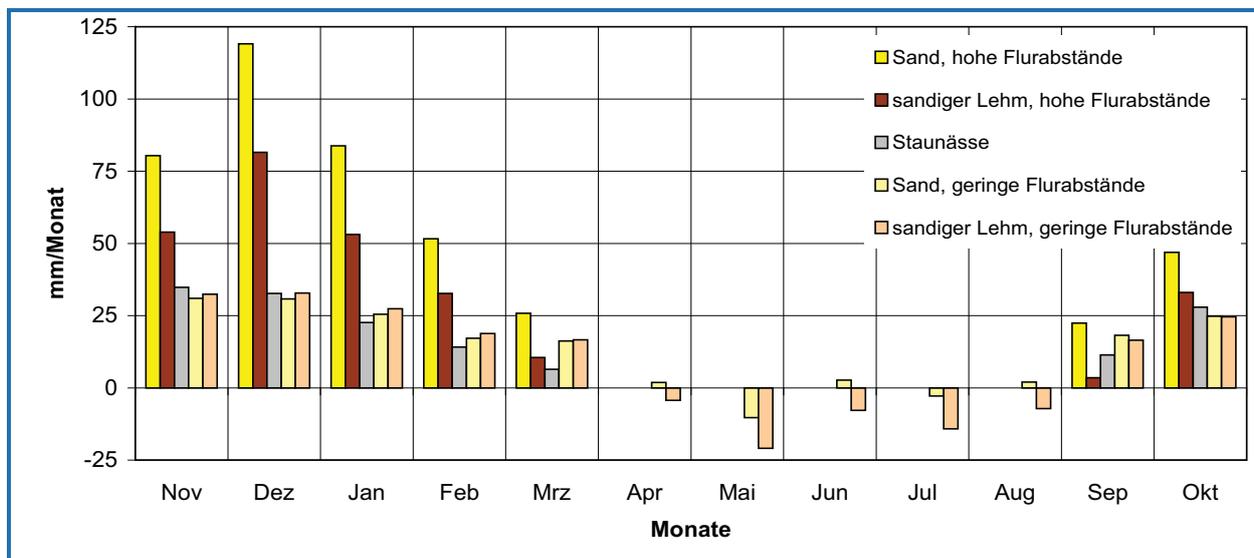


Abb. 3: Monatliche Grundwasserneubildung unterschiedlicher Böden und Flurabstände bei Grünlandnutzung und geringer Hangneigung

3 Zu erwartende Wasserhaushaltsänderungen im Emschergebiet

Zur Prognose der Veränderungen des Wasserhaushaltes durch den Klimawandel wurden die Eingangsdaten für den Zeitraum 1960 bis 2100 für die beiden Realisationen (COSMO-CLM 1 und -CLM 2) ausgewertet. Dies sind Monatssummen bzw. -mittel des Niederschlags, der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und der Sonnenscheindauer für 10 Gitterfelder. Gemäß ATV-DVWK M504 (2002) wurde daraus die Grasreferenzverdunstung für beide Realisationen auf Monatsbasis für das Gebietsmittel berechnet. Die Tabellen 1 und 2 zeigen für beide Realisationen die jeweils 30jährigen Mittel für die Perioden 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 und die zugehörigen Trends. Der Jahresniederschlag erhöht sich bis zum Zeitraum 2021-2050 um 2 % (CLM 1) bzw. 9 % (CLM 2) und fällt anschließend bis 2100 wieder auf das Niveau der Periode 1960-1990 ab, dabei werden jedoch die Sommer trockener und die Winter nasser (jeweils ca. 15 %). Die Grasreferenzverdunstung nimmt bis zum Jahr 2050 um bis zu 2 % (CLM 1) und bis 2100 um 8,5 % (CLM 1 und CLM 2) zu. Im Sommer ist die Zunahme dabei überdurchschnittlich.

Die Ergebnisse des regionalen Klimamodells COSMO-CLM unterscheiden sich deutlich von den im Emschergebiet gemessenen Werten. Die berechneten Niederschläge und Grasreferenzverdunstungen wurden den Daten der Klimastation in Bochum gegenübergestellt. Diese Station kann als repräsentativ für das Emschergebiet angesehen werden. Dort werden seit 1888 die Niederschläge und seit 1931 alle für die Grasreferenzverdunstung notwendigen Eingangsgrößen gemessen. Bezogen auf den Niederschlag ergeben die CLM-Daten für den zurück liegenden Zeitraum vom WWJ 1962 bis 2009 weder ein realistisches Niveau noch einen realistischen Trend (Abb. 4). Ein realistisches Niveau lässt sich durch eine BIAS-Korrektur anpassen, obwohl eine Korrektur in der Größenordnung von 30 % bei einer zu erwartenden Veränderung von nur 5 % bedenklich erscheint. Der Niederschlagstrend an der Station Bochum war im genannten Zeitraum steigend, während er bei CLM 1 stabil und bei CLM 2 deutlich fallend ist. Trendkorrekturen in dieser Art lassen sich nicht vornehmen. Eine Prognose der Jahresniederschläge aus dem linearen Trend der Station Bochum würde für das Jahr 2100 einen Niederschlag von ca. 1.000 mm/a erwarten lassen. Dies entspräche einer Niederschlagszunahme von 27 %, was unrealistisch erscheint. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt man beim Vergleich der Sommerniederschläge (Abb. 5). Der aus den regionalen Klimamodellen berechnete Trend zu trockeneren Sommern ist an der Station Bochum nicht nachvollziehbar, sondern eher ein Trend zu nasser Sommern.

Entwicklung eines instationären Prognosewerkzeuges zur Berechnung der Klimawandel-bedingten Veränderungen der Grundwasserneubildung

Tab. 1: Trend der Klimadaten gemäß CLM 1

Parameter		Mittelwerte			Veränderung		Veränderung %		Trend
		1961-1990	2021-2050	2071-2100	1961/90 - 2021/50	1961/90 - 2071/2100	1961/90 - 2021/50	1961/90 - 2071/2100	
Jahr (WWJ)									
Sonnenscheindauer	h	1.488	1.468	1.466	-20	-22	-1,3	-1,5	+-
Luftfeuchte	%	90	89	88	0	-2	-0,4	-1,8	-
Temperatur	°C	8,8	9,8	11,8	1	3	11,9	35,2	++
Niederschlag	mm	1.086	1.111	1.078	25	-8	2,3	-0,7	+-
Grasreferenzverdunstung	mm	550	563	597	13	47	2,3	8,5	++
Sommerhalbjahr (WWJ So)									
Sonnenscheindauer	h	939	947	1039	8	100	0,8	10,6	+
Luftfeuchte	%	87	86	83	-1	-4	-1,4	-4,8	-
Temperatur	°C	13,3	14,8	17,0	2	4	11,4	28,1	++
Niederschlag	mm	560	553	475	-8	-85	-1,4	-15,2	--
Grasreferenzverdunstung	mm	398	414	448	17	51	4,2	12,7	++
Winterhalbjahr (WWJ Wi)									
Sonnenscheindauer	h	546	522	428	-24	-118	-4,4	-21,6	--
Luftfeuchte	%	92	93	93	0	1	0,4	1,1	+-
Temperatur	°C	4,1	4,8	6,7	1	3	18,8	64,3	++
Niederschlag	mm	527	559	603	32	76	6,0	14,4	++
Grasreferenzverdunstung	mm	154	149	147	-5	-6	-3,1	-4,0	-

Tab. 2: Trend der Klimadaten gemäß CLM 2

Parameter		Mittelwerte			Veränderung		Veränderung %		Trend
		1961-1990	2021-2050	2071-2100	1961/90 - 2021/50	1961/90 - 2071/2100	1961/90 - 2021/50	1961/90 - 2071/2100	
Jahr (WWJ)									
Sonnenscheindauer	h	1.490	1.509	1.471	19	-18	1,3	-1,2	+-
Luftfeuchte	%	89	90	88	1	-1	0,9	-1,5	-
Temperatur	°C	8,5	9,7	11,8	1	3	14,2	38,2	++
Niederschlag	mm	1072	1169	1076	96	3	9,0	0,3	+-
Grasreferenzverdunstung	mm	547	546	595	-2	48	-0,3	8,7	++
Sommerhalbjahr (WWJ So)									
Sonnenscheindauer	h	942	973	1043	31	101	3,3	10,7	+
Luftfeuchte	%	87	88	83	1	-4	0,6	-4,6	--
Temperatur	°C	13,4	14,6	16,9	1	4	8,8	26,5	++
Niederschlag	mm	553	579	474	26	-79	4,7	-14,3	--
Grasreferenzverdunstung	mm	399	401	448	2	49	0,5	12,3	++
Winterhalbjahr (WWJ Wi)									
Sonnenscheindauer	h	542	536	428	-6	-114	-1,1	-21,1	--
Luftfeuchte	%	92	93	93	1	1	1,0	1,3	+
Temperatur	°C	3,6	4,9	6,6	1	3	35,5	82,6	++
Niederschlag	mm	521	590	602	69	81	13,2	15,4	++
Grasreferenzverdunstung	mm	148	145	147	-3	-2	-2,3	-1,1	+-

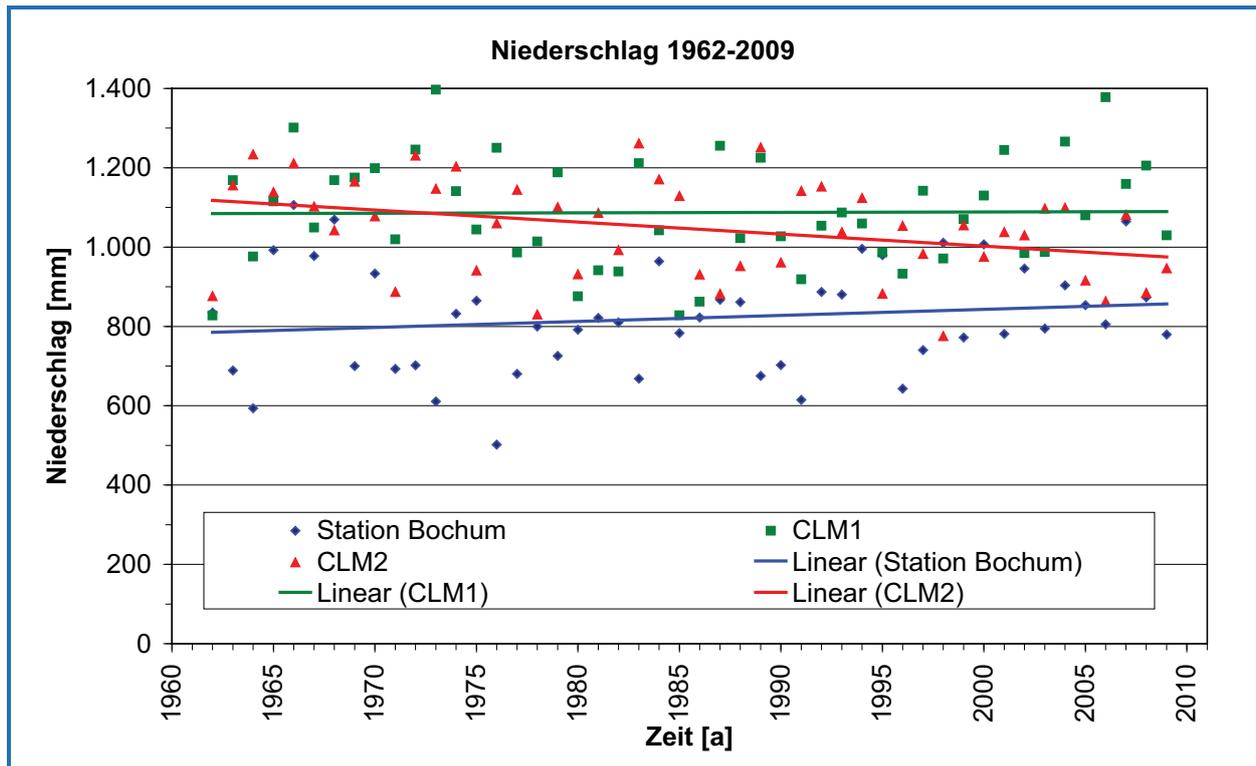


Abb. 4: Jahresniederschlag WWJ 1962 bis 2009, CLM 1, CLM 2 und Bochum (gemessen)

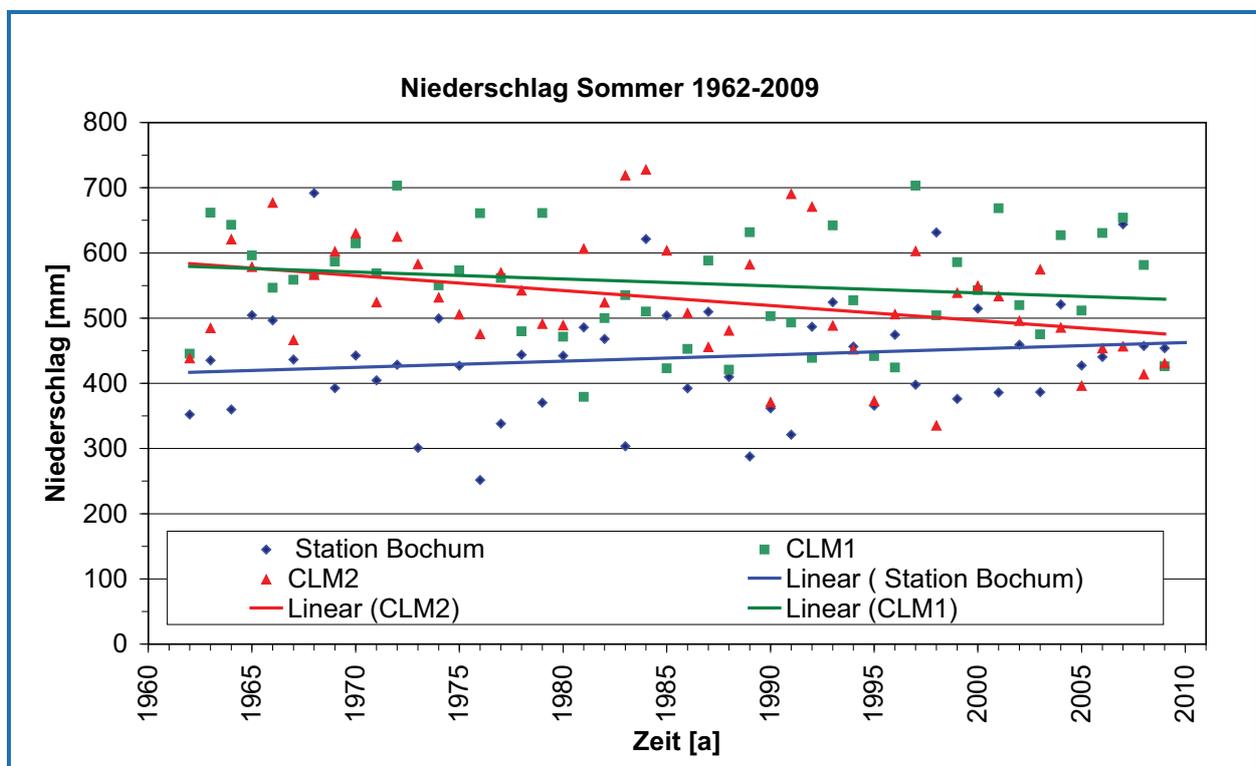


Abb. 5: Sommerniederschlag 1962 bis 2010, CLM 1, CLM 2 und Bochum (gemessen)

Demgegenüber stimmen Trend und Niveau der jährlichen Grasreferenzverdunstung der Station Bochum sehr gut mit den Ergebnissen von CLM 2 überein (Abb. 6). Bei CLM 1 ist der Trend deutlich geringer und stimmt nicht mit den Werten der Station Bochum überein. Ähnliches gilt hier auch für das Sommerhalbjahr, wobei die Unterschiede zwischen CLM 1, CLM 2 und der Station Bochum deutlich geringer ausfallen. Die Grasreferenzverdunstung im Winter ist bei der Station Bochum erkennbar höher als bei CLM 1 und CLM 2, trägt aber nur zu einem Viertel zur Jahresverdunstung bei.

Da die Niederschlagssummen beider CLM-Realisationen bereits für den Referenzzeitraum deutlich überhöht ausfallen, können die absoluten Niederschlagssummen der CLM-Realisationen nicht zur Berechnung der Grundwasserneubildung für die beiden Prognosezeiträume verwendet werden. Es werden nur die Trends in den Realisationsdaten ermittelt und auf die tatsächlich gemessenen Niederschläge übertragen.

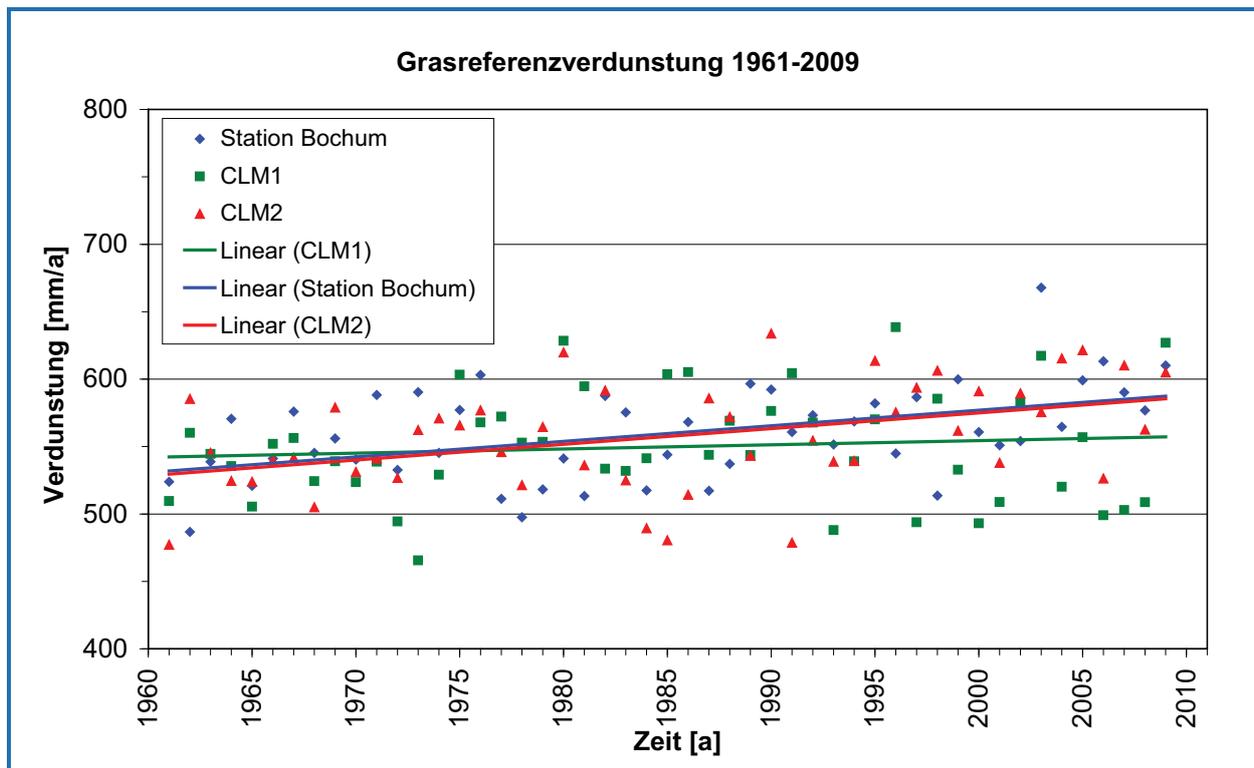


Abb. 6: Grasreferenzverdunstung WWJ 1962 bis 2010, CLM 1, CLM 2 und Bochum (gemessen)

4 Ergebnisse

4.1 Grundwasserneubildung und Jahrgang der Wasserhaushaltsgrößen

In Abb. 7 sind die Grundlagen der Grundwasserneubildungsberechnung dargestellt, die Herkunft der Daten geht aus Abb. 2 hervor. Erste Ergebnisse für das Emschergebiet zeigen, dass sich bei einer langjährig mittleren Niederschlagsrate (1961 bis 1990) von 787 mm/a eine mittlere Verdunstungsrate von 405 mm/a (rd. 51 % des Niederschlags) und eine Gesamtabflussrate von 382 mm/a (rd. 49 % des Niederschlags) ergeben. Die mittlere Direktabflussrate beträgt 241 mm/a (rd. 31 %) und die mittlere Grundwasserneubildungsrate 141 mm/a (rd. 18 %). Die flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsraten sind in Abb. 8 dargestellt.

Demgegenüber liefert das Verfahren nach GROWA (Bogena et al. 2003) eine Grundwasserneubildungsrate von 215 mm/a und eine Direktabflussrate von 218 mm/a. Weder die Höhe der Grundwasserneubildungsrate noch das Verhältnis zum Direktabfluss sind in Anbetracht der hydrogeologischen Verhältnisse und dem hohen Befestigungsgrad des untersuchten Gebietes plausibel.

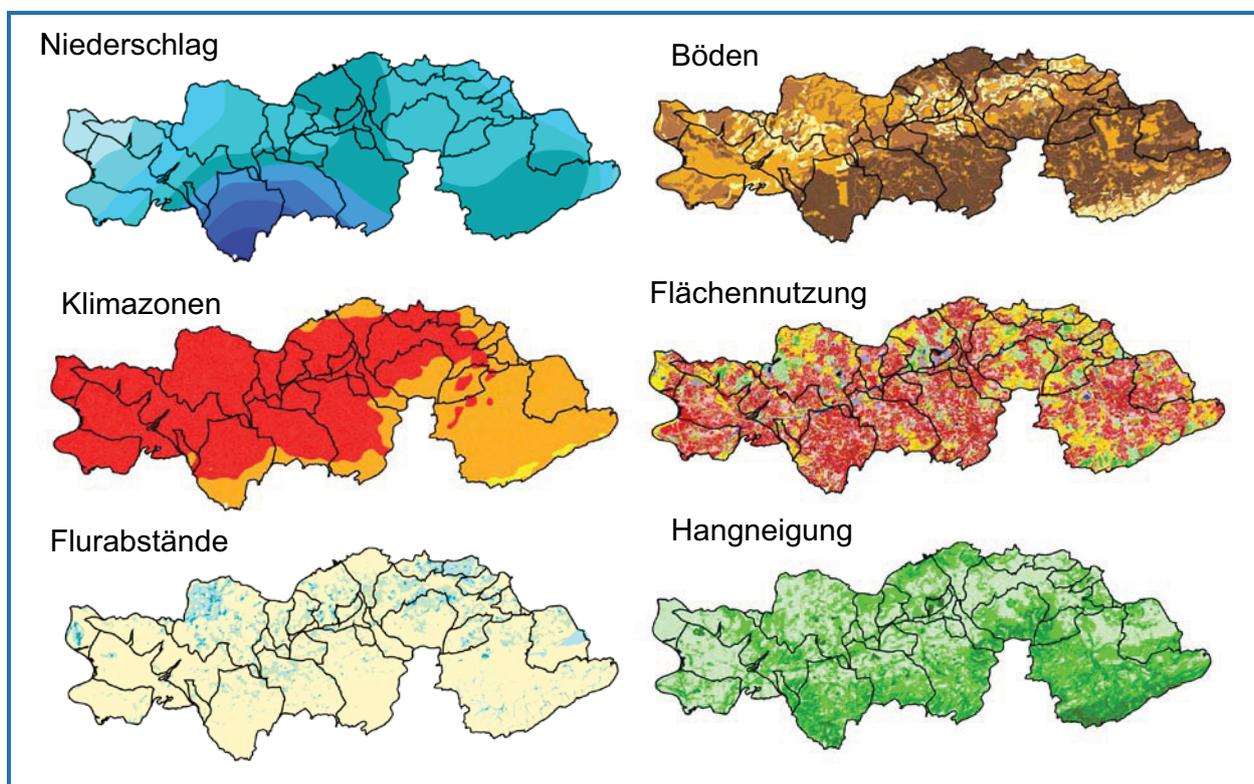


Abb. 7: Grundlegenden Daten für die Grundwasserneubildungsberechnung

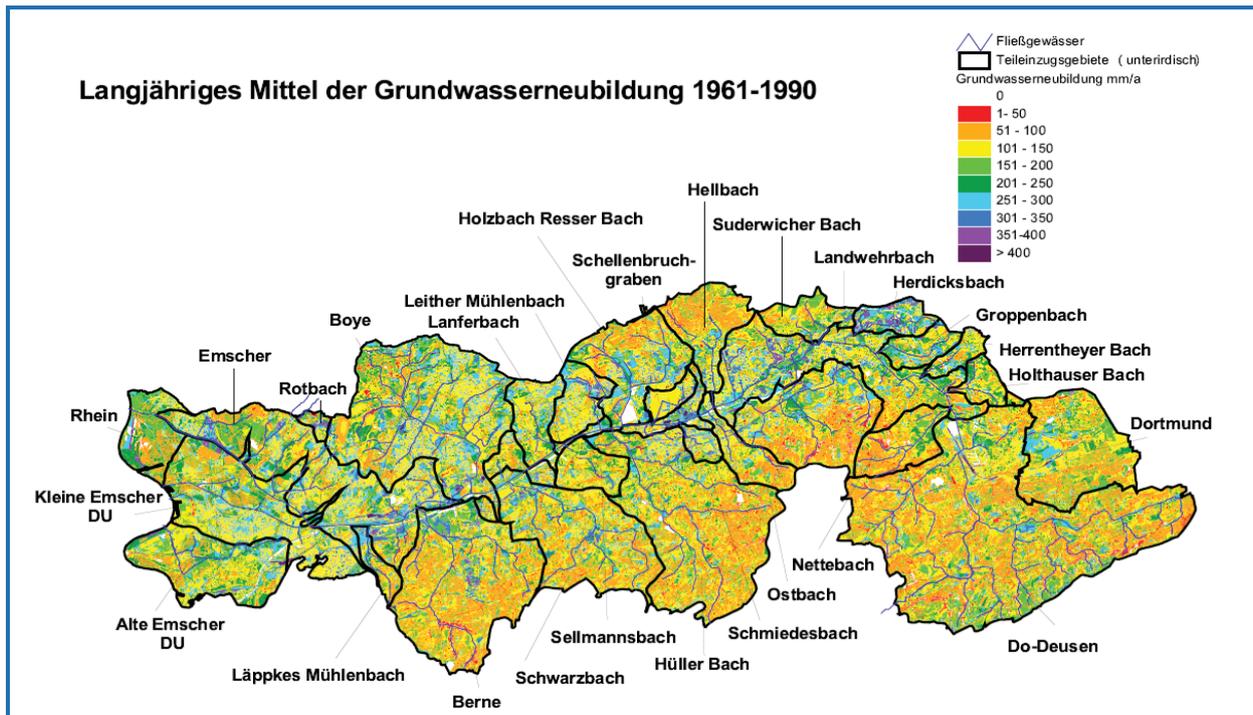


Abb. 8: Flächendifferenzierte Grundwasserneubildungsrate im Emschergebiet

Bezogen auf die Teileinzugsgebiete ergeben sich die in Abb. 9 dargestellten Grundwasserneubildungsraten. Auffällig ist dabei eine im Westen und Norden des Emschergebietes erhöhte Grundwasserneubildungsrate, die auf die geringere nutzbare Feldkapazität der Böden und die geringere Hangneigung zurück zu führen ist. Die Grundwasserneubildungsrate ist im Allgemeinen etwas höher (8 %), als die, die bisher in den Grundwassermodellen zur stationären Kalibrierung verwendet wurde. Im Detail ergibt sich ein Mosaik aus Erhöhungen und Verringerungen der Grundwasserneubildungsrate (Abb. 15, 18).

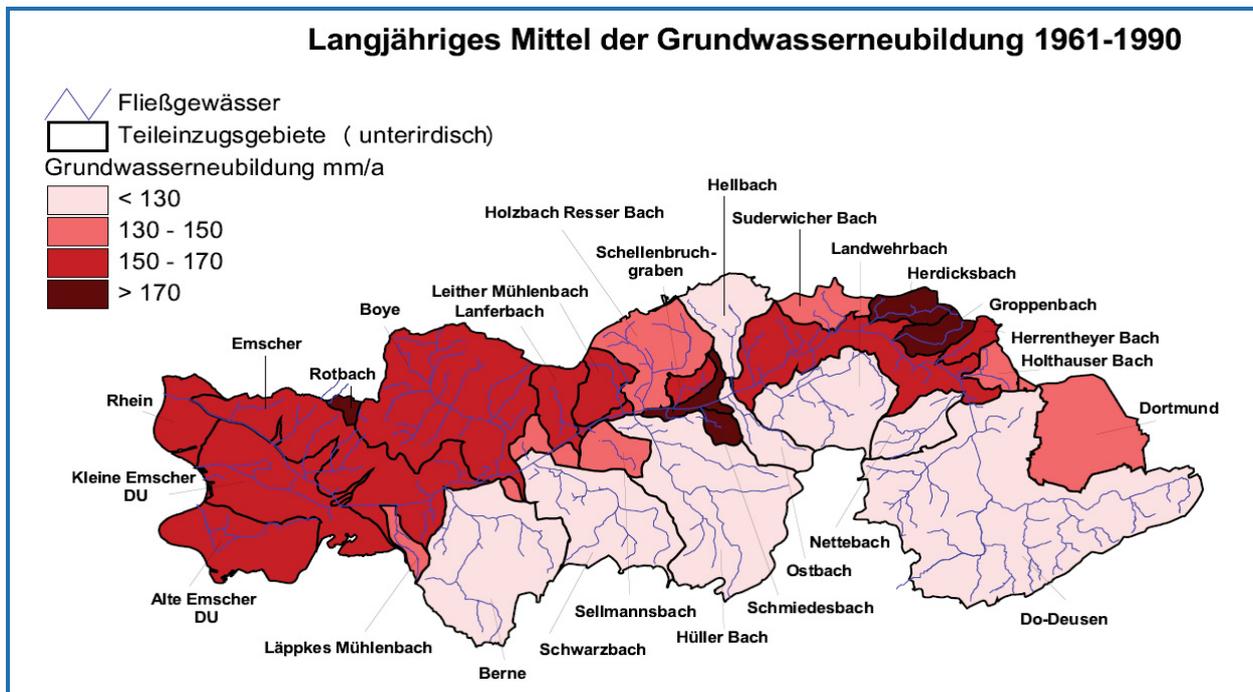


Abb. 9: Einzugsgebietsbezogene Grundwasserneubildungsrate im Emschergebiet

In Abb. 10 ist die mittlere monatliche Grundwasserneubildungsrate für das gesamte Emschergebiet dargestellt. Die höchste Grundwasserneubildungsrate weisen die Monate November und Dezember mit jeweils 32 mm auf. Bis zum März fällt die Grundwasserneubildungsrate bis auf 14 mm ab. Zwischen April und August liegt die Grundwasserneubildungsrate deutlich unter 5 mm, in einzelnen Monaten kommt es sogar im Gebietsmittel zu Zehrungen. Diese sind streng genommen nicht als negative Grundwasserneubildung zu betrachten, werden in den Grundwassermodellen aber aus Bilanzgründen als solche angesetzt.

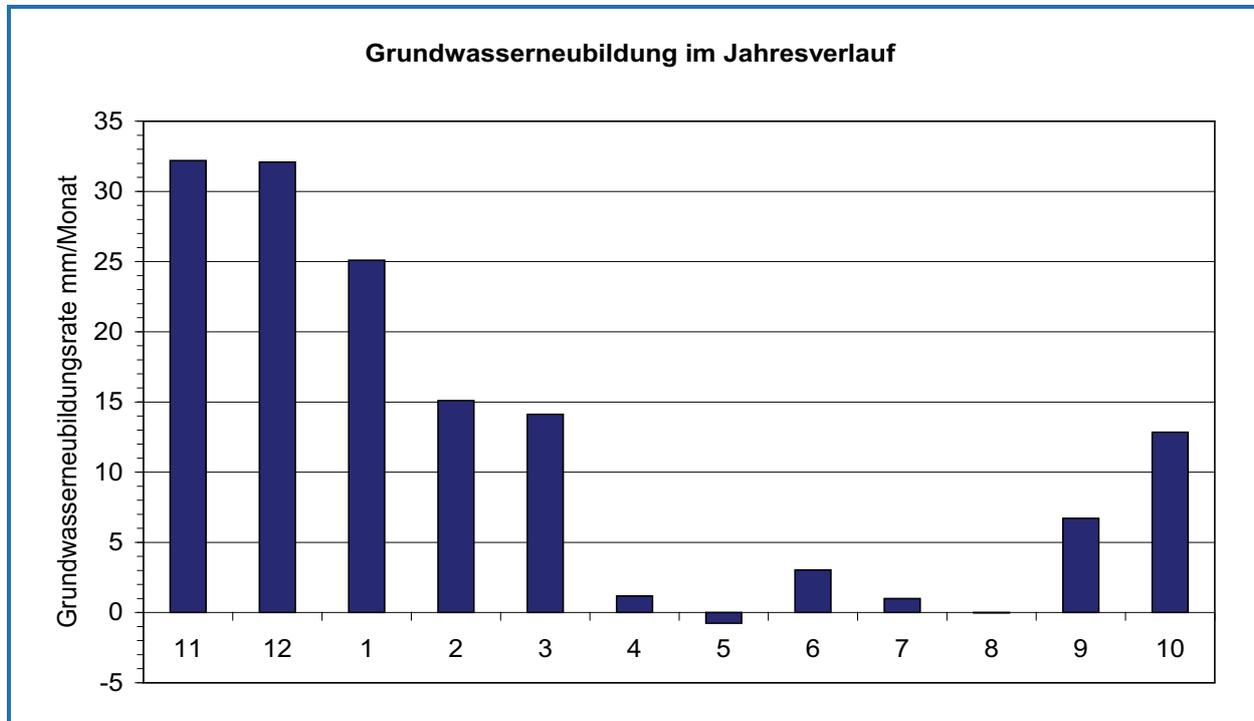


Abb. 10: Grundwasserneubildungsrate im Jahresverlauf im Emschergebiet (Mittel 1961-1990)

4.2 Langfristige Auswirkungen auf den Wasserhaushalt

Die sich für eine typische Situation im Emschergebiet aus der klimatischen Bodenwasserbilanz ergebenden Trends, bezogen auf die Jahressumme, sind in Abb. 11 (CLM 1) bzw. Abb. 12 (CLM 2) dargestellt. Danach nehmen bei der Realisation CLM 2 die Gesamtabflussrate um ca. 2 % und die Direktabflussrate um ca. 4 % bis 2100 zu, während die Grundwasserneubildungsrate um rund 3,5 % bis 2100 abnimmt. Demgegenüber ergibt sich bis 2050 wegen der deutlich erhöhten Niederschläge eine Zunahme der Grundwasserneubildungsrate um ca. 13,5 % (Gesamtabflussrate 14,8 % und Direktabflussrate 15,3 %). In der Zeit von Juni bis August / September nimmt die Niederschlagsrate bis 2100 deutlich ab und die Grasreferenzverdunstungsrate sowie die reale Verdunstungsrate zu. Im Dezember, Januar und April nimmt die Niederschlagsrate bis 2100 deutlich zu. Gesamtabflussrate, Direktabflussrate und Grundwasserneubildungsrate nehmen in den Monaten Dezember, Januar und April deutlich zu und von Juni bis August bzw. September deutlich ab (Abb. 13). Im Ergebnis ist zu erwarten, dass die Grundwasserstände größeren Schwankungen unterliegen werden als heute. In der Jahressumme ist insgesamt mit einer Abnahme der Grundwasserneubildungsrate und damit mit eher höheren Flurabständen im Jahresmittel zu rechnen. Eine Dynamisierung bzw. Anpassung der Vegetationsperiode an die geänderten Klimabedingungen, wie sie beispielsweise beim Wasserhaushaltsmodell LARSIM in Süddeutschland (Scherzer et al. 2008) vorgenommen wird, ist dabei nicht berücksichtigt, da dies nicht im Sinne einer „worst case“-Betrachtung ist. Im Emschergebiet stehen nicht die landwirtschaftliche Nutzung oder Auswirkungen auf Feuchtgebiete im Focus, sondern die wasser-

wirtschaftliche Betrachtung der Auswirkungen der klimabedingten Grundwasserstandsänderungen in den urbanen Siedlungsgebieten. Insbesondere in Stadtgebieten können Grundwasserstandsänderungen zu negativen Auswirkungen auf die Bebauung, die Infrastruktur, Altlasten und alle Anlagen der Siedlungswasserwirtschaft führen (DWA-Themenband T1/2011).

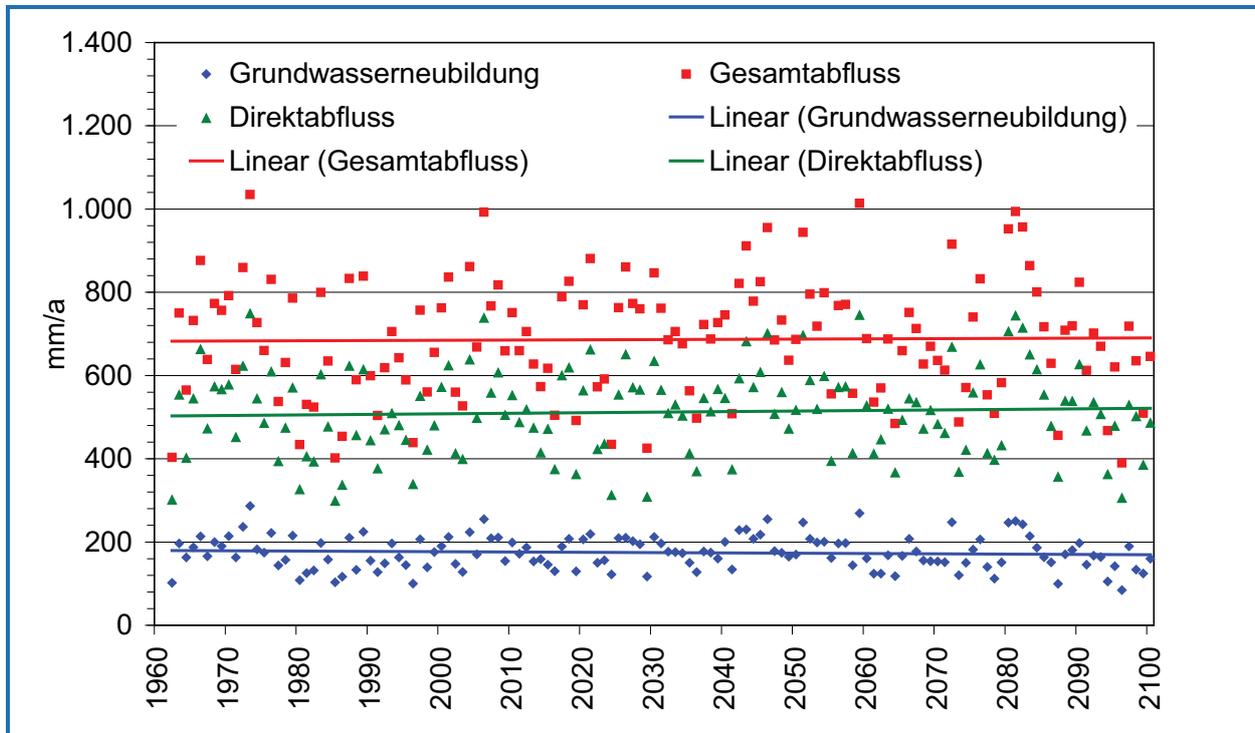


Abb. 11: Gesamtabfluss-, Direktabfluss- und Grundwasserneubildungsrate für eine typische Fläche im Emschergebiet (geringe Hangneigung, sandig-lehmiger Boden, mittlere Flurabstände, 60-80 % Befestigung (24 % Emschergebiet), CLM 1)

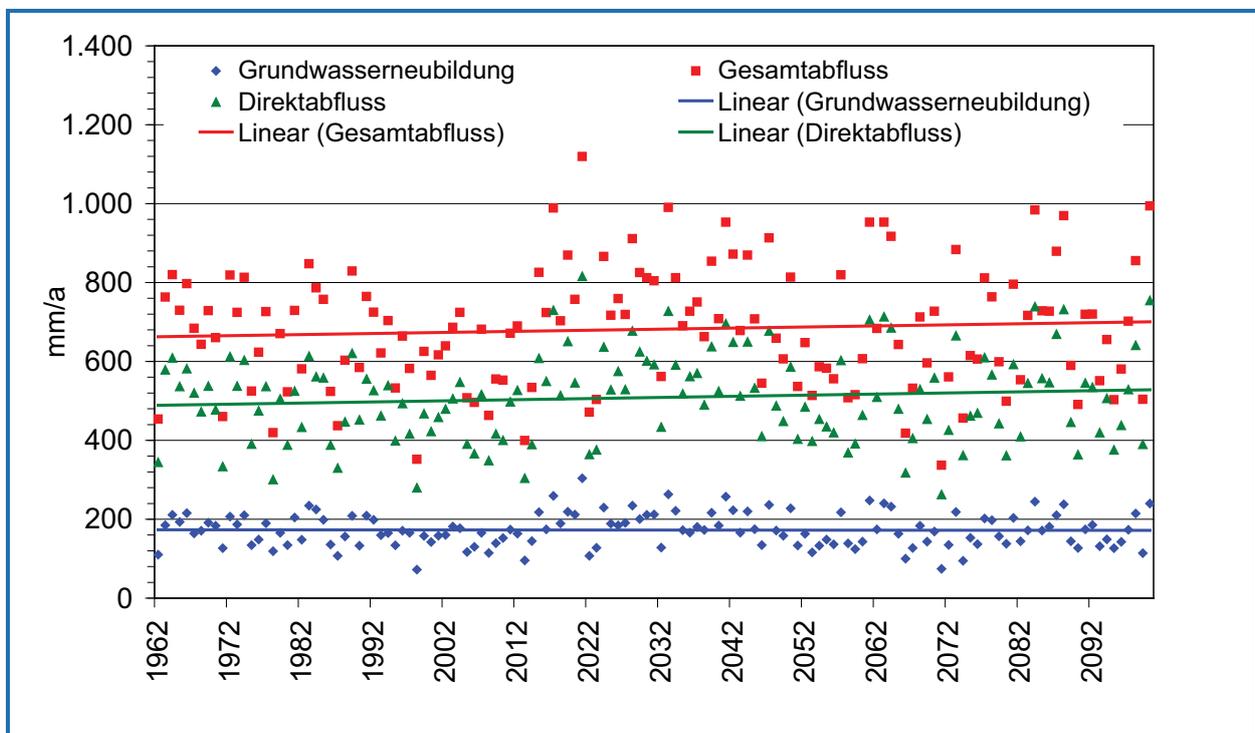


Abb. 12: Gesamtabfluss-, Direktabfluss- und Grundwasserneubildungsrate für eine typische Fläche im Emschergebiet (geringe Hangneigung, sandig-lehmiger Boden, mittlere Flurabstände, 60-80 % Befestigung (24 % Emschergebiet), CLM 2)

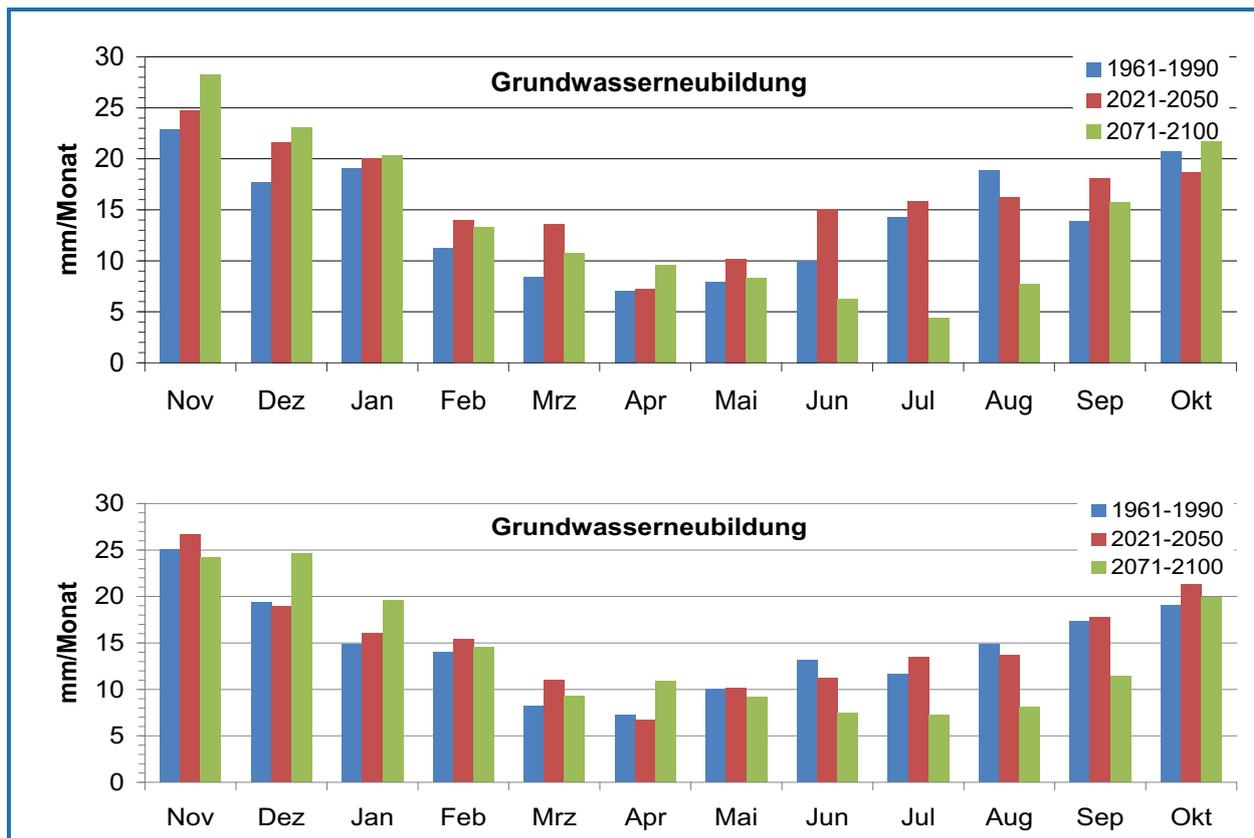


Abb. 13: Grundwasserneubildungsrate im Jahresverlauf für eine typische Fläche im Emschergebiet (geringe Hangneigung, sandig-lehmiger Boden, mittlere Flurabstände, 60-80 % Befestigung (24 % Emschergebiet), CLM 1 unten und CLM 2 oben) für die 3 Zeitschnitte

Die Realisation CLM 2 entspricht am ehesten den bisherigen Kenntnissen, so dass für die Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung für die Grundwassermodelle nur die CLM 2-Daten berücksichtigt werden. Dafür sprechen folgende Gründe:

- CLM 2 liegt in Bezug auf die Grasreferenzverdunstung sowohl in der absoluten Höhe als auch im Trend näher an den tatsächlichen Verhältnissen,
- Beim Niederschlag stellt die Zunahme von 9 % bis 2021-2050 bei CLM 2 eine „Worst-case“-Variante dar.
- Bis 2100 ist bei CLM 2 mit einer Zunahme der Grasreferenzverdunstung von 8,7 % zu rechnen, auch dies entspricht einer „Worst-case“-Variante.
- Die maximalen Veränderungen in aufeinander folgenden Einzeljahren entsprechen sich bei CLM 1 und CLM 2, so dass hier kein Unterschied existiert.
- Die Verringerung der Grundwasserneubildung im Sommerhalbjahr und Erhöhung im Winterhalbjahr fällt bei CLM 2 deutlicher aus als bei CLM 1, so dass auch im Jahrgang bei CLM 2 deutlichere Reaktionen zu erwarten sind.

4.3 Aktualisierung der Grundwassermodelle

Die Veränderungen bei der flächendifferenzierten jährlichen Grundwasserneubildung zwischen den Verfahren nach Meßer von 1997 und 2008 und deren Auswirkungen auf die berechneten Grundwasserstände der Grundwassermodelle wurden beispielhaft an den Modellen Nettebach und Wanne-Nord untersucht. Die Verbesserung bei der berechneten Grundwasserneubildung bezieht sich nicht

nur auf das Verfahren (Kap. 3.2), sondern auch auf die Eingangsdaten, insbesondere aktualisierte Flurabstände, Niederschläge und Flächennutzung. Beide Modelle wurden bei der Emschergenossenschaft im Rahmen von Gewässerumbauplanungen als hoch aufgelöste Detailmodelle mit dem Programm SPRING (König 2009) erstellt und unter Berücksichtigung der Grundwasserneubildung nach Meßer 1997 stationär kalibriert. Kalibriergrundlage war eine regional durchgeführte Stichtagsmessung im Juni 2004, die eine langjährig mittlere Grundwassersituation für das Emscher-Gebiet repräsentiert. Beide Modelle konnten bei der Kalibrierung mit einer mittleren Abweichung von $< 0,1$ m an den Grundwassermessstellen gut an die gemessene Grundwassersituation angepasst werden.

Die im Rahmen des *dynaklim*-Projektes mit dem Verfahren nach Meßer (2008) berechnete flächendifferenzierte Grundwasserneubildungsrate wurde zur Aktualisierung aller Grundwassermodelle im Emscher-Gebiet verwendet.

4.3.1 Grundwassermodell Nettebach

Die flächendifferenzierte Grundwasserneubildungsrate für das Nettebach-Modellgebiet ist in der Abb. 14 dargestellt. Durch die Berücksichtigung der hoch aufgelösten Flächennutzungskartierung des Regionalverband Ruhr (RVR) wird entsprechend den vorliegenden Eingangsgrößen eine Grundwasserneubildungsrate (mm/a) ausgewiesen. Die feine Diskretisierung des FE-Netzes gewährleistet, dass die flächendifferenzierte Grundwasserneubildung entsprechend im Modell berücksichtigt wird. Gut zu erkennen sind die besiedelten Flächen mit Neubildungsraten von 50 – 100 mm/a (orange) sowie die unbebauten, landwirtschaftlich genutzten Flächen mit 100 – 250 mm/a (gelb-grün). Bei den Flächen ohne Grundwasserneubildung (weiß) handelt es sich um Gewässerflächen (Seen, Nettebach) oder abgedichtete Deponieflächen. Hohe Grundwasserneubildungsraten von > 350 mm/a werden den Gleisanlagen des Güterbahnhofs im Südosten des Modellgebietes zugewiesen.

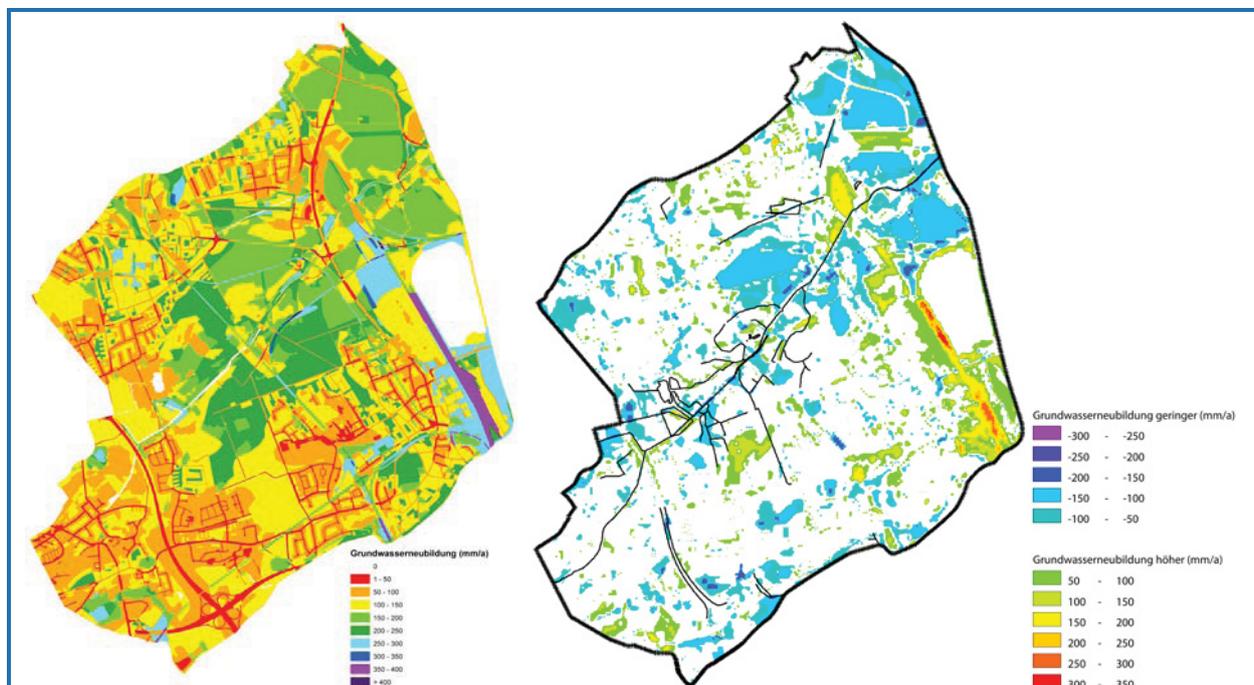


Abb. 14

Abb. 15

Abb. 14: Grundwasserneubildung nach MEßER 2008 [7] am Beispiel des Grundwassermodells Nettebach

Abb. 15: Änderungen bei der Grundwasserneubildung (Differenz zwischen den Verfahren Meßer 2008 - 1997) im Grundwassermodell Nettebach

Das Berechnungsverfahren nach Meßer (1997) ergibt für das Nettebach-Modellgebiet eine flächengemittelte Grundwasserneubildungsrate von 136 mm/a, das Verfahren von Meßer (2008) berechnet 128 mm/a für diese Fläche. Somit kommt es durch das neue Verfahren nach Meßer zu einer leichten Reduzierung der flächengemittelten Grundwasserneubildung um 8 mm/a (ca. 6 %) für diese als Beispiel gewählte Modellfläche. Im Mittel des gesamten Emschergebietes beträgt die Differenz 11 mm/a bzw. 8,5 %. Die flächendifferenzierten Differenzen bei der Grundwasserneubildung zwischen den Berechnungsverfahren sind in der Abb. 15 dargestellt (2008 - 1997). Auffällig sind die großflächigen Reduzierungen um ca. 100 mm/a (hellblau) im Norden des Modellgebietes. Hier handelt es sich überwiegend um landwirtschaftliche Nutzflächen und Waldflächen mit geringerem Flurabstand. Deutliche Erhöhungen der jährlichen Grundwasserneubildungsraten > 150 mm/a (gelb, orange, rot) werden für Waldflächen mit größerem Flurabstand und Bahntrassen (Güterbahnhof) ausgewiesen (Abb. 15). Ursache für die Abweichungen ist überwiegend die nach Meßer (2008) differenziertere Berücksichtigung der Flächennutzung. Beispielsweise wird in der aktuellen Berechnung differenziert zwischen Acker- und Grünland (vorher gemeinsam: landwirtschaftliche Nutzfläche) und Gleistrassen werden aktuell als vegetationslos berücksichtigt (vorher im Hinblick auf die Verdunstung wie landwirtschaftliche Flächen betrachtet).

Die Sensitivität der Grundwassermodelle hinsichtlich Veränderungen bei der Grundwasserneubildung ist in der Abbildung 16 dargestellt. Die in Abb. 15 dargestellten Veränderungen der Grundwasserneubildung führen ohne Anpassung der kalibrierten Durchlässigkeitsbeiwerte zu unmittelbaren Auswirkungen auf die stationäre Berechnung der Grundwasserstände im Modell Nettebach. Die großflächigen Verringerungen um ca. 100 mm/a im Norden des Modellgebietes Nettebach verursachen eine Abnahme der Grundwasserstände um ca. 0,6 m bis 1,0 m. Besonders sensibel reagiert das Grundwassermodell auf Veränderungen im Bereich von Wasserscheiden. Hier führen bereits relativ geringe Veränderungen der Grundwasserneubildung zu deutlichen Grundwasserstandsabsenkungen oder -anstiegen um bis zu 1,60 m (im südlichen Modellbereich).

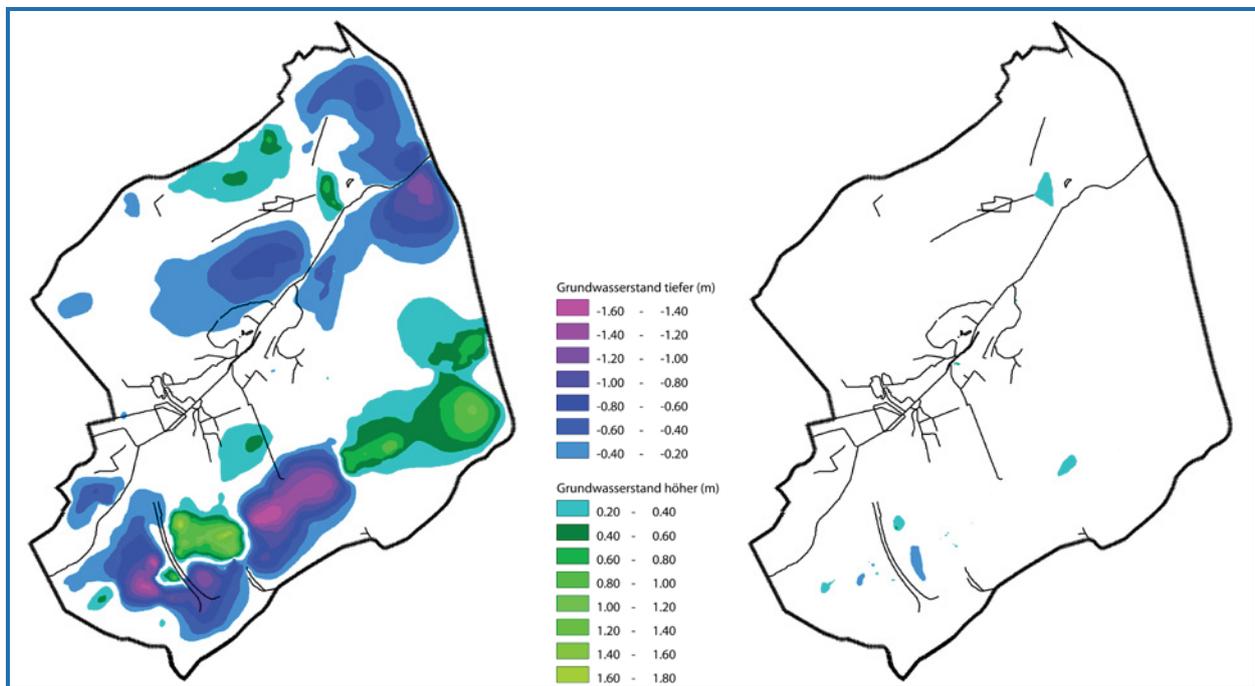


Abb. 16

Abb. 17

Abb. 16: Durch die Aktualisierung der Neubildung verursachte Potentialdifferenzen im Grundwassermodell Nettebach

Abb. 17: Potentialdifferenzen im Grundwassermodell Nettebach nach automatischer Kalibrierung der Durchlässigkeitsbeiwerte mit dem Programm SPRING nach 10 Iterationsschritten

Die deutlichen Erhöhungen der Grundwasserneubildung um ca. 300 mm/a im Bereich der Bahntrassen (Abb. 15, im Südosten) betreffen einen hydraulisch weniger sensiblen Bereich und verursachen „nur“ einen Grundwasserstandsanstieg von ca. 1,0 m (Abb. 16).

Damit das Grundwassermodell wieder die gemessenen Wasserstände der Stichtagsmessung berechnet und somit die vorherrschende natürliche Grundwassersituation widerspiegelt, müssen die ursprünglich kalibrierten Durchlässigkeitsbeiwerte an die neue Neubildungssituation angepasst werden. Mit Hilfe des implementierten Gradientenverfahrens kann das Programm SPRING diese Kalibrierung teilweise automatisch durchführen. Durch die iterative Anpassung der Durchlässigkeitsbeiwerte innerhalb vorgegebener, hydrogeologisch sinnvoller Ober- und Untergrenzen nähert sich das Kalibrierverfahren zunehmend der vorgegebenen Lösung (Kalibrierplan) an. Die mittlere Abweichung über alle Modellknoten und die maximale Abweichung werden dabei je Iterationsschritt ausgegeben. Für die Kalibrierung des Modells Nettebach ergaben sich folgende Abweichungen:

1. Ausgangszustand: mittlere Abweichung 0,32 m, max. Abweichung 1,71 m (Abb. 16)
2. Nach 5 Iterationen: mittlere Abweichung 0,08 m, max. Abweichung 0,76 m
3. Nach 10 Iterationen: mittlere Abweichung 0,03 m, max. Abweichung 0,55 m (Abb. 17)

Durch weitere Iterationen und manuelle Kalibrierung konnten auch die restlichen verbleibenden Abweichungen zur Kalibriervorlage beseitigt werden, wobei insbesondere in Lücken zwischen den Messstellen durchaus Abweichungen akzeptiert werden können.

Die stationäre Nachkalibrierung des Grundwassermodells Nettebach unter Berücksichtigung der aktualisierten Grundwasserneubildung nach Meßer 2008 konnte mit guter Anpassung an die Kalibriervorlage durchgeführt werden. Die ursprünglich vorgegebenen Ober- und Untergrenzen der Durchlässigkeitsbeiwerte erwiesen sich dabei als weiterhin plausibel, ein Über- oder Unterschreiten war durch die aktualisierte Neubildungssituation nicht notwendig.

4.3.2 Grundwassermodell Wanne-Nord

Die gleichen Erfahrungen wurden auch bei der stationären Nachkalibrierung des Grundwassermodells Wanne-Nord gemacht. Hier berechnete das Verfahren nach Meßer (2008) eine um ca. 1,5 % leicht erhöhte flächengemittelte Grundwasserneubildungsrate. Bereichsweise kam es auch in diesem Modellgebiet zu Neubildungserhöhungen oder -reduzierungen um bis zu 300 mm/a (Abb. 18). Durch die automatische und manuelle Nachkalibrierung der Durchlässigkeitsbeiwerte konnte auch hier wieder eine sehr gute Anpassung an die gemessene Grundwassersituation erzielt werden.

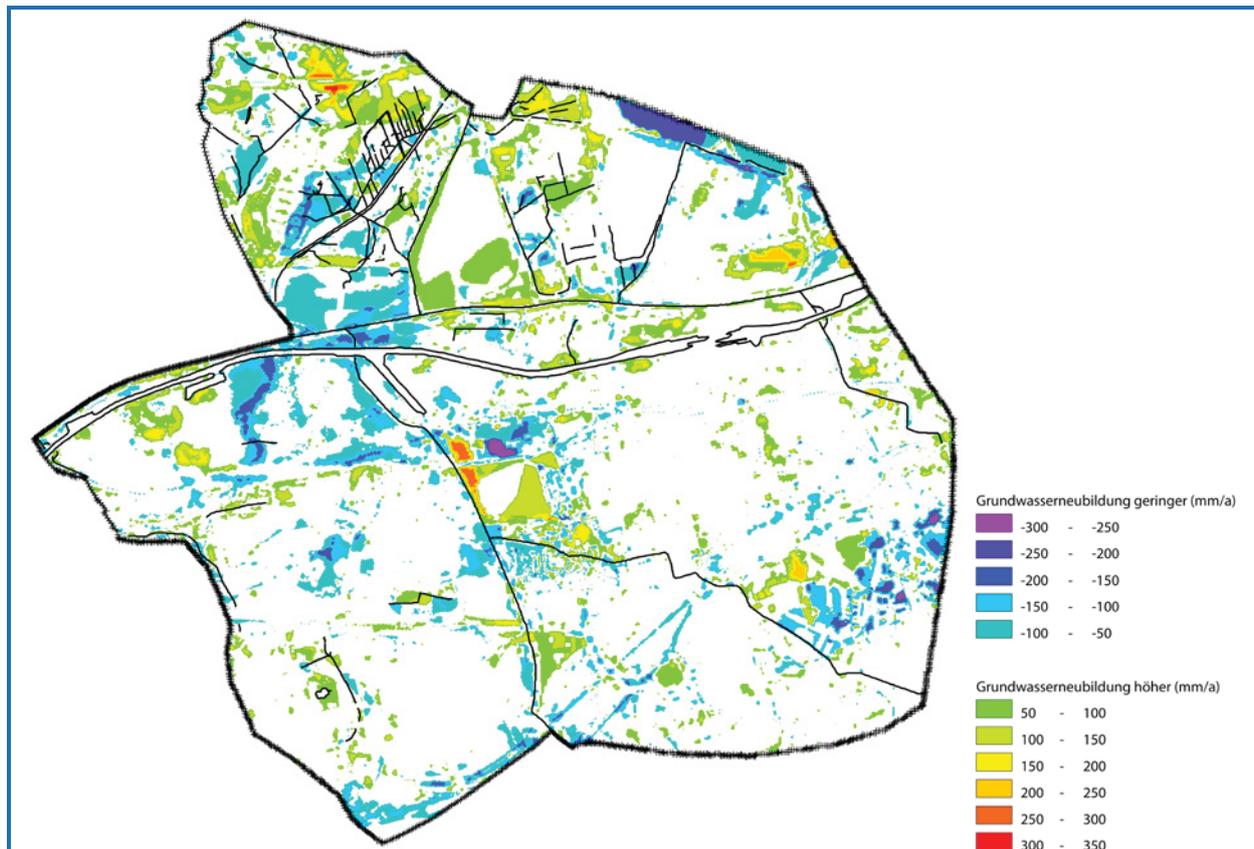


Abb. 18: Änderungen bei der Grundwasserneubildung (Differenz zwischen den Verfahren Meßer 2008 - 1997) im Grundwassermodell Wanne-Nord

Im Anschluss an die stationäre Nachkalibrierung wurde das Grundwassermodell Wanne-Nord zusätzlich instationär kalibriert. Dazu wurde gemäß Kap. 3.2 die instationäre Grundwasserneubildungsrate aus der Jahreswasserbilanz berechnet. Das Verfahren ermöglicht so die Berechnung der mittleren Monatssummen ohne die jährliche Wassermengenbilanz zu verändern.

Für drei aufeinander folgende Wasserwirtschaftsjahre mit stark variierenden Niederschlagsverhältnissen (mittlere, hohe und niedrige Jahresniederschläge) und den entsprechenden Grundwasserstandsganglinien konnte das Modell Wanne-Nord auch instationär mit einer guten Anpassung an die gemessenen instationären Grundwasserganglinien angepasst werden (Abb. 19).

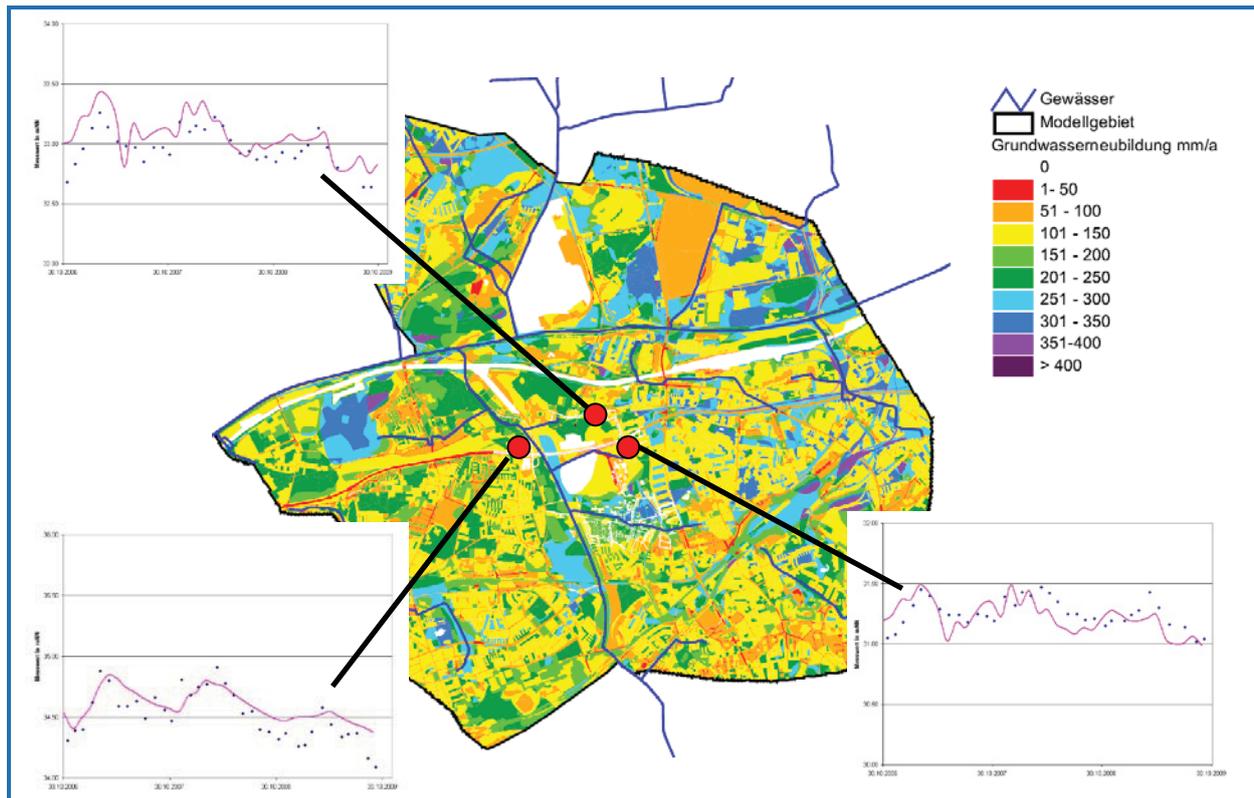


Abb. 19: Aktualisierte Grundwasserneubildung und instationäre Kalibrierung über 36 Monate am Beispiele Wanne-Nord

Die Kalibrierung erfolgte dabei durch die iterative Anpassung der Speicherkoeffizienten innerhalb vorgegebener hydrogeologisch sinnvoller Ober- und Untergrenzen. Eine nachträgliche Anpassung der Durchlässigkeitsbeiwerte und eine dadurch notwendige weitere stationäre Kalibrierung waren nicht erforderlich.

5 Zusammenfassung

Im *dynaklim*-Projekt untersucht die EmscherGenossenschaft u. a. die wasserwirtschaftlichen Auswirkungen von klimabedingten Veränderungen des Grundwasserhaushalts in den urbanen Siedlungsgebieten. Dazu sollen mit Hilfe der vorliegenden numerischen Grundwassermodelle unter Berücksichtigung der Realisationsergebnisse des regionalen Klimamodells COSMO-CLM (CLM-Community 2008) realistische Auswirkungsszenarien und Anpassungsstrategien für die Siedlungsentwässerung abgeleitet werden. Zur Abbildung der innerjährlichen Verschiebungen der Niederschläge ist es erforderlich, die Grundwasserneubildung als ausschlaggebende Wasserhaushaltsgröße für die Modellierung instationär und flächendifferenziert zu berechnen. Da bislang keine verifizierten instationären Wasserhaushaltsmodellansätze verfügbar sind, sollte in Anlehnung an die bisher bekannten Verfahren ein geeignetes Werkzeug entwickelt werden, dass bei der instationären Erweiterung der stationär kalibrierten Grundwassermodelle die Massenbilanz erhält. Auf Grund der speziellen Anforderungen des hochurbanen Emscher-Gebietes wurde das Verfahren nach Meßer (2008) gewählt.

Zur Ermittlung der Veränderungen des Wasserhaushaltes wurden die Eingangsdaten für den Zeitraum 1960 bis 2100 aus COSMO-CLM für zwei Realisationen (CLM 1 und CLM 2) des Emissionsszenarios A1B ausgewertet. Die Ergebnisse unterscheiden sich deutlich von den im Emscher-Gebiet gemessenen Werten. Bezogen auf den Niederschlag ergeben die CLM-Daten für den Zeitraum vom WWJ

1962 bis 2009 weder ein realistisches Niveau noch einen realistischen Trend. Demgegenüber stimmen Trend und Niveau der jährlichen Grasreferenzverdunstung an der Station Bochum sehr gut mit den Ergebnissen von CLM 2 überein, bei CLM 1 hingegen ist der Trend deutlich geringer und zeigt keine Übereinstimmung mit den gemessenen Werten.

Für das gesamte Emschergebiet ergibt sich bei einer langjährig mittleren Niederschlagsrate (1961 bis 1990) von 787 mm/a und einer mittleren Verdunstungsrate von 405 mm/a (rd. 51 % des Niederschlags) eine Gesamtabflussrate von 382 mm/a (rd. 49 % des Niederschlags). Die mittlere Direktabflussrate beträgt 241 mm/a (rd. 31 %) und die mittlere Grundwasserneubildungsrate 141 mm/a (rd. 18 %).

Aus der klimatischen Bodenwasserbilanz wurden Trends für eine typische Situation im Emschergebiet bis zu den Jahren 2050 und 2100 berechnet. Danach ergibt sich bis 2050 wegen der bis dahin deutlich erhöhten Niederschläge eine Zunahme der Grundwasserneubildungsrate um ca. 13,5 %. Demgegenüber nimmt die Grundwasserneubildungsrate für diesen typischen Standort bis 2100 um ca. 3,5 % im Vergleich zur heutigen Situation ab, so dass langfristig im Jahresmittel mit höheren Flurabständen zu rechnen ist. Bei der monatlichen Verteilung für diesen typischen Standort ergibt sich bis 2100 eine deutliche Zunahme der Grundwasserneubildungsrate in den Monaten Dezember, Januar und April und eine deutliche Abnahme von Juni bis September. Im Ergebnis ist zu erwarten, dass damit die Grundwasserstände größeren innerjährlichen Schwankungen unterliegen werden als heute.

Die Veränderungen der flächendifferenzierten jährlichen Grundwasserneubildung zwischen den Verfahren nach Meßer von 1997 und 2008 und deren Auswirkungen auf die berechneten Grundwasserstände wurden an den Grundwassermodellen Nettebach und Wanne-Nord untersucht. Die Änderungen bei der Berechnung der Grundwasserneubildung beziehen sich nicht nur auf das Verfahren, sondern auch auf die Eingangsdaten, insbesondere aktualisierte Flurabstände, Niederschläge und Flächennutzung. Im Mittel des gesamten Emschergebietes kommt es durch das neue Verfahren nach Meßer (2008) zu einer leichten Reduzierung der flächengemittelten Grundwasserneubildung um 11 mm/a bzw. 8,5 %. Die stationäre und eine nachfolgende instationäre Kalibrierung der Grundwassermodelle unter Berücksichtigung der aktualisierten Grundwasserneubildung konnte mit guter Anpassung an die Kalibriervorlagen durchgeführt werden. Die ursprünglich vorgegebenen Ober- und Untergrenzen der Durchlässigkeitsbeiwerte erwiesen sich dabei als weiterhin plausibel, ein Über- oder Unterschreiten war durch die aktualisierte Neubildungssituation nicht notwendig.

6 Fazit und Ausblick

Die Gegenüberstellung der COSMO-CLM-Daten mit Messwerten im Emschergebiet zeigt, dass die tatsächlichen Niederschlagsverhältnisse deutlich von den CLM-Daten abweichen. Weder die Jahressumme (Abweichung 30 %) noch der Trend entsprechen der Realität. Der Niederschlagstrend war von 1962-2009 steigend, während CLM 1 stabile und CLM 2 fallende Niederschlagsverhältnisse ausweisen. Eine „einfache“ Datenkorrektur ist damit nicht möglich. Dem gegenüber stimmen Trend und Niveau der jährlichen Grasreferenzverdunstung sehr gut mit den Ergebnissen von CLM 2 überein. Bezogen auf die mittlere (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100) weisen die CLM-Daten unterschiedliche Trends auf. Während bis 2021-2050 die Niederschläge gegenüber heute zunehmen, fallen sie bis 2071-2100 wieder auf das Niveau der Periode 1961-1990 ab, wobei sich eine innerjährliche Verschiebung der Niederschlagsverteilung ergibt. Dem entsprechend ist bis 2021-2050 eine Erhöhung der Grundwasserneubildung und bis 2071-2100 eine geringfügige Verringerung der Grundwasserneubildung zu erwarten.

Diese Erkenntnisse führen zu dem Schluss, dass Berechnungen mit einem regionalen Klimamodell nur einen Anhaltspunkt über die zu erwartende Entwicklung geben können. Der langjährige Gang zeigt letztlich nur die Schwankungsbreite, in der sich die betrachteten Wasserhaushaltsgrößen bewegen

werden. Wann welches mehrjährige Mittel eintreten wird, geben die Klimamodelle oder zumindest COSMO-CLM, nicht her. Insofern stellen die spekulativ erscheinenden Berechnungen bis 2100 einfach nur einen Teil der Spannbreite dar. Die Aussagen bis 2050 sind auch nicht sicherer oder stabiler.

Wenn aufwendige Parallelberechnungen mit mehreren Klimamodellen nicht möglich sind, sollte zumindest ein Trendabgleich der entscheidenden Klimagrößen (Niederschlag und Temperatur) zur Sensibilitätsprüfung durchgeführt werden.

Nach dem vorgestellten Berechnungsverfahren werden die flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsraten für das Emschergebiet für die nahe und ferne Zukunft berechnet, um die Spanne der möglichen Veränderungen aufzuzeigen, ohne dass zu sehr die verwendeten Zeiträume im Focus stehen. Es wird ein Abgleich mit anderen Klimamodellen, aber keine Parallelberechnungen durchgeführt. Im Anschluss daran werden die Grundwasserneubildungsraten in die Grundwassermodelle übernommen und die Veränderungen im Hinblick auf die Flurabstände, möglicherweise nötig werdende wasserwirtschaftliche Maßnahmen und den grundwasserbürtigen Abfluss der Gewässer bewertet. Vor dem Hintergrund der oben genannten Unsicherheiten leiten sich daraus Handlungsempfehlungen für die Entscheidungsträger in der Wasserwirtschaft ab, die im Projekt *dynaklim* für die Emscher-Lippe-Region erarbeitet werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- ATV-DVWK (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. - Merkblatt M 504, 144 S.; Hennef.
- Bagrov, N.A. (1953): Über den vieljährigen Durchschnittswert der Verdunstung von der Oberfläche des Festlandes. – Met. i. Gidrol., **10**: 20-25 (russisch).
- Bamberg, H.F., Busse, W., Ginzler, G., Glugla, G., Schlinker, K. & Ziegerl, G. (1980): KdT-Empfehlung zur Ermittlung der Grundwasserneubildung. - WTI-Sonderheft 5/81, 87 S., 23 Abb., 3 Tab., 3 Anl.; Nordhausen.
- Bogena, H., Kunkel, R., Schöbel, T., Schrey, H. P. & Wendland, F. (2003): Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen. – Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 37; Jülich.
- CLM-Community (2008): GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und BTU Cottbus: Regionales Klimamodell COSMO-CLM, Vers. 3; www.clm-community.eu.
- Dörhöfer, G. & Josopait, V. (1980): Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. - Geol. Jb., **C 27**: 45-65, 13 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. - DVWK-Merkblatt 238/1996, 135 S.; Bonn (Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser).
- DWA-Themenband T1/2011: Wirkung und Folgen möglicher Klimaänderungen auf den Grundwasserhaushalt. – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 142 S., Hennef.
- Glugla, G., Enderlein, R. & Eyrich, A. (1976): Das Programm RASTER - ein effektives Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung im Lockergestein. - Wasserwirtsch. Wassertechn., **26**: 377-382, 3 Abb., 4 Tab.; Berlin.
- Glugla, G. & Krahe, P. (1995): Abflussbildung in urbanen Gebieten. – Schriftenreihe Hydrologie/Wasserwirtschaft 14, Ruhr-Universität Bochum, S. 140-160; Bochum.
- Glugla, G., Goedecke, M., Wessolek, G. & Fürtig, G. (1999): Langjährige Abflussbildung und Wasserhaushalt im urbanen Gebiet Berlin. – Wasserwirtschaft 89: 34-42.
- Glugla, G., Jankiewicz, P., Rachimow, C., Lojek, K., Richter, K., Fürtig, G. & Krahe, P. (2003) : BAGLUVA – Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses. – Bundesanstalt für Gewässerkunde: BfG-Bericht Nr. 1342: 102 S. – Koblenz.
- Grossmann, J. & Lange, F. (1999): Eine Sensitivitätsanalyse zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag. – Grundwasser, 4(1): 11-17, 2 Abb., 3 Tab.; Berlin (Springer).
- Hergesell, M. & Berthold, G: (2005): Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch Regionalisierung des Baseflow-Index (BFI). – Jahresbericht 2004 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 4-66; Wiesbaden.
- Kille, K. (1970): Das Verfahren MoMNO, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niederigwasserabflüsse. – Z. dt. geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol. Hydrogeochem.: 89-95.
- König, C. M. (2009): SPRING Version 3.4. – Benutzerhandbuch; Dortmund.
- Kunkel, R., Bogena, H., Tetzlaff, B. & Wendland, F. (2006): Digitale Grundwasserneubildungskarte von Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Hamburg und Bremen – Erstellung und Auswertungsbeispiele. – HW50 (5): 211-219.

Meißer, J. (1997): Auswirkungen der Urbanisierung auf die Grundwasser-Neubildung im Ruhrgebiet unter besonderer Berücksichtigung der Castroper Hochfläche und des Stadtgebietes Herne. – DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, Heft 58. - Bochum.

Meißer, J. (2008): Ein vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung in Mitteleuropa. – Lippe Gesellschaft für Wassertechnik mbH, 61 S., www.gwneu.de; Essen.

Neumann, J. & Wycisk, P. (2001): Verfahrensvergleich als methodische Grundlage zur Ermittlung der Grundwasserneubildung im Hydrologischen Atlas Deutschland (HAD). – Arb.-H. Wasser 2001/1: 43-46; Hannover.

Neumann, J. (2004): Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung von Deutschland – Entwicklung und Anwendung des makroskaligen Verfahrens HAD-GWNeu. - Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 137 S.; Halle.

Renger, M. & Strebel, O. (1980): Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften. - Wasser und Boden, **32** (8): 362-366, 4 Abb., 3 Tab.; Hamburg.

Renger, M., Strebel, O., Wessolek, G. & Duynisveld, W.H.M. (1986): Evapotranspiration and Groundwater Recharge - A case study for different climate, crop patterns, soil properties and groundwater depth conditions. - Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **149**: 371-381, 9 Abb., 1 Tab.; Weinheim.

Renger, M. & Wessolek, G. (1990): Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Nutzungsänderung auf die Grundwasserneubildung. - Mitt. Inst. für Wasserwesen, Univ. der Bundeswehr München, **386**: 295-307; München.

Scherzer, J. & Pöhler, H. (2008): Dynamisierung der Vegetationsperiode im Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Abschlussbericht Schritt 1: Bestimmung von Algorithmen für die Landnutzungsklassen von LARSIM. – Auftraggeber: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Neustadt/Wstr.

Schroeder, M. & Wyrwich, D. (1990): Eine in Nordrhein-Westfalen angewendete Methode der flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. - DGM, **34**: 12-16, 2 Tab.; Koblenz.

Sponagel, H., Strebel, O. & Renger, M. (1983): Ermittlung von boden- und nutzungsspezifischen Jahreswerten der Grundwasserneubildung mit Hilfe von Boden- und Klimadaten und deren flächenhafte Darstellung. - Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., **38**: 147-152, 4 Abb.; Göttingen.

Wessolek, G. & Facklam, M. (1997): Standorteigenschaften und Wasserhaushalt von versiegelten Flächen. – Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 160: 41-46; Weinheim.

Wundt, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. - In: Graumann, R.: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung, Forsch. Dtsch. Landeskunde, **104**: 47-54, 2 Abb.; Remagen.

Ansprechpartner

Jens Hasse
hasse@fiw.rwth-aachen.de

Birgit Wienert
wienert@fiw.rwth-aachen.de

Projektbüro *dynaklim*

Kronprinzenstraße 9
45128 Essen

Tel.: +49 (0)201 104-33 39

www.dynaklim.de