

dynaklim-Publikation



Gefördert durch:



KLIMAWANDEL-BEDINGTE VERÄNDERUNGEN DER GRUNDWASSER-NEUBILDUNG IM URBANEN RAUM AM BEISPIEL DES EMSCHERGEBIETES

Johannes Meßer, Renke Ohlenbusch, Michael Getta

Emschergenossenschaft

www.eglv.de

dynaklim-Publikation Nr. 33 / Februar 2013



Klimawandel-bedingte Veränderungen der Grundwasserneubildung im urbanen Raum am Beispiel des Emschergebietes

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, das bei der instationären Erweiterung der stationär kalibrierten Grundwassermodelle die Massenbilanz erhält (Meßer, Ohlenbusch & Getta 2011). Auf Grund der speziellen Anforderungen des hochurbanen Emschergebietes wurde das Verfahren nach Meßer 2008 gewählt.

Mit Hilfe dieses Berechnungsverfahrens wurde die flächendifferenzierte Grundwasserneubildung für das Einzugsgebiet der Emscher für die Zeitschnitte 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 (CLM 2) berechnet und die Ergebnisse auf Teileinzugsgebietsebene analysiert. Aus der klimatischen Bodenwasserbilanz wurden Trends bis zu den Jahren 2050 und 2100 im Emschergebiet berechnet.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Einleitung | 4 |
| 2 | Konzept und Methodik | 4 |
| 2.1 | Berechnungsverfahren | 5 |
| 3 | Zu erwartende Veränderungen des Niederschlags und der potenziellen Verdunstung im Emscher-Gebiet | 7 |
| 4 | Sensibilität der Parameter in Bezug auf die Grundwasserneubildung | 7 |
| 5 | Ergebnisse | 10 |
| 5.1 | Langjährig mittlere Grundwasserneubildung (1961-1990) | 10 |
| 5.2 | Veränderung der jährlichen Grundwasserneubildung | 11 |
| 5.3 | Jahresgang der Grundwasserneubildung | 15 |
| 5.4 | Grundwasserneubildung in Nassjahren | 19 |
| 6 | Zusammenfassung und Fazit | 21 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 22 |

Abbildungen

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 1: | Berücksichtigte Parameter und Verfahrensgang zur Berechnung der Grundwasserneubildung | 6 |
| Abb. 2: | Berücksichtigte Parameter und Verfahrensgang zur Berechnung der klimatischen Bodenwasserbilanz | 6 |
| Abb. 3: | Trend der Klimadaten gemäß CLM 1 und CLM 2 | 7 |
| Abb. 4: | Ensemble der regionalen Klimamodelle in Deutschland basierend auf ECHAM5 (Quirnbach et al. 2012) | 8 |
| Abb. 5: | Zusammenhang zwischen Jahrestemperatur und potenzieller Verdunstung | 9 |
| Abb. 6: | Grundlegenden Daten für die Grundwasserneubildungsberechnung | 11 |
| Abb. 7: | Flächendifferenzierte Grundwasserneubildungsrate im Emschergebiet 1961-1990 (oben), 2021-2050 (Mitte) und 2071-2100 (unten) (CLM 2) | 12 |
| Abb. 8: | Grundwasserneubildungsdifferenzen im Emschergebiet 1961-1990 bis 2021-2050 (oben) und 1961-1990 bis 2071-2100 (unten) (CLM 2) | 13 |
| Abb. 9: | Einzugsgebietsbezogene mittlere Grundwasserneubildungsrate im Emschergebiet 1961-1990 (oben), 2021-2050 (Mitte) und 2071-2100 (unten) (CLM 2) | 14 |
| Abb. 10: | Grundwasserneubildungsrate im Jahresverlauf für verschiedene Böden und Flurabstände bei Grünlandnutzung und geringer Hangneigung | 15 |
| Abb. 11: | Grundwasserneubildungsrate im Jahresverlauf bei lehmigem Sandboden, Flurabständen von 2-3 m und geringer Hangneigung für landwirtschaftliche Nutzung und bei befestigten Flächen | 16 |

| | |
|---|----|
| Abb. 12: Grundwasserneubildungsrate (Balken) und Niederschläge (Linien) im Jahresverlauf bei verschiedenen Nutzungen im Raum Dortmund (1961-1990) | 17 |
| Abb. 13: Grundwasserneubildungsrate im Jahresverlauf im Emschergebiet 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 (CLM 2) | 18 |
| Abb. 14: Monatliche Grundwasserneubildungsdifferenzen im Emschergebiet 1961-1990 bis 2021-2050 und 1961-1990 bis 2071-2100 (CLM 2) | 18 |
| Abb. 15: Grundwasserneubildungsveränderungen im Emschergebiet 1961-1990 bis 2021-2050 (links) und 1961-1990 bis 2071-2100 (rechts) (CLM 2) | 19 |
| Abb. 16: Grundwasserneubildungsrate für das Einzugsgebiet des Rossbachs (oben: Nassjahr 2041, unten 1961-1990) | 20 |
| Abb. 17: Niederschlagsrate und Grundwasserneubildungsrate für das Einzugsgebiet des Rossbachs im Jahresverlauf für das Nassjahr 2041 (CLM 2) | 21 |

Anlage

| |
|---|
| Anlage 1: Wasserhaushaltsgrößen für die Teileinzugsgebiete der Emscher (1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100) |
|---|

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, wurde 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 Grundwasserneubildungsbeziehung (Meßer 1997, 2010) ein geeignetes Prognosewerkzeug entwickelt (Meßer, Ohlenbusch & Getta 2011).

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 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, die zur Ermittlung von Klimawandel bedingten Veränderungen der Grundwasserstände eingesetzt werden. 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) erstellt. Dieses Modell deckt auch Teile des Lippeeinzugsgebietes (Seseke) mit ab.

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 Emscher-Gebiet 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 (1961-1990) 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 Berechnungsverfahren

Ziel der Bearbeitung war die flächendifferenzierte Bestimmung der langjährig mittleren und monatlichen Grundwasserneubildung und der anderen Wasserhaushaltsgrößen. In Abb. 1 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 wurde eine Flächenverschneidung der jeweils notwendigen Grundlagenparameter mit dem Programmsystem ArcInfo durchgeführt. Für jede in sich homogene Kleinfläche wurden die beiden Größen in mm/a berechnet. Die aus der Verdunstungsberechnung nach BAGLUVA (Glugla et al. 2003) berechnete jährliche Grundwasserneubildung wird anhand von klimatischen Bodenwasserbilanzen (bei hohen Flurabständen) bzw. klimatischen Wasserbilanzen (bei geringen Flurabständen und Oberflächengewässern) prozentual auf die Monate aufgeteilt. Bei der klimatischen Bodenwasserbilanz gehen die in Abb. 2 dargestellten Parameter in die Berechnung ein. Daraus wird die Gras-Referenzverdunstung ermittelt. In Abhängigkeit von der Nutzung bzw. Vegetation berechnet sich daraus die maximal mögliche Verdunstung für jeden Standorttyp. In Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität und insbesondere dem Flurabstand berechnet sich nach der Bodenwasserbilanz die reale Verdunstung. Nach der Wasserhaushaltsgleichung und Berücksichtigung des Direktabflusses ergibt sich die Grundwasserneubildung. Weitere Einzelheiten des Berechnungsverfahrens sind der Dynaklim-Publikation No. 14 (Meßer, Ohlenbusch & Getta 2011) zu entnehmen.

Berechnung der Klimawandel-bedingten Veränderungen der jährlichen und innerjährlichen Grundwasserneubildung

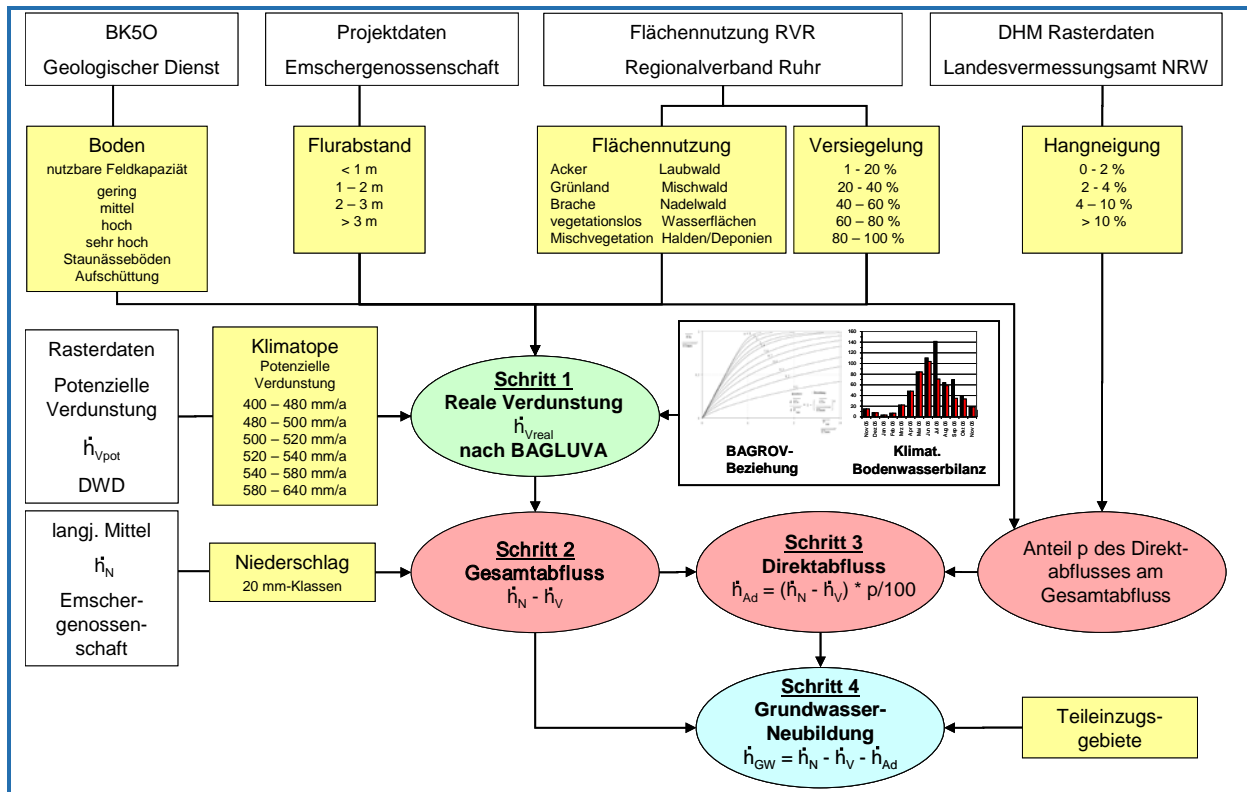


Abb. 1: Berücksichtigte Parameter und Verfahrensgang zur Berechnung der Grundwasserneubildung

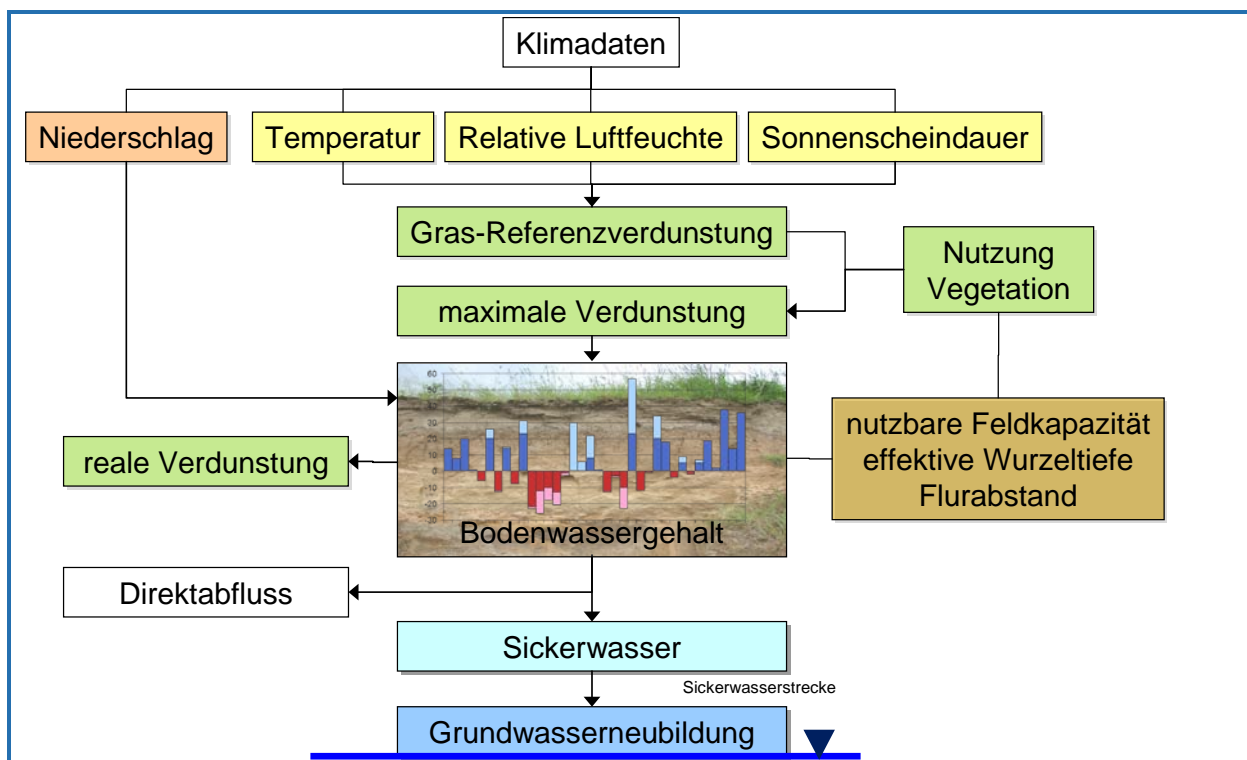


Abb. 2: Berücksichtigte Parameter und Verfahrensgang zur Berechnung der klimatischen Bodenwasserbilanz

3 Zu erwartende Veränderungen des Niederschlags und der potenziellen Verdunstung im Emscher-Gebiet

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 Abb. 3 zeigt für beide Realisationen die jeweils 30jährigen Mittel für die Perioden 2021-2050 (nahe Zukunft) und 2071-2100 (ferne Zukunft) und die zugehörigen Trends in Bezug zur Referenzperiode 1961-1990. 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 der Realisierungen unterscheiden sich nicht deutlich (lediglich bis 2050). Die Realisation CLM 2 zeigt eine bessere Anpassung an die Messwerte der Station Bochum im Ausgangszustand 1961-1990 als CLM 1 und wurde daher für die weiteren Berechnungen verwendet.

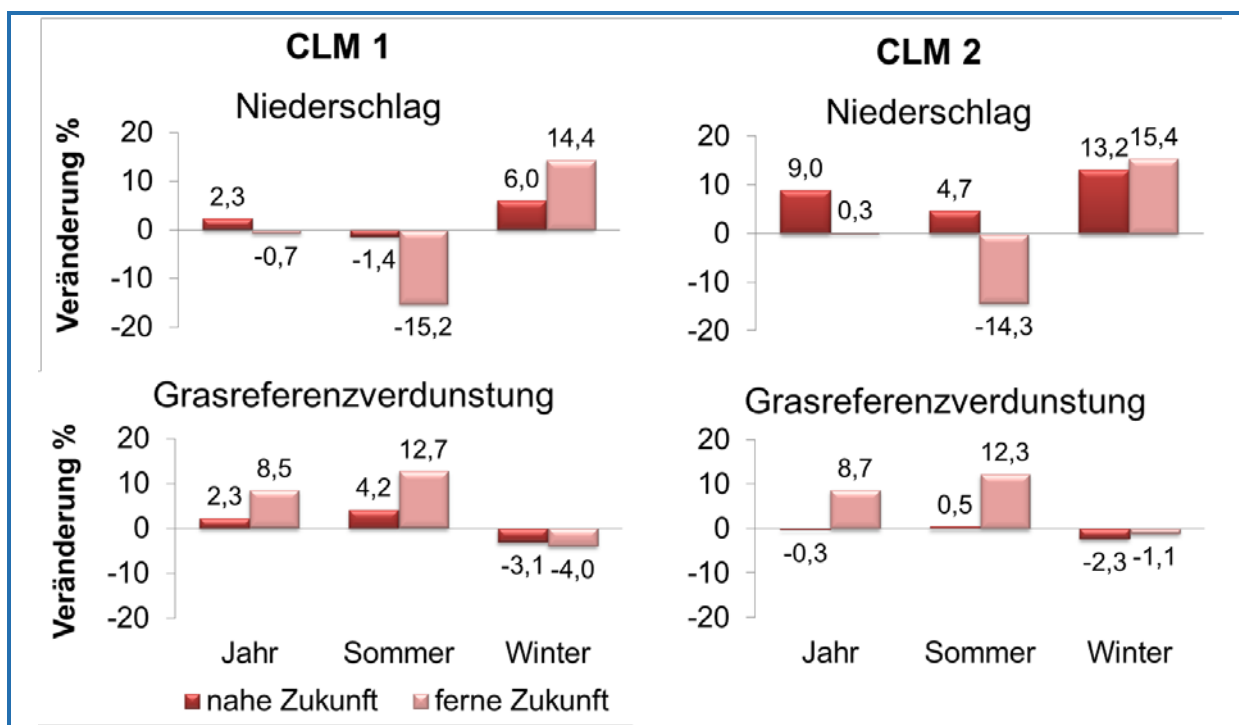


Abb. 3: Trend der Klimadaten gemäß CLM 1 und CLM 2

4 Sensibilität der Parameter in Bezug auf die Grundwasserneubildung

Ziel der Grundwasserneubildungsberechnung ist die Simulation der Grundwasserstände / Flurabstände zur Entscheidung, ob und welche Grundwasserbewirtschaftungsmaßnahmen klimawandelbedingt zukünftig notwendig werden. Relevant sind dabei Veränderungen der potenziellen Verdunstung (Temperatur, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer) und der Niederschläge im Jahresverlauf. Für die Grundwasserbewirtschaftung ist dabei insbesondere die Beurteilung einer erhöhten Grundwasserneubildung relevant. Bei höheren Temperaturen, die eine erhöhte Verdunstung zur Folge hätten, würde es jedoch zu einer geringeren Grundwasserneubildung kommen. Insofern ist eine geringere Temperaturerhöhung als im Ensemble der

regionalen Klimamodelle möglicherweise zu erwarten wäre, eher das Worst-Case Szenario. Von größerer Bedeutung sind daher die Niederschlagsveränderungen der übrigen Klimamodelle insbesondere bis 2050 (Worst-Case-Situation).

In Quirnbach et al. (2012) sind die Prognosen der verschiedenen Klimamodelle (Abb. 4) im Hinblick auf die sich ändernden Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse miteinander verglichen.

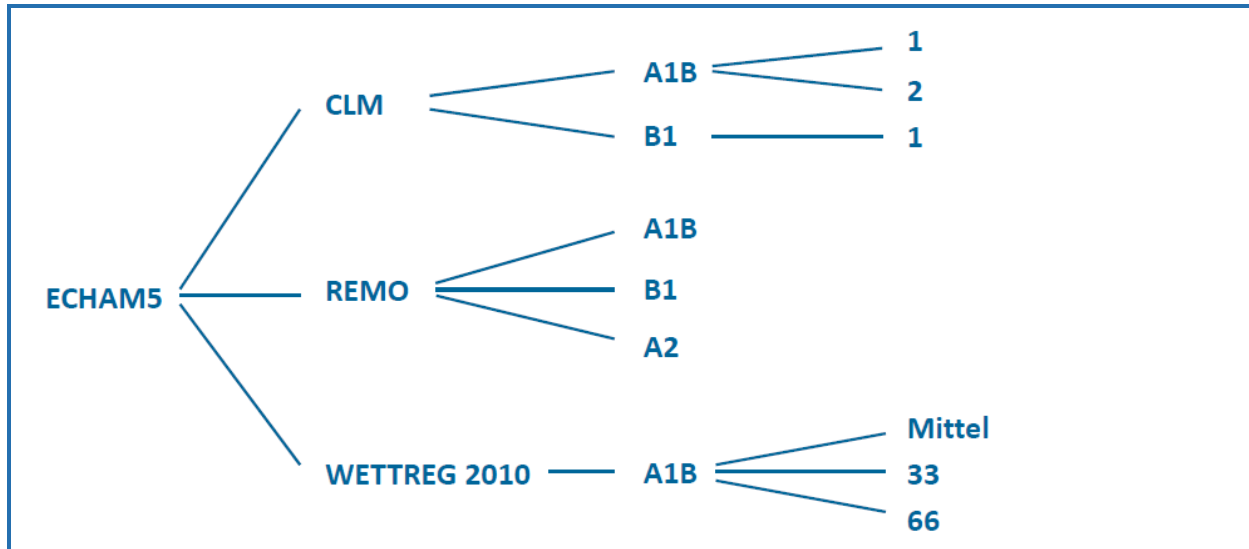


Abb. 4: Ensemble der regionalen Klimamodelle in Deutschland basierend auf ECHAM5 (Quirnbach et al. 2012)

Die mittlere Jahrestemperatur ist bei CLM 2 niedriger als bei anderen regionalen Klimamodellen, der Temperaturanstieg jedoch höher als im Mittel der anderen Klimamodelle (Abb. 5). In Abb. 6 ist der Zusammenhang zwischen Jahresmitteltemperatur und potenzieller Verdunstung dargestellt. Die Erhöhung der potenziellen Verdunstung würde bei einem um 1°C geringeren Temperaturanstieg um 20 mm/a geringer ausfallen. Bei den Berechnungen mit CLM2 wurde bei den Grundwasserneubildungsberechnungen bis 2100 eine Erhöhung um 50 mm/a angesetzt.

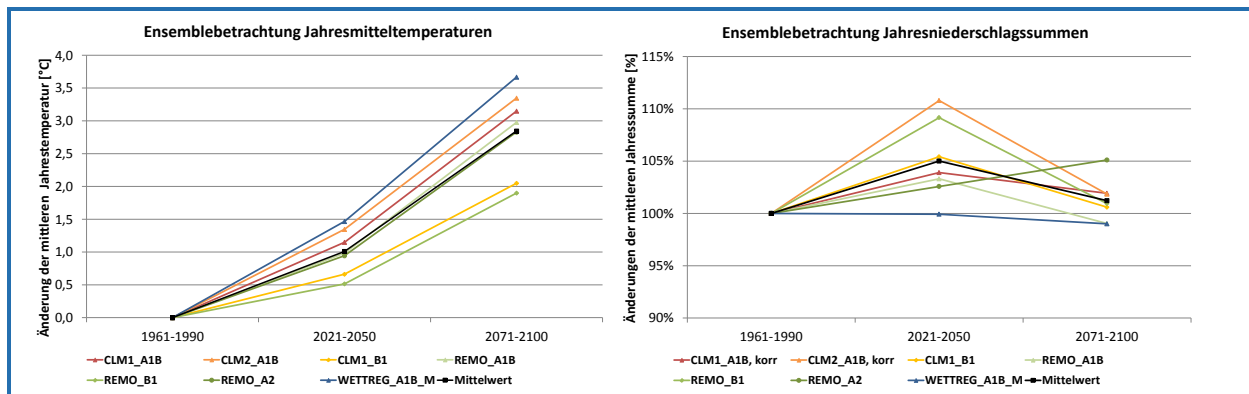


Abb. 5: Änderungen der mittleren Jahreslufttemperatur (links) und Jahresniederschlagssummen (rechts) im begrenzten Ensemble für die Nahe Zukunft (2021 – 2050) und für die Ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990) (Quirnbach et al. 2012)

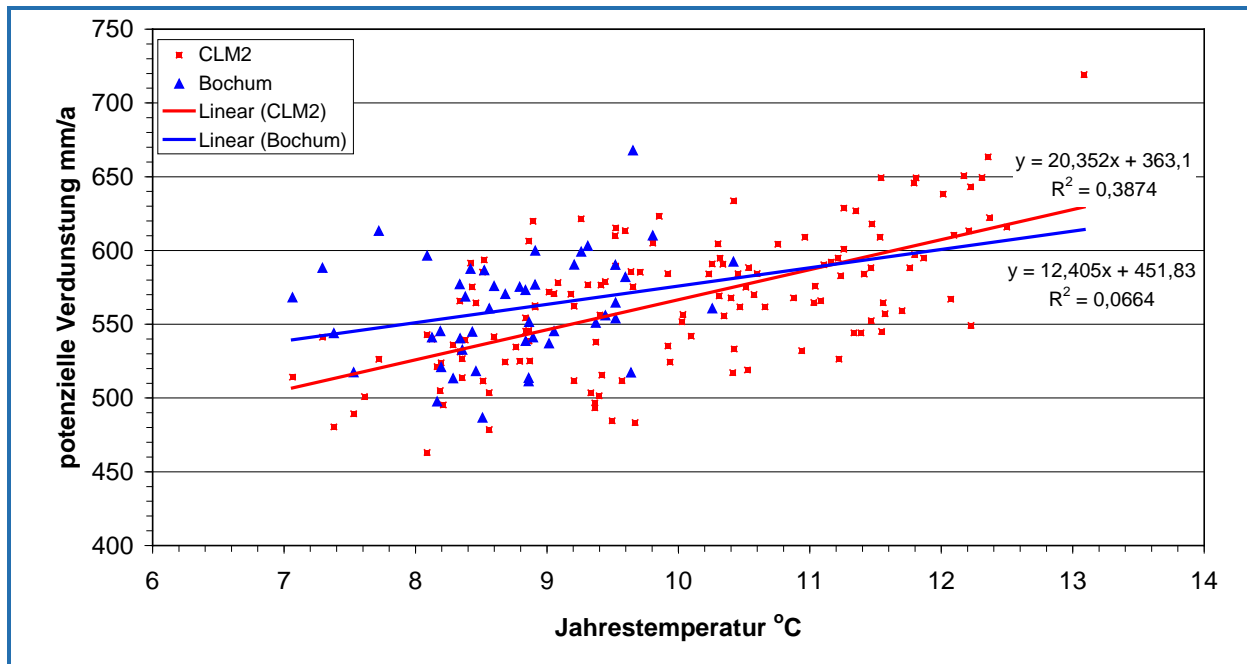


Abb. 6: Zusammenhang zwischen Jahrestemperatur und potenzieller Verdunstung

Nahe Zukunft

Höhere Temperaturen führen zu höheren potenziellen Verdunstungen. Bei den Berechnungen mit CLM2 wird für die nahe Zukunft keine Erhöhung der potenziellen Verdunstung in Ansatz gebracht (Worst-Case-Fall). Da bei den anderen Klimasimulationen die Temperaturveränderung eher geringer ausfällt, als bei CLM2, ist die „Nichtberücksichtigung“ des Temperaturanstiegs eher realistischer. In Bezug auf den Niederschlag bis 2050 stellt das Szenario CLM 2 für A1B im Vergleich zu den übrigen Klimasimulationen den Worst-Case-Fall dar. In allen anderen Simulationen fällt der Niederschlagsanstieg geringer aus. Im Ergebnis kann die berechnete Grundwasserneubildung für die nahe Zukunft als Worst-Case-Fall betrachtet werden. Bei Anwendung der übrigen Simulationsergebnisse, mit geringerer Temperaturerhöhung und geringerem Niederschlagsanstieg, würde die Erhöhung der Grundwasserneubildung geringer ausfallen.

Die Jahresniederschlagssummen entwickeln sich in einem Korridor von -2 % bis +11 % (Abb. 5), im Mittel aller regionalen Klimamodelle ist von einem Anstieg um ca. 4 % auszugehen. Die Zunahme der beiden in dynaklim genutzten Niederschlagszeitreihen des regionalen Klimamodells CLM liegt in der nahen Zukunft im oberen Bereich zwischen Mittelwert (CLM 2) und Maximum (CLM 2). Insofern stellt die Verwendung der CLM 2-Daten für die Belange der Wasserwirtschaft eher eine worst-case-Situation dar.

Ferne Zukunft

Bei den vorgenommenen Berechnungen wird für die ferne Zukunft eine Erhöhung der potenziellen Verdunstung infolge der Temperaturerhöhung um 50 mm/a berücksichtigt. Die verwendete Temperaturerhöhung ist überdurchschnittlich, aber im Mittel aller A1B-Simulationen (3,1 – 3,7 °C). Bei den B1-Simulationen fällt die Temperaturerhöhung geringer aus (ca. 2 °C), so dass die Veränderung der potenziellen Verdunstung geringer ausfallen würde. In der fernen Zukunft nehmen bei fast allen Klima-Simulationen die Niederschläge gegenüber der nahen Zukunft wieder ab. Bei CLM 2 A1B verbleibt eine geringe Erhöhung gegenüber heute (1 – 2 %). Diese fällt höher aus als bei den übrigen Simulationen (A1B, B1), bei den WETTREG-Szenarien ist der Niederschlag z.T. geringer als heute. Geringere Niederschläge und geringere potenzielle Verdunstungen wirken in der Wasserhaushaltsgleichung gegeneinander und heben sich bei der Berechnung der Grundwasserneubildung nahezu auf. Die Berechnungen mit CLM2 A1B ergeben damit eine repräsentative Größenordnung im Ensemble (nicht Worst-Case) (Abb. 5).

Die Realisation CLM 2 entspricht am ehesten den bisherigen Kenntnissen der Klimaentwicklung, 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 Jahresgang bei CLM 2 deutlichere Reaktionen zu erwarten sind.

5 Ergebnisse

5.1 Langjährig mittlere Grundwasserneubildung (1961-1990)

In Abb. 7 sind die Grundlagen der Grundwasserneubildungsberechnung dargestellt, die Herkunft der Daten geht aus Abb. 1 hervor. Die 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 im Emschergebiet plausibel.

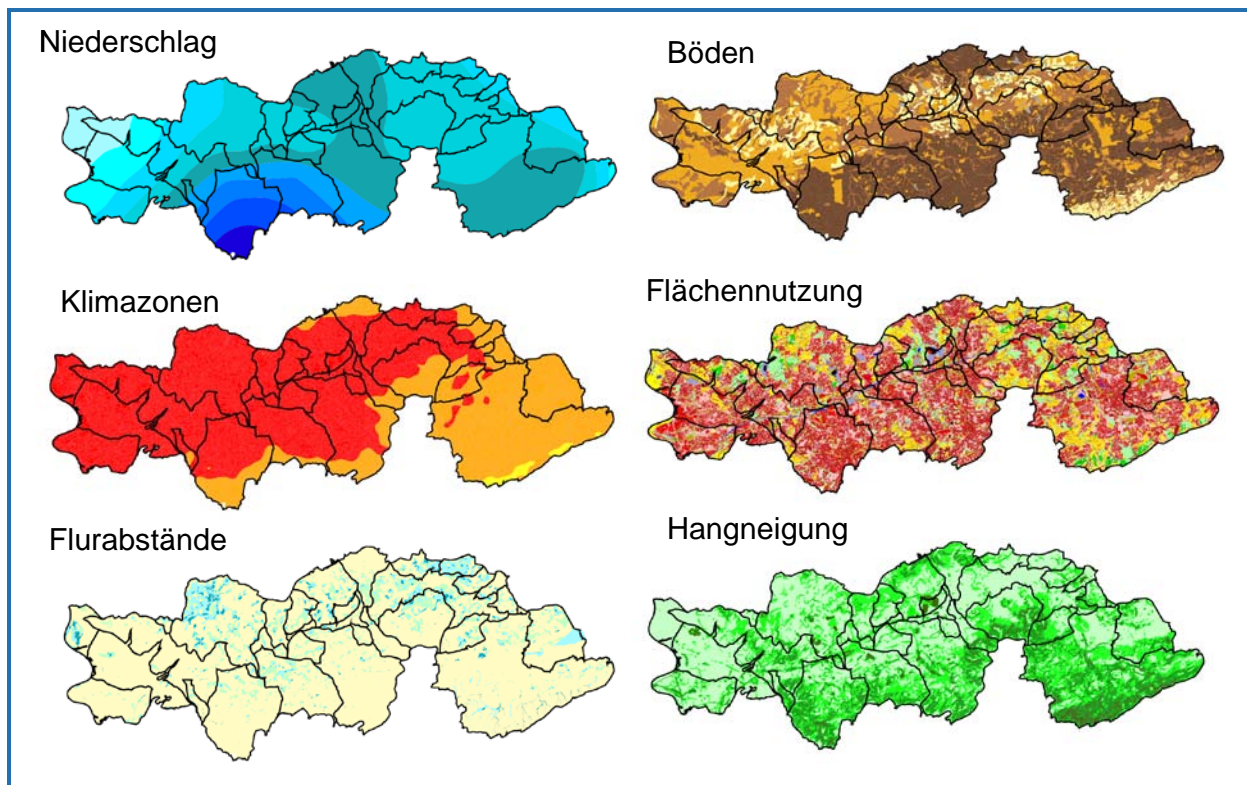


Abb. 7: Grundlagendaten für die Grundwasserneubildungsberechnung

5.2 Veränderung der jährlichen Grundwasserneubildung

Bis 2021-2050 (CLM 2) erhöhen sich die Niederschläge um 9 % (Abb. 3), woraus eine maximale Erhöhung der Grundwasserneubildungsrate um 83 mm/a – bei Flächen ohne Direktabfluss - resultiert, da sich die Verdunstung nicht verändert. Die mittlere Veränderung beträgt **33 mm/a bzw. + 23 %**. Bis 2071-2100 (CLM 2) verringern sich die Jahresniederschläge wieder auf das heutige Niveau, während sich die potenzielle Verdunstung signifikant erhöht (Abb. 3), woraus eine Verringerung der Grundwasserneubildungsrate um **4 mm/a bzw. um 3 %** resultiert (Abb. 8).

Bezogen auf die Teileinzugsgebiete ergeben sich die in Abb. 10 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 Einzelergebnisse der Wasserhaushaltsgrößen für die einzelnen Teileinzugsgebiete sind der Anlage 1 zu entnehmen. Im Detail ergibt sich ein Mosaik aus Erhöhungen und Verringerungen der Grundwasserneubildungsrate (Abb. 9). Für die nahe Zukunft bis 2021-2050 ist eine flächenhafte Erhöhung der Grundwasserneubildungsrate zu erwarten, während die Abnahme für die ferne Zukunft 2071-2100 eher lokalen Charakter hat und vornehmlich im nördlichen Emschergebiet zu erwarten ist.

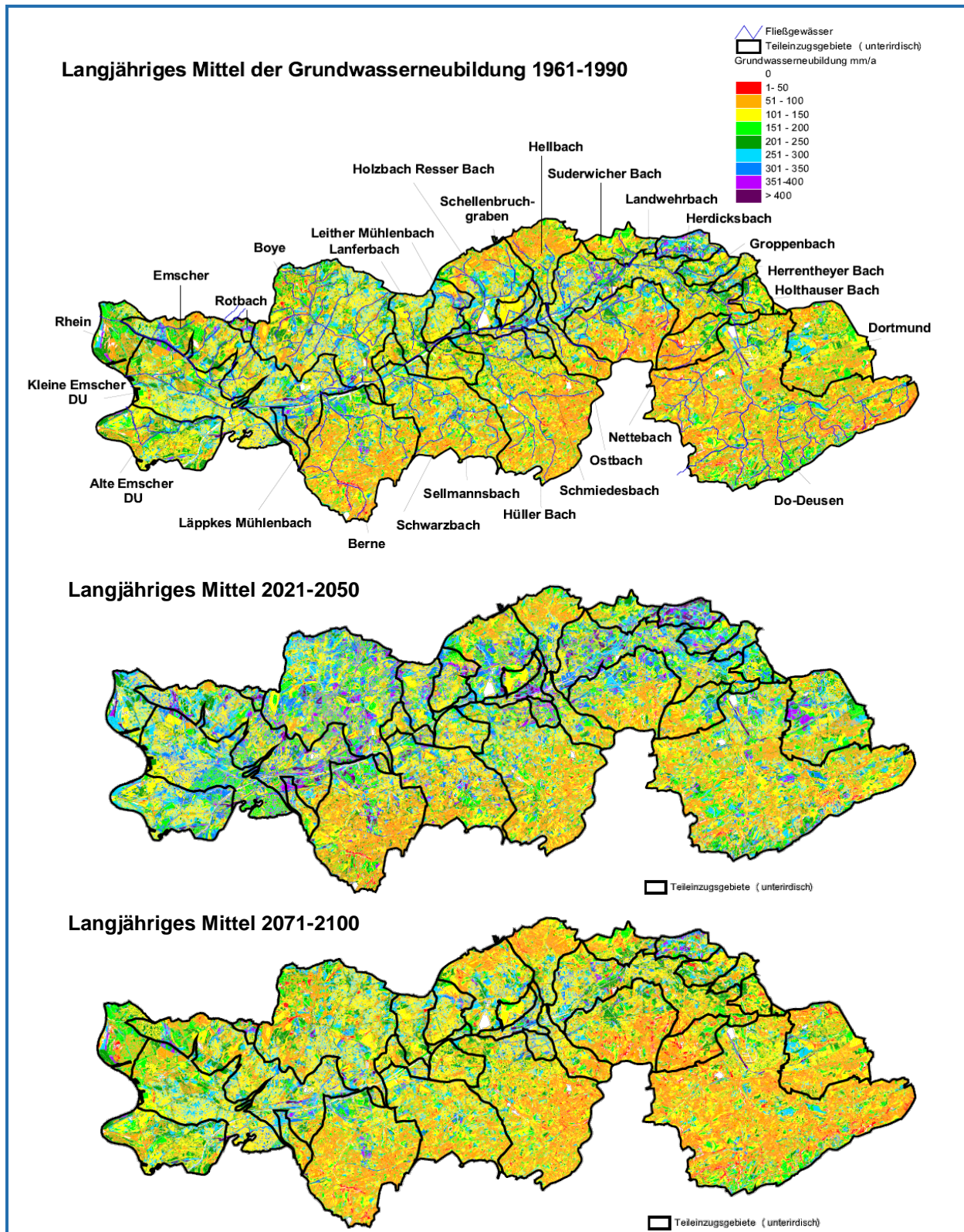


Abb. 8: Flächendifferenzierte Grundwasserneubildungsrate im Emschergebiet 1961-1990 (oben), 2021-2050 (Mitte) und 2071-2100 (unten) (CLM 2)

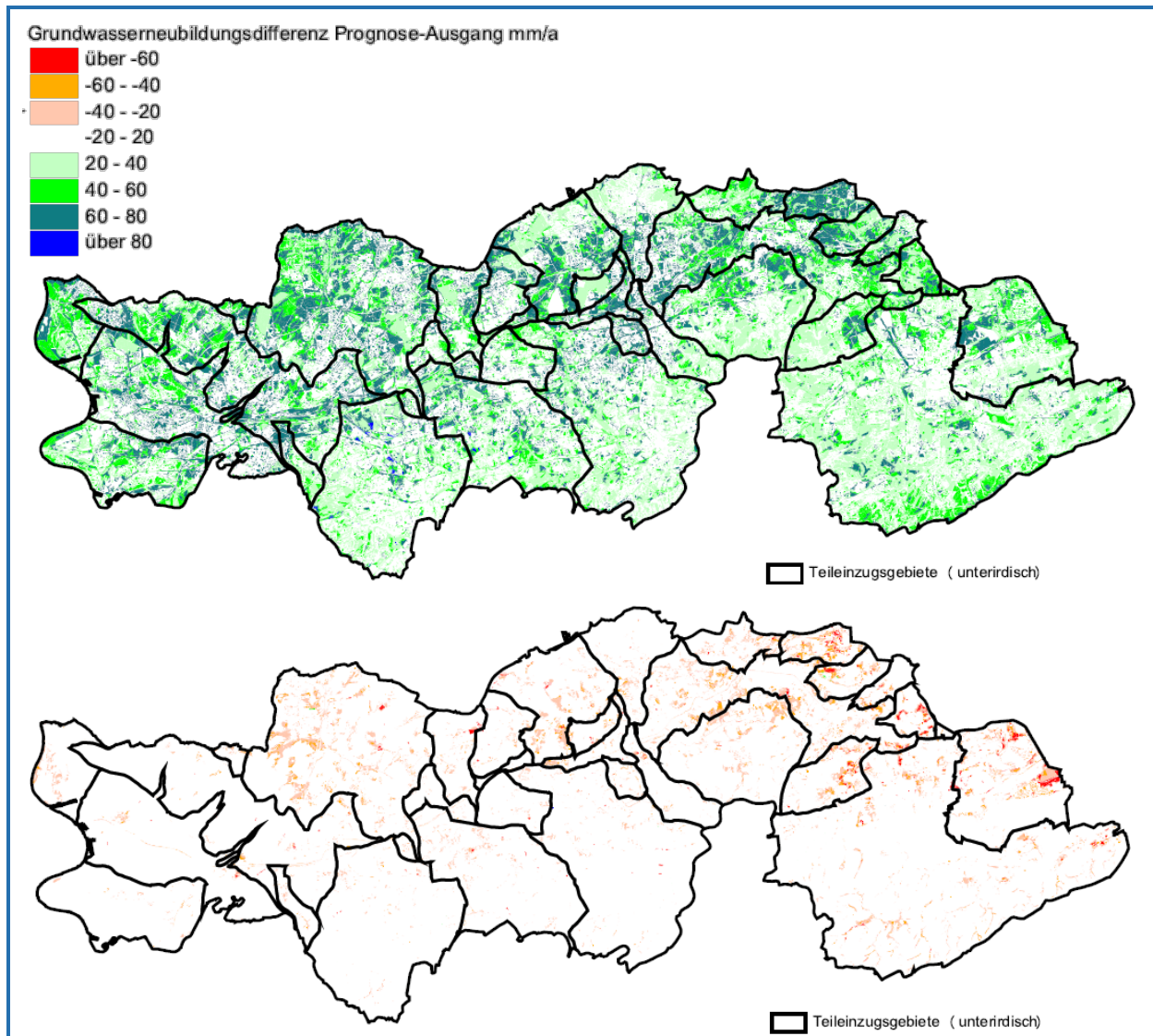


Abb. 9: Grundwasserneubildungsdifferenzen im Emschergebiet 1961-1990 bis 2021-2050 (oben) und 1961-1990 bis 2071-2100 (unten) (CLM 2)

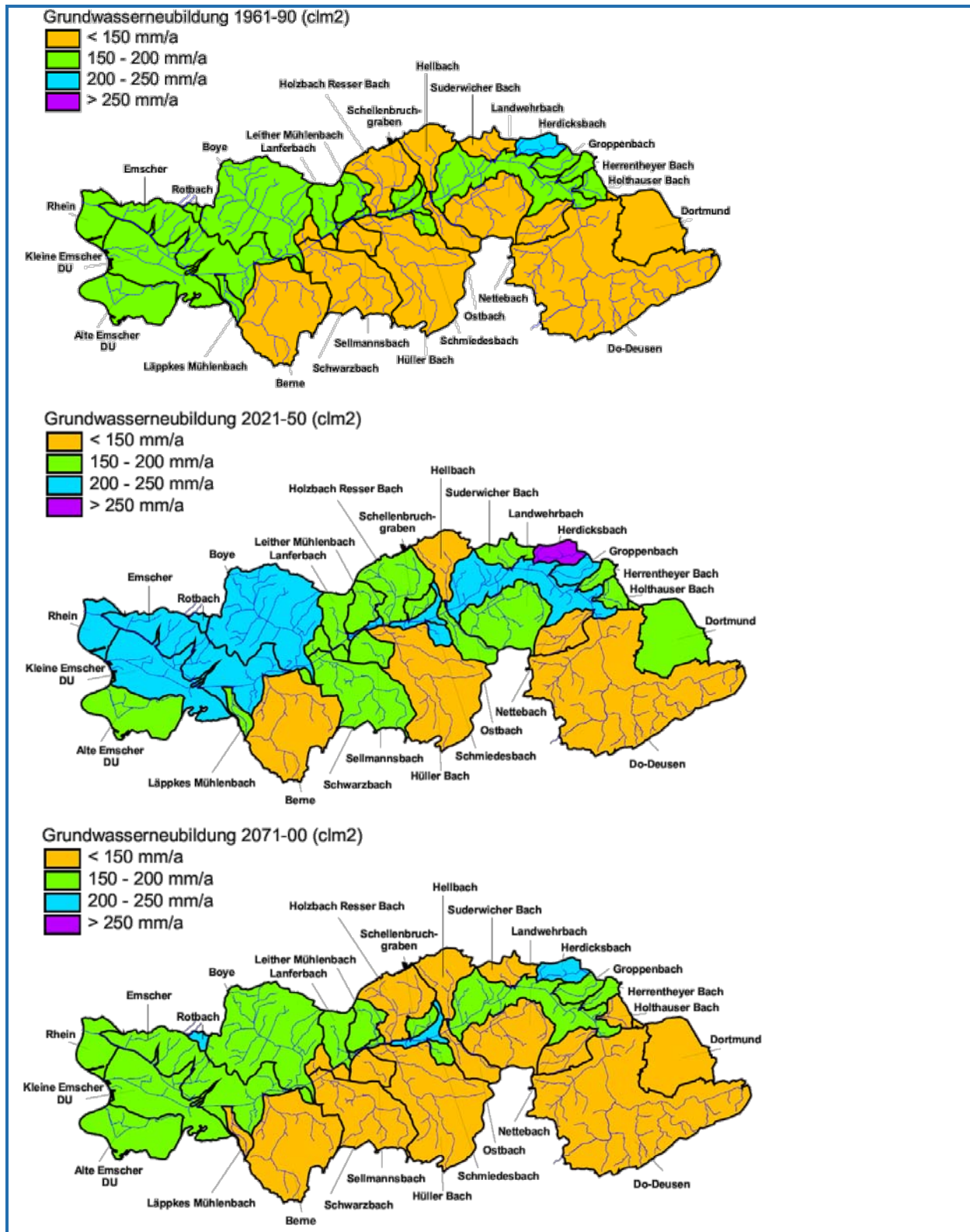


Abb. 10: Einzugsgebietsbezogene mittlere Grundwasserneubildungsrate im Emschergebiet 1961-1990 (oben), 2021-2050 (Mitte) und 2071-2100 (unten) (CLM 2)

5.3 Jahrgang der Grundwasserneubildung

Der Jahrgang der Grundwasserneubildung wird bei hohen Flurabständen über die klimatische Bodenwasserbilanz monatlich berechnet. Bei geringen Flurabständen wird lediglich eine Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung gebildet und ein erhöhter Direktabfluss berücksichtigt, so dass in den Sommermonaten auch eine Zehrung aus dem Grundwasser ermöglicht wird. Ähnlich ist es mit Seen und Teichen, wo ebenfalls eine solche klimatische Wasserbilanz erstellt wird. Im Falle eines „Vorflutteiches“, also eines Gewässers mit Vorflutfunktion für das Grundwasser, ist diese Bilanz ganzjährig über alle Monate 0 mm. Jeder Kleinflächentyp mit seiner jeweiligen Parameterkombination hat somit einen eigenen Jahrgang. Beispielhaft ist dies in Abb. 11 für Grünlandnutzung bei verschiedenen Böden und Flurabständen dargestellt. Bei durchlässigen Böden ist die winterliche Grundwasserneubildung deutlich höher als bei Böden mit geringer Durchlässigkeit bzw. hoher nutzbarer Feldkapazität. Bei geringen Flurabständen tritt im Sommer eine Zehrung auf, die zwar formal gemäß DIN 4049 (Grundwasserneubildung: Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser) nicht als negative Grundwasserneubildung zu bezeichnen ist, aber im Rahmen der Grundwassermodellierung als solche verwendet wird.

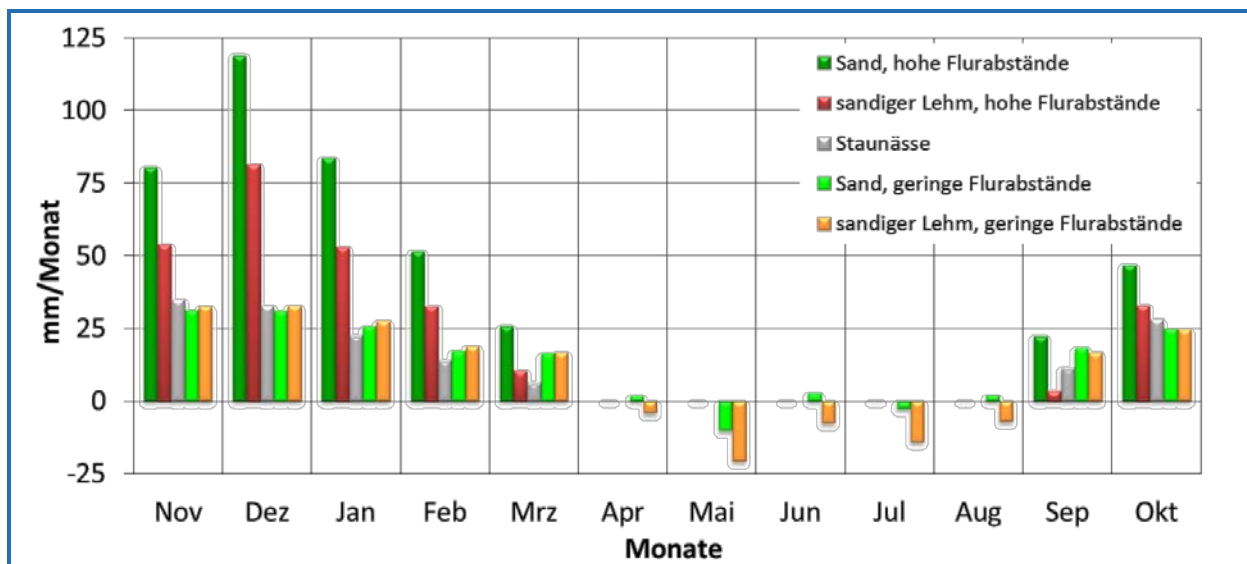


Abb. 11: Grundwasserneubildungsrate im Jahresverlauf für verschiedene Böden und Flurabstände bei Grünlandnutzung und geringer Hangneigung

Etwas anders als bei landwirtschaftlicher Nutzung sieht es im urbanen Raum aus (Abb. 12). Die Grundwasserneubildung auf landwirtschaftlichen Flächen konzentriert sich auf das hydrologische Winterhalbjahr. Demgegenüber ist die Grundwasserneubildung bei befestigten Flächen wesentlich geringer, verteilt sich aber deutlich gleichmäßiger über das gesamte Jahr. Ursache hierfür ist vor allem die Grundwasserneubildung teildurchlässiger Beläge und befestigte Flächen, die nicht an die Kanalisation angeschlossen sind. Entsprechend der extrem geringen nutzbaren Feldkapazität kommt es sehr häufig zu einem Wasserüberschuss, der über die Grundwasserneubildung zum Grundwasser gelangt.

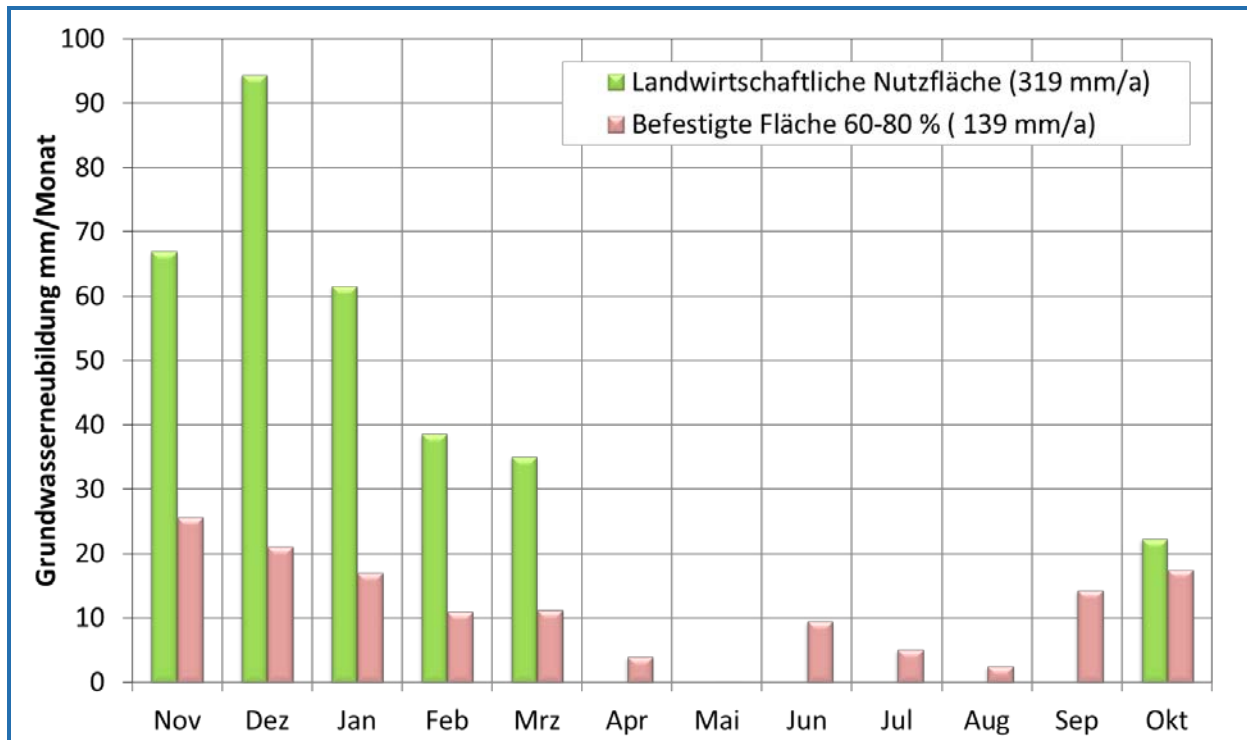


Abb. 12: Grundwasserneubildungsrate im Jahresverlauf bei lehmigem Sandboden, Flurabständen von 2-3 m und geringer Hangneigung für landwirtschaftliche Nutzung und bei befestigten Flächen

Weitere Beispiele sind in Abb. 13 für den Dortmunder Raum enthalten. Auch hier ergibt sich für den Innenstadtbereich eine geringe aber gleichmäßige Grundwasserneubildung im Jahresverlauf. Auffällig hoch und ganzjährig über alle Monate verteilt ist die Grundwasserneubildung der vegetationsarmen Flächen mit durchlässigen Aufschüttungsböden, wie sie z.B. bei Güterbahnhöfen auftreten. Es pausen sich hier auch die Sommerniederschläge in der Grundwasserneubildung durch, was bei anderen Flächennutzungen nicht der Fall ist. Eine deutlich größere Zehrung als bei landwirtschaftlicher Nutzung tritt im Sommer bei Laubwald und geringen Flurabständen auf. Mit -57 mm ist die Bilanz des Sommerhalbjahres deutlich negativ. Erst durch die hohe Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr wird die Jahresbilanz positiv.

In Abb. 14 ist die mittlere monatliche Grundwasserneubildungsrate für das gesamte Emschergebiet für die verschiedenen Zeitschnitte dargestellt. Die höchste Grundwasserneubildungsrate im Zeitraum 1961-1990 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 unter 5 mm/Monat.

In der nahen Zukunft ist die Grundwasserneubildungsrate im Winter- und Sommerhalbjahr in der Mehrzahl der Monate erkennbar höher. Dies betrifft insbesondere die Monate November, Dezember, März, Juni und September (Abb. 15). Nur im August ist die Grundwasserneubildungsrate geringfügig unterhalb der des Ausgangszustandes. Ursächlich ist hierbei die deutlich höhere Niederschlagsrate bei vergleichbarer Grasreferenzverdunstung (siehe Kap. 3).

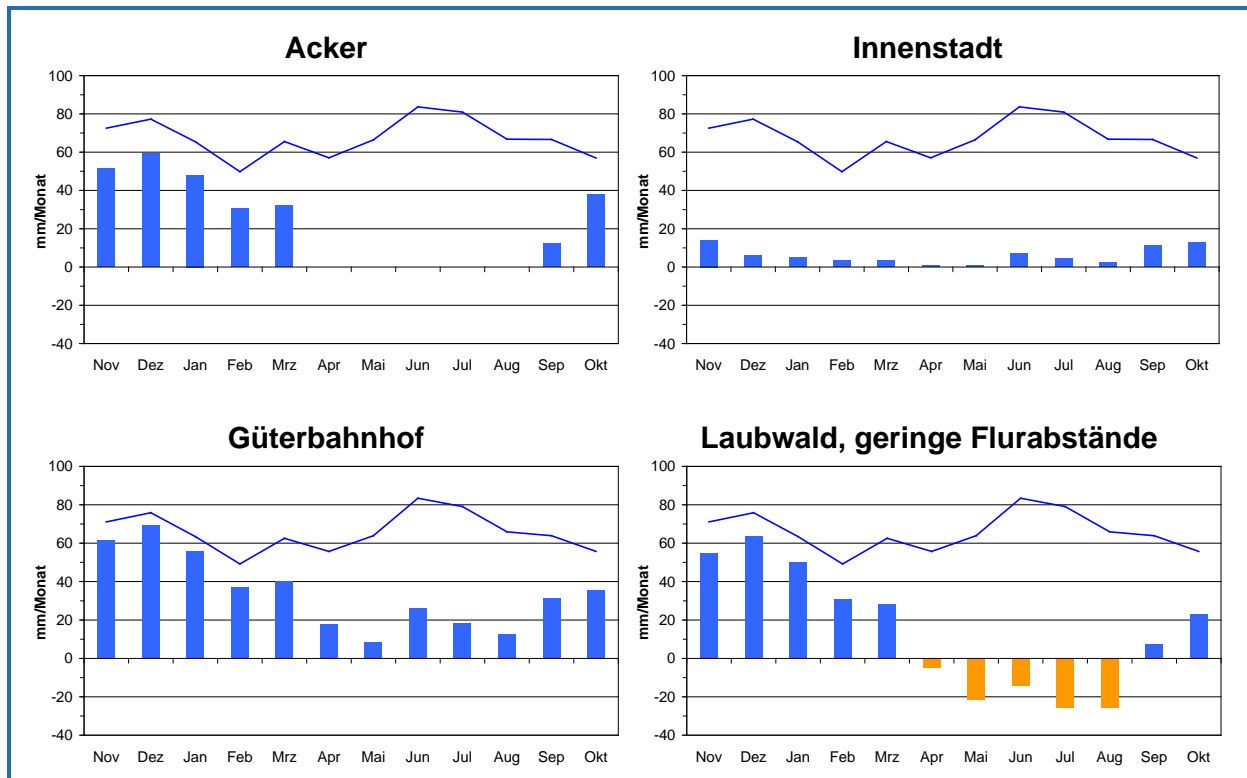


Abb. 13: Grundwasserneubildungsrate (Balken) und Niederschläge (Linien) im Jahresverlauf bei verschiedenen Nutzungen im Raum Dortmund (1961-1990)

Bis 2071-2100 nimmt die Niederschlagsrate im Mittel auf das heutige Niveau ab und die Grasreferenzverdunstung insbesondere im Sommerhalbjahr merklich zu (Kap. 3). Die Folge ist eine im Winterhalbjahr mit heute vergleichbare Grundwasserneubildungsrate im Emschergebiet. Lediglich im November und Dezember ergibt sich eine erhöhte Grundwasserneubildungsrate von 4-6 mm/Monat (Abb. 14). In allen Monaten im Sommerhalbjahr ist die Grundwasserneubildungsrate geringer als im Ausgangszustand. Zwischen Mai und August ist sie im Gebietsmittel für das Emschergebiet <0 mm/Monat, d.h. es überwiegt die Zehrung aus dem Grundwasser.

In Abb. 16 sind die Veränderungen der Grundwasserneubildungsrate in mm und % für die nahe und ferne Zukunft als Ringdiagramme dargestellt. Bei der prozentualen Veränderung ist zu beachten, dass bei geringen Grundwasserneubildungsraten hohe prozentuale Veränderungen resultieren, was der Gewichtung des jeweiligen Monats nicht entspricht. Dies gilt beispielsweise für den Mai in der nahen Zukunft. Die Ringdiagramme in mm zeigen sehr plakativ die zu erwartende Erhöhung der Grundwasserneubildungsrate für die nahe Zukunft in fast allen Monaten (außer August) und die Verringerung der Grundwasserneubildungsrate im gesamten Sommerhalbjahr für die ferne Zukunft.

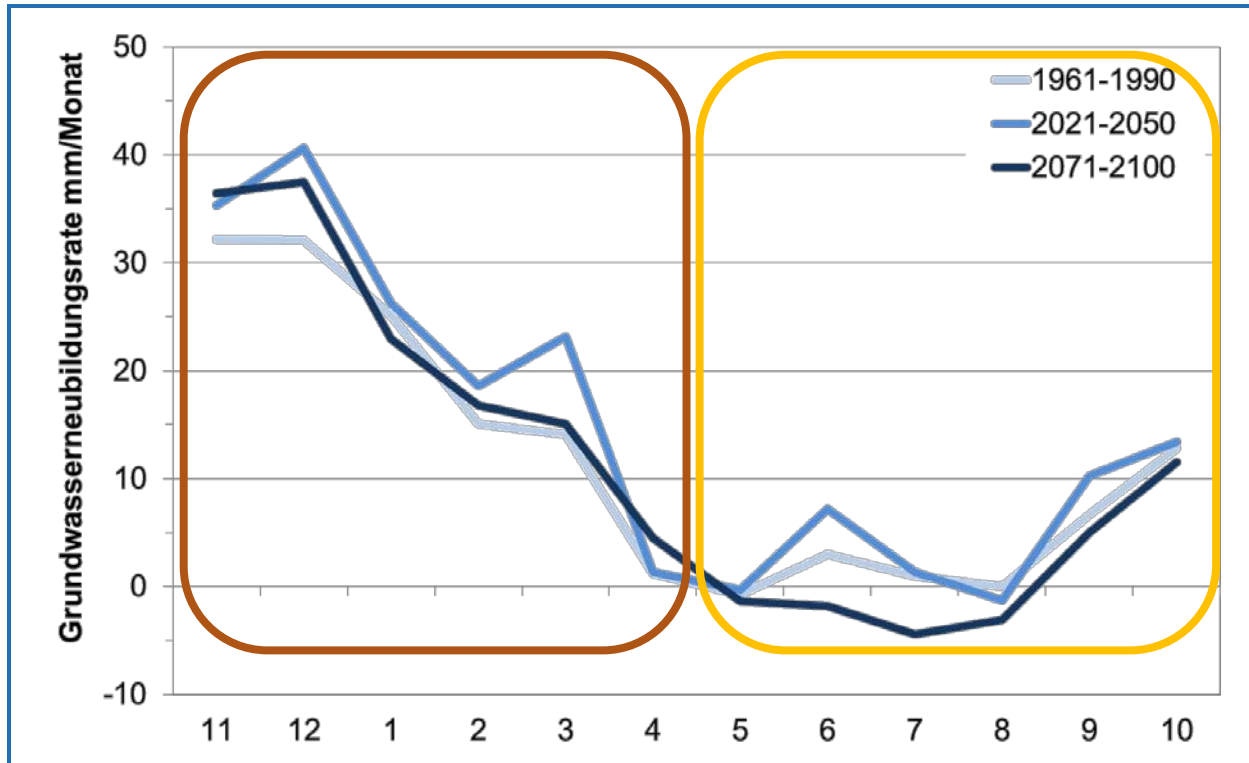


Abb. 14: Grundwasserneubildungsrate im Jahresverlauf im Emschergebiet 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100 (CLM 2)

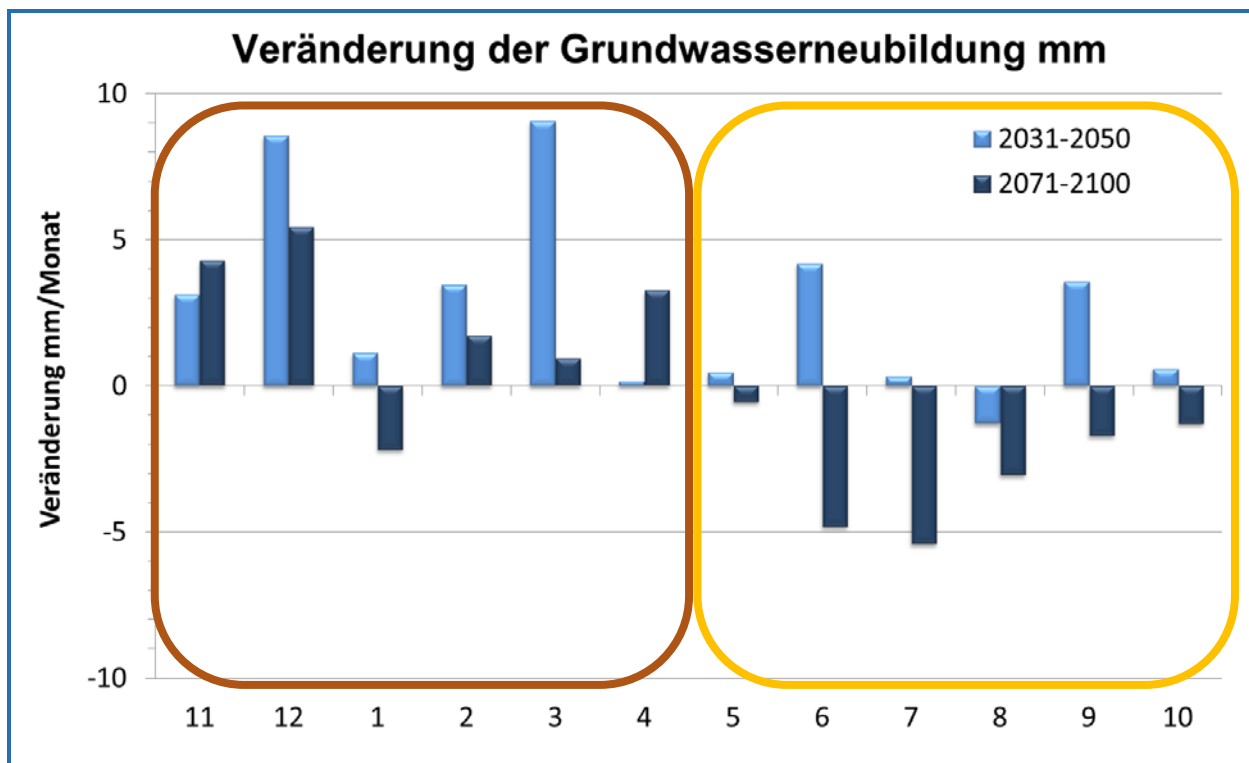


Abb. 15: Monatliche Grundwasserneubildungsdifferenzen im Emschergebiet 1961-1990 bis 2021-2050 und 1961-1990 bis 2071-2100 (CLM 2)

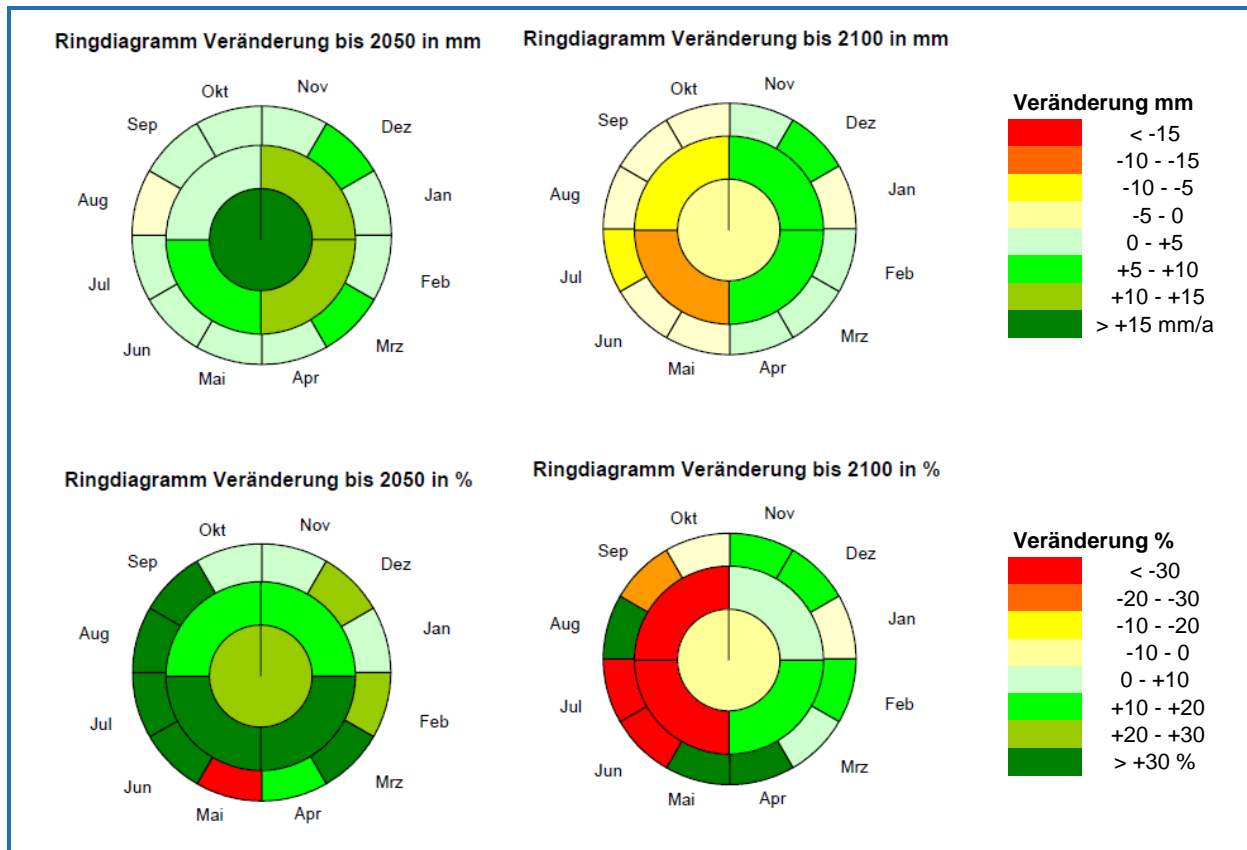


Abb. 16: Grundwasserneubildungsveränderungen im Emschergebiet 1961-1990 bis 2021-2050 (links) und 1961-1990 bis 2071-2100 (rechts) (CLM 2)

Im Ergebnis ist zu erwarten, dass die Grundwasserstände größeren Schwankungen unterliegen werden als heute. In der Jahressumme ist für die ferne Zukunft 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 Emscher-Gebiet stehen nicht die landwirtschaftliche Nutzung oder Auswirkungen auf Feuchtgebiete im Focus, sondern die wasserwirtschaftliche 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). Die nahe Zukunft (2021-2050) ist in diesem Sinne für das Emscher-Gebiet als die kritische Situation heranzuziehen. Eine erhöhte Grundwasserneubildung in allen Monaten des Wasserwirtschaftsjahres kann zu ganzjährig erhöhten Grundwasserständen führen.

5.4 Grundwasserneubildung in Nassjahren

Mit Hilfe der Grundwassermodelle kann die Notwendigkeit zusätzlicher Grundwasserbewirtschaftungsmaßnahmen geprüft werden, was Gegenstand der weiteren Bearbeitung sein wird. Ebenso können auch einzelne Nassjahre zu Problemen führen. Um die Sensibilität des Raumes zu prüfen, wurde in einem Beispielgebiet die Grundwasserneubildungsrate für ein extremes Nassjahr (2041) im Raum Dortmund ermittelt (Einzugsgebiet des Roßbaches). Gemäß CLM 2-Berechnungen ist mit einer Niederschlagsrate in einem solchen Nassjahr (2041) von 1.073 mm zu rechnen (nach BIAS-Korrektur). Im Ausgangszustand (1961-1990) beträgt die Niederschlagsrate in diesem Gebiet 796 mm/a und für

2021-2050 879 mm/a. Die Ergebnisse der Berechnung zeigen eine drastische Erhöhung der Grundwasserneubildung (Abb. 17).

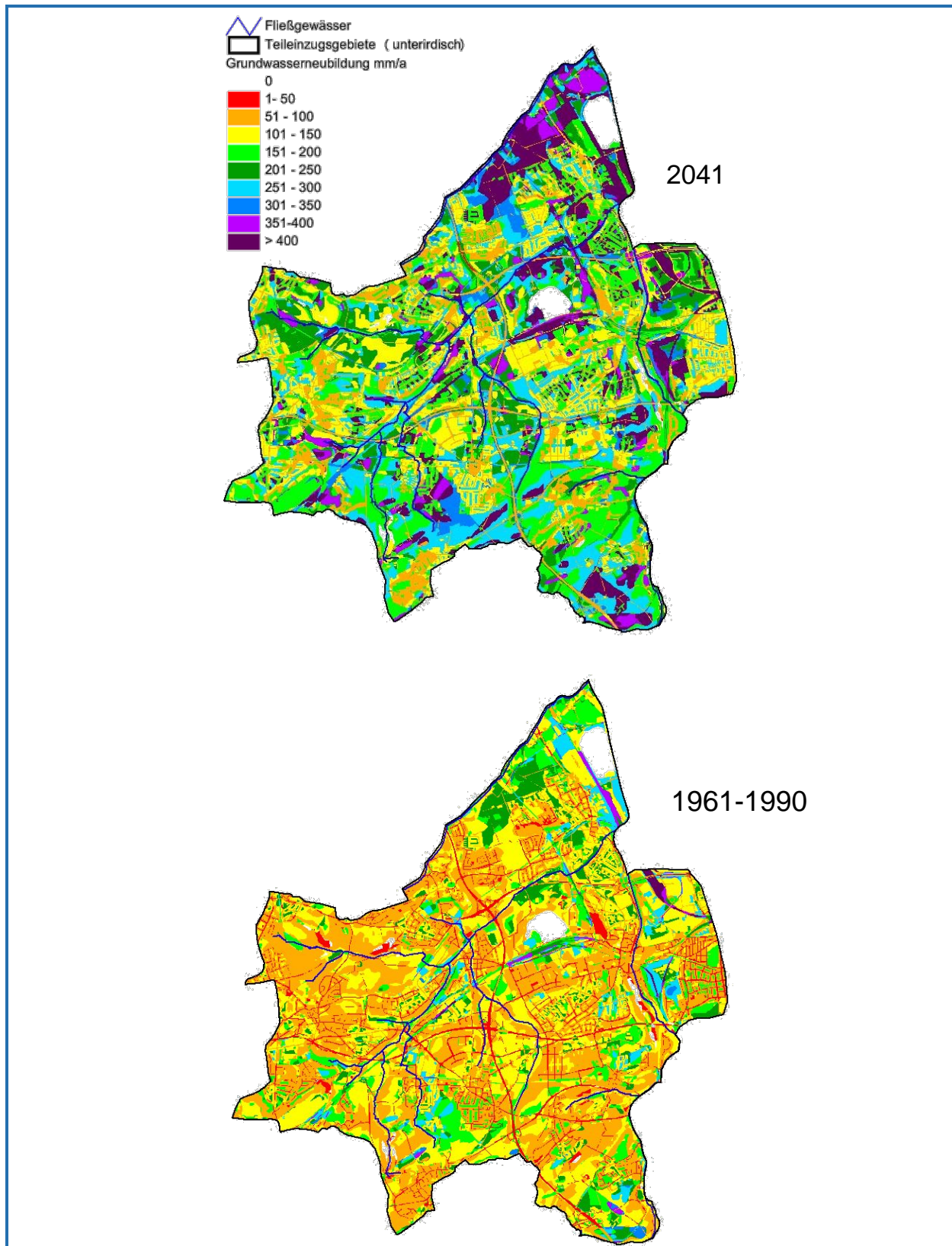


Abb. 17: Grundwasserneubildungsrate für das Einzugsgebiet des Roßbachs (oben: Nassjahr 2041, unten 1961-1990)

Im Ausgangszustand 1961-90 beträgt die Grundwasserneubildung 115 mm/a im langjährigen Mittel. In einem Nassjahr, wie es gemäß CLM 2 –Berechnung 2041 eintreten kann, kommt es mit 219 mm/a fast zu einer Verdopplung der Grundwasserneubildung. Während die Verdunstung vergleichbar mit der des Ausgangszustandes ist, erhöht sich auch der Direktabfluss von 256 mm/a auf 430 mm/a deutlich. Zwei Drittel der Grundwasserneubildung konzentrieren sich dabei auf das Winterhalbjahr. Auch im Sommer kommt es gemäß der Verteilung der Niederschläge auf die Monate zu einer deutlichen Grundwasserneubildung (Abb. 18). Insbesondere der Juli ist durch hohe Niederschläge gekennzeichnet. Demgegenüber tritt bei mittleren Verhältnissen im Gebietsmittel im Sommer eine Zehrung der Grundwasservorräte auf, da größere Flächen geringe Flurabstände besitzen.

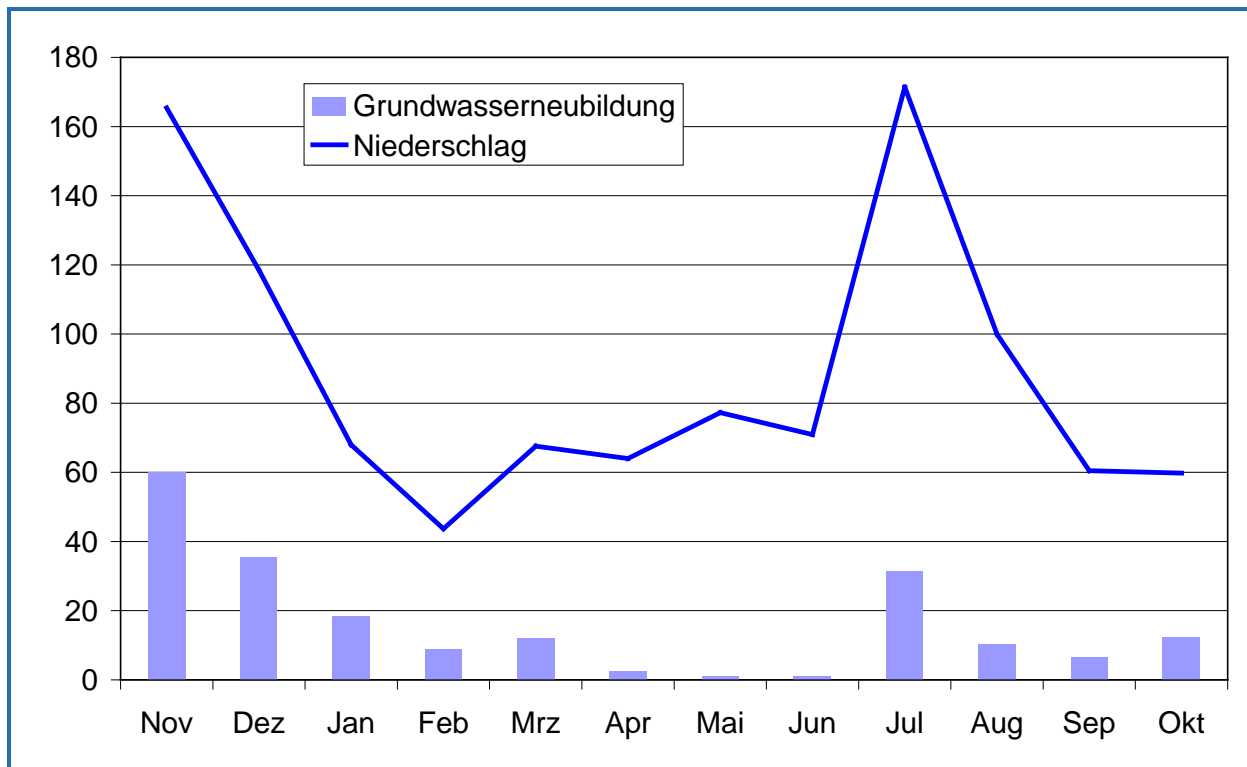


Abb. 18: Niederschlagsrate und Grundwasserneubildungsrate für das Einzugsgebiet des Roßbachs im Jahresverlauf für das Nassjahr 2041 (CLM 2)

6 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen des dynaklim-Projektes wurde ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung der monatlichen Grundwasserneubildung auf der Basis des Verfahrens GWneu (Meßer 2010) entwickelt. Ziel ist die Erarbeitung von Anpassungsstrategien für die Siedlungsentwässerung mit Hilfe von numerischen Grundwassermodellen. Die Ergebnisse der Grundwasserneubildungsberechnung für den Ausgangszustand (1961-1990), die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100) gehen als Eingangsdaten in die Grundwassermodellierung ein. Grundlage sind die Realisationsergebnisse des regionalen Klimamodells COSMO-CLM. Ziel der Emschergenossenschaft ist es, durch Anpassungen der Bewirtschaftungsmaßnahmen eine sichere und nachhaltige Entwässerung zu garantieren.

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. Der Jahresniederschlag erhöht sich bis zum Zeitraum 2021-2050 um 9 % (CLM 2) und fällt anschließend bis 2100 wieder auf das Niveau der Periode 1960-1990 ab, dabei werden die Sommer trockener und die Winter nasser. Die Grasreferenzverdunstung nimmt bis zum Jahr 2100 um 8,5

% zu. Im Sommer ist die Zunahme dabei überdurchschnittlich. Im Vergleich zu anderen Klimasimulationen (REMO, WETTREG) zeigen die Ergebnisse von Cosmo CLM 2 A1B im Hinblick auf die Grundwasserneubildung für die nahe Zukunft einen Worst-case-Fall und für die ferne Zukunft eine repräsentative Größenordnung im Ensemble.

Bis 2021-2050 (CLM 2) erhöht sich die Grundwasserneubildungsrate im Mittel für das Emschergebiet um 33 mm/a bzw. + 23 %. Bis 2071-2100 (CLM 2) verringern sich die Jahresniederschläge wieder auf das heutige Niveau, während sich die potenzielle Verdunstung signifikant erhöht, woraus eine Verringerung der Grundwasserneubildungsrate um 4 mm/a bzw. um 3 % resultiert.

In der nahen Zukunft ist die Grundwasserneubildungsrate im Winter- und Sommerhalbjahr in der Mehrzahl der Monate erkennbar höher. In der fernen Zukunft ist im Winterhalbjahr mit einer vergleichbaren Grundwasserneubildung wie heute zu rechnen. In allen Monaten im Sommerhalbjahr ist die Grundwasserneubildungsrate geringer als heute. Zwischen Mai und August ist sie im Gebietsmittel für das Emschergebiet <0 mm/Monat, d.h. es überwiegt die Zehrung aus dem Grundwasser, was im Ausgangszustand nicht der Fall ist.

7 Literaturverzeichnis

ATV-DVWK (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. - Merkblatt M 504, 144 S.; Hennef.

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.

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., 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.

Meßer, 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.

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

Meßer, J. (2010): Begleittext zum Doppelblatt Wasserhaushalt und Grundwasserneubildung von Westfalen– In: Geographisch-landeskundlicher Atlas von Westfalen, Themenbereich II LANDESNA-TUR, Hrsg.: Geographische Kommission für Westfalen, Landschaftsverband Westfalen-Lippe; Münster.

Meßer, J., Ohlenbusch, R. & Getta, M. (2011): Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region - Entwicklung eines instationären Prognosewerkzeuges zur Berechnung der Klimawandelbedingten Veränderungen der Grundwasserneubildung; Dynaklim-Publikation No. 14: 30 S., 19 Abb., 2 Tab.; Essen.

Quirnbach, M., Freistühler, E. & Papadakis, I. (2012): Auswirkungen des Klimawandels in der Em-scher-Lippe-Region - Analysen zu den Parametern Lufttemperatur und Niederschlag; Dynaklim-Publikation No. **30**: 52 S., 35 Abb., 13 Tab.; Hattingen.

Anlage 1: Wasserhaushaltsgrößen für die Teileinzugsgebiete der Emscher (1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100)

| Teileinzugsgebiete | Fläche km ² | Ausgangszustand 1961-1990 | | | | | | Prognosezustand CLM2 2021-2050 | | | | | | Prognosezustand CLM2 2071-2100 | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------|------------|------------------------|---------------|------------|--------------------------------|------------|------------------------|---------------|------------|------------|--------------------------------|------------------------|---------------|--|--|--|
| | | N mm/a | V mm/a | Q mm/a | Q _b mm/a | Gwneu mm/a | N mm/a | V mm/a | Q mm/a | Q _b mm/a | Gwneu mm/a | N mm/a | V mm/a | Q mm/a | Q _b mm/a | Gwneu mm/a | | | |
| Do-Deusen | 159,8 | 800 | 415 | 385 | 267 | 118 | 875 | 415 | 460 | 315 | 145 | 803 | 425 | 378 | 264 | 114 | | | |
| Nettebach | 16,1 | 790 | 468 | 322 | 207 | 115 | 864 | 468 | 396 | 249 | 147 | 792 | 487 | 305 | 199 | 105 | | | |
| Hollhauser Bach | 6,6 | 784 | 509 | 275 | 123 | 151 | 857 | 509 | 348 | 152 | 195 | 786 | 532 | 254 | 116 | 138 | | | |
| Herrentheyer Bach | 5,5 | 779 | 429 | 350 | 190 | 160 | 852 | 429 | 423 | 224 | 198 | 781 | 442 | 339 | 185 | 153 | | | |
| Groppenbach | 8,6 | 784 | 494 | 290 | 114 | 175 | 858 | 494 | 364 | 139 | 224 | 786 | 512 | 274 | 109 | 165 | | | |
| Herdicksbach | 8,8 | 783 | 485 | 298 | 71 | 227 | 857 | 485 | 372 | 87 | 284 | 785 | 481 | 304 | 77 | 227 | | | |
| Suderwicher Bach | 10,8 | 790 | 490 | 300 | 155 | 145 | 864 | 490 | 374 | 186 | 187 | 792 | 500 | 292 | 153 | 139 | | | |
| Landwehrbach | 41,5 | 791 | 438 | 353 | 221 | 131 | 865 | 438 | 427 | 262 | 164 | 793 | 445 | 348 | 219 | 129 | | | |
| Heilbach | 20,5 | 807 | 398 | 409 | 288 | 121 | 883 | 398 | 485 | 336 | 149 | 810 | 404 | 406 | 288 | 117 | | | |
| Ostbach | 12,4 | 800 | 399 | 401 | 269 | 132 | 875 | 399 | 476 | 314 | 161 | 803 | 402 | 401 | 269 | 131 | | | |
| Schmiedesbach | 4,3 | 809 | 366 | 443 | 253 | 190 | 885 | 366 | 519 | 290 | 228 | 812 | 368 | 444 | 255 | 188 | | | |
| Schellenbruchgraben | 5,0 | 809 | 411 | 398 | 244 | 154 | 885 | 411 | 474 | 286 | 188 | 812 | 406 | 406 | 247 | 159 | | | |
| Hüller Bach | 80,4 | 815 | 391 | 424 | 304 | 120 | 891 | 391 | 500 | 354 | 146 | 818 | 396 | 422 | 304 | 118 | | | |
| Holzbach / Resser Bach | 31,1 | 806 | 450 | 356 | 207 | 148 | 882 | 450 | 432 | 245 | 186 | 810 | 458 | 352 | 206 | 145 | | | |
| Leither Mühlenbach | 12,5 | 794 | 380 | 414 | 253 | 161 | 869 | 380 | 489 | 293 | 195 | 799 | 381 | 418 | 257 | 160 | | | |
| Sellmannsbach | 11,4 | 797 | 365 | 432 | 293 | 138 | 872 | 365 | 507 | 339 | 167 | 801 | 369 | 432 | 294 | 137 | | | |
| Schwarzbach | 50,1 | 841 | 410 | 431 | 298 | 132 | 924 | 410 | 514 | 349 | 162 | 846 | 418 | 428 | 298 | 130 | | | |
| Lanferbach | 13,7 | 787 | 404 | 383 | 222 | 162 | 862 | 404 | 458 | 259 | 199 | 793 | 410 | 383 | 223 | 160 | | | |
| Boye | 83,4 | 781 | 429 | 352 | 187 | 164 | 855 | 429 | 426 | 219 | 206 | 786 | 432 | 354 | 190 | 164 | | | |
| Berne | 66,8 | 866 | 374 | 492 | 368 | 124 | 948 | 374 | 574 | 425 | 148 | 873 | 378 | 495 | 370 | 123 | | | |
| Läppkes Mühlenbach | 5,2 | 836 | 432 | 404 | 252 | 151 | 915 | 432 | 483 | 297 | 185 | 841 | 441 | 400 | 251 | 148 | | | |
| Emscher | 51,6 | 794 | 442 | 352 | 187 | 164 | 868 | 442 | 426 | 221 | 205 | 796 | 446 | 350 | 186 | 162 | | | |
| Emscher | 6,5 | 805 | 411 | 394 | 193 | 200 | 881 | 411 | 470 | 226 | 244 | 808 | 414 | 394 | 193 | 201 | | | |
| Emscher | 65,5 | 777 | 384 | 393 | 224 | 169 | 850 | 384 | 466 | 260 | 206 | 781 | 386 | 395 | 226 | 168 | | | |
| Emscher | 6,6 | 799 | 371 | 428 | 282 | 146 | 874 | 371 | 503 | 327 | 176 | 803 | 376 | 427 | 283 | 145 | | | |
| Emscher | 1,4 | 834 | 361 | 473 | 319 | 154 | 913 | 361 | 552 | 366 | 185 | 838 | 360 | 478 | 324 | 154 | | | |
| Emscher | 2,0 | 786 | 475 | 311 | 151 | 159 | 860 | 475 | 385 | 183 | 201 | 792 | 487 | 305 | 147 | 158 | | | |
| Summe/Mittel Emscher | 788,3 | 741 | 379 | 363 | 235 | 127 | 811 | 379 | 433 | 275 | 157 | 745 | 384 | 361 | 235 | 125 | | | |
| Weitere | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Dortmund | 40,5 | 791 | 414 | 377 | 241 | 136 | 865 | 414 | 451 | 282 | 169 | 793 | 428 | 365 | 238 | 128 | | | |
| Alte Emscher DU | 34,2 | 762 | 386 | 376 | 213 | 163 | 834 | 386 | 448 | 249 | 199 | 767 | 387 | 380 | 216 | 163 | | | |
| Kleine Emscher DU | 50,3 | 761 | 363 | 398 | 233 | 165 | 832 | 363 | 469 | 268 | 201 | 764 | 363 | 401 | 236 | 165 | | | |
| Rhein | 15,8 | 740 | 447 | 293 | 131 | 161 | 808 | 447 | 361 | 157 | 203 | 740 | 455 | 285 | 129 | 155 | | | |
| Rotbach | 2,3 | 760 | 419 | 341 | 148 | 148 | 832 | 419 | 413 | 173 | 240 | 765 | 401 | 364 | 156 | 208 | | | |
| Summe/Mittel Gesamtgebiet | 931,4 | 795 | 409 | 386 | 244 | 143 | 870 | 409 | 461 | 285 | 176 | 799 | 415 | 384 | 243 | 140 | | | |

Ansprechpartner

Jens Hasse
hasse@fiw.rwth-aachen.de

Birgit Wienert
wienert@fiw.rwth-aachen.de

Projektbüro *dynaklim*

Mozartstraße 4
45128 Essen

Tel.: +49 (0)201 104-33 38

www.dynaklim.de