Frank Herrmann, Lena Hübsch, Jörg Elbracht, Nicole Engel, Luise Keller, Ralf Kunkel, Udo Müller, Herbert Röhm, Harry Vereecken, Frank Wendland

Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen

Potential impact of climate change on groundwater recharge in the Federal State of Lower Saxony (Germany)

Die natürliche Klimavariabilität führt in Niedersachsen zu Schwankungen der Grundwasserneubildung auf unterschiedlichen Zeitskalen. Längerfristige Veränderungen des Klimas können die zeitlichen und räumlichen Muster der Grundwasserneubildung verändern. Vor diesem Hintergrund wurden mit einem Ensemble bestehend aus 3 IPCC-SRES-Emissionsszenarien, dem Globalen Klimamodell ECHAM5/MPI-OM, den zwei Regionalen Klimamodellen REMO und WETTREG2010 sowie dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA Projektionen bezüglich einer zukünftigen Entwicklung der Grundwasserneubildung in Niedersachsen durchgeführt. Es zeigte sich, dass mit Klimadaten des Regionalen Klimamodells REMO unabhängig von den ausgewählten Treibhausgasemissionsszenarien (B1, A1B, A2) eine Grundwasserneubildung projiziert wird, die auf dem derzeitigen Niveau oder leicht darüber liegt. Demgegenüber wird basierend auf Klimadaten des Regionalen Klimamodells WETTREG2010 eine deutliche Verringerung der Grundwasserneubildung projiziert. Derart divergente Ergebnisse erschweren die Entwicklung und Umsetzung von grundwasserwirtschaftlichen Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel auf Landesebene. Als Basis für konkrete wasserwirtschaftliche Planungen sollten mit Wasserhaushaltsmodellen projizierte Grundwasserneubildungshöhen zukünftiger Zeiträume erst verwendet werden, wenn die derzeit bestehenden Unsicherheiten in Regionalen Klimamodellen reduziert wurden.

Schlagwörter: Grundwasserneubildung, Klimawandel, Niedersachsen, mGROWA

In Lower Saxony, natural climate variability causes varying patterns of groundwater recharge on different time-scales. Long-term changes in climate may alter these spatio-temporal patterns. Against this background, an ensemble consisting of three IPCC-SRES emission scenarios, the global climate model ECHAM5/MPI-OM, the two regional climate models REMO and WETTREG2010, and the water balance model mGROWA were linked in order to project possible future development paths of groundwater recharge in the Federal State of Lower Saxony, Germany. The usage of data from the regional climate model REMO as climatic input resulted in projected groundwater recharge levels in the range of the present groundwater recharge level or slightly above, independently of the selected emission scenarios (B1, A1B, A2). In contrast, climate data from the regional climate model WETTREG2010 projected significantly reduced groundwater recharge levels. Such diverging results are not conducive to the development and implementation of adaptation measures to counteract climate induced changes in the groundwater budget at the federal state level. Against this background we suggest the use of projected groundwater recharge levels for specific local groundwater resources planning only after the uncertainty still prevailing in climate projections has been further reduced.

Keywords: groundwater recharge, climate change, Lower Saxony, mGROWA

1 Einführung

Die natürliche Erneuerung des Grundwassers erfolgt in Niedersachsen hauptsächlich durch diffuse niederschlagsinduzierte Grundwasserneubildung. Die Grundwasserneubildung ist maßgeblich abhängig vom regional vorherrschenden Klima, der Bodenbedeckung (Vegetation, versiegelte urbane Flächen, etc.) sowie den hydraulischen Eigenschaften der ungesättigten Zone (durchwurzelter Boden und Grundwasserdeckschichten) über dem Grundwasserleiter. Das Zusammenspiel von hydraulischen Bodeneigenschaften, Vegetation, Niederschlag und Verdunstung verursacht die Bildung von Abfluss. Die hydraulischen Eigenschaften der ungesättigten Zone und des Grundwasserleiters entscheiden darüber, in welchem Maße das abfließende Wasser als neues Grundwasser gespeichert und weitergeleitet werden kann. Das fast ubiquitär, jedoch in stark variablen Mengen im Untergrund vorhandene Grundwasser wird in Niedersachsen intensiv genutzt, hauptsächlich für die öffentliche Wasserversorgung sowie regional für die Feldbewässerung in der Landwirtschaft und durch die Industrie. Die genutzten Grundwassermengen sollen im langjährigen Mittel über mehrere Dekaden die periodisch neugebildeten Mengen nicht übersteigen, damit das Grundwasser als Ressource im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union (EU-WRRL, 2000) nachhaltig erhalten bleibt. Die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung im Bundesland Niedersachsen wurde deshalb bereits basierend auf speziell für diesen Einsatzweck konzipierten Modellen für unterschiedliche hydrologische Perioden hochaufgelöst berechnet (z. B. HERRMANN et al., 2013; JANKIEWICZ et al., 2005; KUNKEL et al., 2006; LEMKE und ELBRACHT, 2008; WENDLAND et al., 2003).

In nahezu allen Teilen der Welt beeinflusst die natürliche Klimavariabilität sowie der anthropogene Klimawandel die Erneuerung der Grundwasserressourcen (TAYLOR et al., 2012). Im Nordwesten der Bundesrepublik Deutschland führt die bestehende Klimavariabilität (SCHÖNWIESE und JANOSCHITZ, 2008; SCHÖNWIESE et al., 2004) zu Phasen verschieden intensiver Grundwasserneubildung (HERRMANN et al., 2009; HERRMANN et al., 2015; LINKE, 2010). Mehrere Studien haben nachgewiesen, dass sich die räumliche und zeitliche Verteilung von Niederschlag und Temperatur im Nordwesten Deutschlands bereits verändert haben (z. B. HABERLANDT et al., 2010; SCHLÜNZEN et al., 2010; SCHÖNWIESE et al., 2005; TRÖMEL und SCHÖNWIESE, 2007; TRÖMEL und SCHÖNWIESE, 2008; WERNER et al., 2008). In Niedersachsen

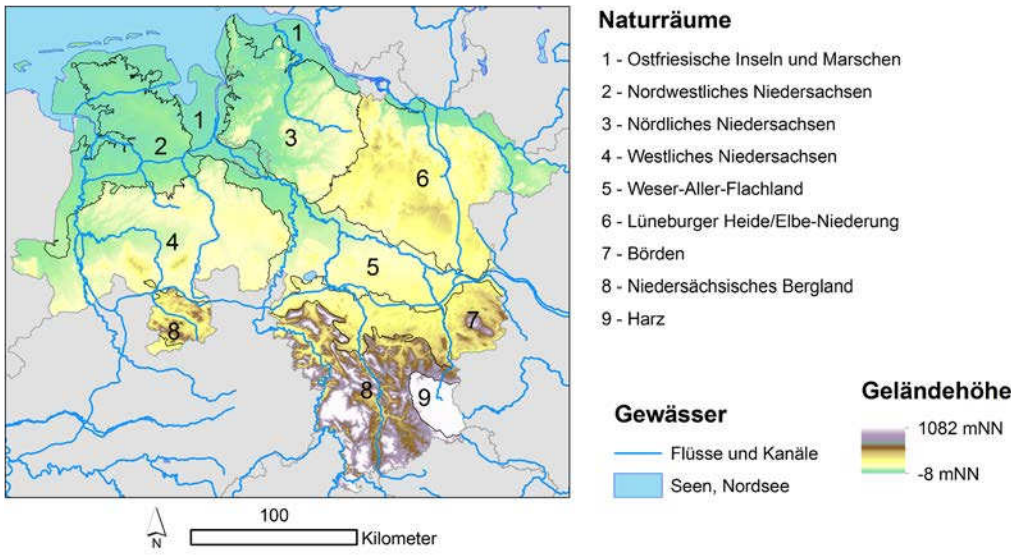

Abbildung 1
Naturräumliche Gliederung Niedersachsens (Quelle: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz; verändert).
Landscape units in Lower Saxony (Source: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz; modified).

haben sich diese Veränderungen bereits signifikant auf beobachtete Abflussstatistiken ausgewirkt (FANGMANN et al., 2013). Des Weiteren wird erwartet, dass zukünftig die Hochwasserabflüsse zunehmen (z. B. im Aller-Leine-Einzugsgebiet; WALLNER und HABERLANDT, 2015). Dies hat zur Folge, dass die in der Wasserwirtschaft häufig vorausgesetzte Konstanz von statistischen Kennzahlen zum Landschaftswasserhaushalt zunehmend in Frage gestellt wird (MERZ et al., 2012; MILLY et al., 2008). Um nun für die Zukunft belastbare wasserwirtschaftliche Planungsgrößen (Statistiken) zu gewinnen, wird im Rahmen sogenannter Impact-Modellierungen (z. B. HUANG et al., 2010; MENZEL et al., 2006) versucht, mögliche zukünftige Entwicklungspfade zu untersuchen (GROSS et al., 2011). Dabei werden die durch Regionale Klimamodelle (RCMs) in die Zukunft projizierten Klimagrößen als Antrieb für Wasserhaushaltsmodelle verwendet.

Projektionen des direkten Einflusses des Klimawandels auf die regionale Grundwasserneubildung im Rahmen der Impact-Modellierung mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen sind mit beträchtlichen Unsicherheiten verbunden. Die dominierende Quelle dieser Unsicherheiten liegt in den aus Globalen und Regionalen Klimamodellen abgeleiteten Klimaprojektionen, die typischerweise dieselben Treibhausgasemissionsszenarien (IPCC, 2007) in sehr unterschiedliche Klimaszenarien übersetzen (TAYLOR et al., 2012). Diese Klimaszenarien variieren insbesondere stark in der projizierten räumlichen und zeitlichen Verteilung des Niederschlages (BATES et al., 2008). Um allen bestehenden Unsicherheiten mehr oder weniger adäquat zu begegnen, wurden sogenannte Multimodel-Ensemble-Simulationen auch für die Impact-Modellierung vorgeschlagen, aus denen dann der konkrete Einfluss des Klimawandels auf lokale oder regionale Kenngrößen des Wasserhaushalts ermittelt werden soll (z. B. AJAMI et al., 2006; STOLL et al., 2011). Aus verschiedenen Emissionsszenarien, Globalen Klimamodellen, Regionalen Klimamodellen, Anfangszuständen und Realisierungen der Klimamodelle, Methoden zum Downscaling (z. B. MARKE et al., 2011) und zur BIAS-Korrektur (z. B. PIANI et al., 2010) sowie verschiedenen hydrologischen Modellkonzepten ergeben sich nur noch schwer zu überblickende Modellketten mit

Tabelle 1
Naturräume und bedeutende hydrogeologische Teilräume (Elbracht et al., 2016).
Landscape units and important aquifer systems.

Naturraum	Bedeutende hydrogeologische Teilräume
Ostfriesische Inseln und Marschen	Ostfriesische Inseln, Ostfriesische Marsch, Unterweser Marsch, Elbmarsch
Nordwestliches Niedersachsen	Oldenburgisch-Ostfriesische Geest, Hunte-Leda Moorniederung, Bourtanger Moorniederung
Nördliches Niedersachsen	Bederkesa Geest, Zevener Geest, Teil der Lüneburger Heide Geest West, Wümme-Niederung, Hamme-Moorniederung
Westliches Niedersachsen	Sögeler Geest, Cloppenburger Geest, Syker Geest, Böhrde Geest, Diepenauer Geest, Kellenberg Geest, Dammer Berge, Ankumer Höhe, Lingener Höhe, Itterbecker Geest, Ems-Vechte Niederung, Quakenbrücker Becken, Diepholzer Moorniederung und Rinne von Hille
Weser-Aller-Flachland	Mittelweser-Aller-Leine-Niederung, Nienburg-Neustädter Geest, Wedemark Geest, Burgdorfer Geest, Papenteich Geest
Lüneburger Heide/Elbe-Niederung	Lüneburger Heide Geest West und Ost, Altmark Colbitz-Letzlinger Heide, Elbe-Niederung
Börden	Hannoversche Moorgeest, Bückebergvorland, Braunschweig-Hildesheimer Lössbörde, Innerste Bergland und nördliches Harzvorland, Subherzyne Senke mit mehreren Teilräumen
Niedersächsisches Bergland	Ibbenbüren-Osnabrücker Bergland, Südliches Vorland des Wiehengebirges, Wiehengebirge, Hase-Else-Werre Talaue, Herforder Mulde Osning und Thieberg, Calenberger Vorland, Fulda-Werra-Bergland und Solling, Oberweser Talaue, Leinetalgraben, Buntsandsteinumrandung der Thüringischen Senke
Harz	Harz

einer großen Anzahl einzelner Simulationen und einer Bandbreite an zum Teil sehr unterschiedlichen Ergebnissen, die hinsichtlich der Ableitung von konkreten Anpassungsmaßnahmen für die Grundwasserwirtschaft nur noch schwer zu interpretieren sind. Bei einer Beschränkung auf ein überschaubares Teilensemble sind der Ermittlung von potentiellen Spannbreiten zukünftiger Grundwasserneubildungshöhen zwar Grenzen gesetzt, jedoch erlauben auf Teilensembles beruhende Analysen wichtige Erkenntnisse und Schlussfolgerungen hinsichtlich der regional unterschiedlich wirksamen Mechanismen von Klima-induzierten Veränderungen der Grundwasserneubildung.

Vor diesem Hintergrund sind die Ziele dieses Artikels: (1) Eine generelle Vorgehensweise bei der Modell-gestützten flächendifferenzierten Projektion einer möglichen zukünftigen Grundwasserneubildung vorzustellen, (2) die auf Basis einer Modellkette aus drei Treibhausgasemissionsszenarien, einem Globalen Klimamodell, zwei Regionalen Klimamodellen und dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA (HERRMANN et al., 2013; HERRMANN et al., 2015) projizierten Grundwasserneubildung zu dokumentieren, (3) die projizierten möglichen Veränderungen am Beispiel der Naturräume in Niedersachsen (Abbildung 1, Tabelle 1) qualitativ und quantitativ darzustellen und (4) die identifizierten regional unterschiedlich wirksamen Mechanismen Klima-induzierter Veränderungen der Grundwasserneubildung zu diskutieren.

Aus wasserwirtschaftlicher Perspektive interessant sind vor allem die langfristigen Schwankungsbereiche der Grundwasserneubildung innerhalb von (beispielsweise) hydrologischen 30-Jahres-Perioden, die langfristigen Tendenzen zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Perioden, sowie die räumlichen Muster dieser Schwankungen. Deshalb werden im Folgenden die Projektionsergebnisse für die zukünftigen Perioden 2011 - 2040, 2041 - 2070 und 2071 - 2100 aggregiert und die Veränderungen zur Periode 1971 - 2000 dargestellt. Die Änderungssignale werden in Bezug auf die mit mGROWA simulierte Grundwasserneubildung der Referenzperiode 1971 - 2000 (mGROWA-Referenzsimulation, beobachtetes Klima) interpretiert.

2 Modellkette und Simulationsmethodik zur Ermittlung einer möglichen zukünftigen Grundwasserneubildung in Niedersachsen

Eine mögliche zukünftige Grundwasserneubildung in Niedersachsen als projizierte hydrologische Größe wird erst am Ende einer langen Modellkette bestehend aus einem Treibhausgasemissionsszenario (TES), einem Globalen Klimamodell (GCM), einem Regionalen Klimamodell (RCM) und einem Wasserhaushaltsmodell (hier: mGROWA) berechnet. Für die Bundesrepublik Deutschland stellen die IPCC-SRES-Emissionsszenarien (IPCC, 2007) B1, A1B und A2 sowie das Globale Klimamodell ECHAM5/MPI-OM (JUNGCLAUS et al., 2006; ROECKNER et al., 2003) eine gegenwärtig häufig gewählte Kombination zur Projektion eines möglichen zukünftigen globalen Klimas dar. Die Emissionsszenarien B1, A1B und A2 repräsentieren dabei ein 21. Jahrhundert mit:

- moderat zunehmenden Treibhausgasemissionen bis zur Mitte des Jahrhunderts und danach einem starken Rückgang (B1),
- kontinuierlich zunehmenden Treibhausgasemissionen bis zur Mitte des Jahrhunderts und danach einen geringen Rückgang (A1B) und
- kontinuierlich zunehmenden Treibhausgasemissionen bis zum Ende des Jahrhunderts (A2).

Zusätzlich liegt eine Kontrollsimulation des historischen Klimas im 20. Jahrhundert (C20) mit dem GCM ECHAM5/MPI-OM vor. Diese wird genutzt, um ein Bezugsniveau für Änderungen des globalen Klimas zu ermitteln.

Aufgrund der geringen räumlichen Auflösung der GCM-Ergebnisse (z. B. horizontal 200 bis 300 km, JACOB et al., 2012) erfolgt innerhalb der Modellkette mit Hilfe der RCMs ein erstes sogenanntes Downscaling, d. h. die Übertragung der Klimasignale des GCM auf eine Ebene höherer räumlicher Auflösung. Im Rahmen der hier vorgestellten Studie wurden die Ergebnisse zweier grundlegend verschiedener RCM-Typen verwendet. Das Modell REMO ist ein dynamisches Regionales Klimamodell (JACOB et al., 2007; JACOB und PODZUN, 1997), welches direkt über die Modellränder von einem GCM angetrieben wird. Demgegenüber ist das Modell WETTREG2010 (KREIENKAMP et al., 2010; SPEKAT et al., 2010) ein statistischer Ansatz zum Downscaling, welcher klassifizierte atmosphärische Muster eines GCM als Basis nutzt, um für diese mit Hilfe eines Wettergenerators Klimazeitreihen an realen Klimastationen zu generieren.

Die Ergebnisse des RCM REMO sind über die CERA-Datenbank verfügbar (http://cera-www.dkrz.de/). In der hier vorgestellten Studie wurden die Ergebnisse der REMO-UBA Läufe verwendet (MPI i. A. des Umweltbundesamtes). Diese sind detailliert beschrieben in JACOB et al. (2008). Die WETTREG2010-Ergebnisse waren über das Programm IDP verfügbar (Meteo-Research Potsdam i. A. des Umweltbundesamtes). Für die Verwendung im letzten Glied der Modelkette (Impact-Modellierung) mussten die Ergebnisse der RCMs aufbereitet und in einem zweiten Downscaling-Schritt auf die Modellgeometrie des Wasserhaushaltsmodells mGROWA übertragen werden. Die Aufbereitung umfasste den Export der Niederschlags- und Klimawerte aus den jeweiligen Datenformaten der RCM-Ergebnisdateien sowie die Berechnung der potentiellen Verdunstung über Gras mit dem FAO Penman-Monteith Verfahren (ALLEN et al., 1998). Das Downscaling der REMO-Ergebnisse mit einer horizontalen Auflösung von ca. 10 km auf das 100 m Raster des Wasserhaushaltsmodells mGROWA wurde, wie von MARKE et al. (2011) vorgeschlagen, durch bilineare Interpolation realisiert. Die stationsbezogenen Klimawerte des RCM WETTREG2010 wurden mit dem CLINT-Interpolationsmodell (KUNKEL et al., 2012) auf das 100 m Raster übertragen.

Das Wasserhaushaltsmodel mGROWA wurde für die Bestimmung von Wasserhaushaltsvariablen inklusive Grundwasserneubildung in großen Gebieten (Bundesländern, Flussgebieten, etc.) unter gegenwärtigen und möglichen zukünftigen Klimabedingungen entwickelt. Im Bundesland Niedersachsen werden die mit mGROWA bestimmten flächendifferenzierten Grundwasserneubildungswerte gegenwärtig für wasserwirtschaftliche Planungszwecke verwendet (http://www.lbeg.niedersachsen.de/boden_grundwasser/grundwasser/grundwasserneubildung/grundwasserneubildung-618.html). Das Modell mGROWA und seine Anwendungsmöglichkeiten sind in mehreren Publikationen detailliert beschrieben worden (HERRMANN et al., 2013; HERRMANN et al., 2016), weshalb im Folgenden nur eine kurze Beschreibung der wesentlichen methodischen Merkmale erfolgt.

mGROWA ist ein rasterbasiertes flächendifferenziertes deterministisches Wasserhaushaltsmodell. Die räumliche Auflösung ist beliebig wählbar. In der vorliegenden Studie wurden die Simulationen auf einem 100 m Raster durchgeführt. Die Beschreibung

der hydrologisch relevanten Prozesse erfolgt auf Grundlage fundamentaler hydro- und thermodynamischer Gesetze. Zusätzlich ist das Modellkonzept jedoch auch um empirische Komponenten ergänzt worden. Die für Simulationen mit mGROWA verwendeten Datengrundlagen sowie die berechneten hydrologischen Größen sind schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Datengrundlagen (Abbildung 2, linke Spalte), speziell der für Niedersachsen verwendeten Flächendaten (Boden, Geologie, Topografie etc.), kann HERRMANN et al. (2013) entnommen werden.

Als Basisgrößen des Wasserhaushalts werden im ersten physikalisch-basierten Teil (Abbildung 2, mittlere Spalte) die Prozesse an der Erdoberfläche und in der durchwurzelten Bodenzone abgebildet. In täglicher Auflösung werden Bodenfeuchtedynamik, kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser, tatsächliche Evapotranspiration und Abflussbildung simuliert. Für die Berechnung der Bodenfeuchte- und Sickerwasserdynamik auf Standorten mit Vegetation wurde das Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell BOWAB (ENGEL et al., 2012) in mGROWA integriert. In diesem wird die Wasserhaushaltsgleichung gelöst. Die tatsächliche Evapotranspiration wird auf Basis der potentiellen Verdunstung über Gras (FAO Penman-Monteith, ALLEN et al., 1998), Landnutzungs-spezifischer Koeffizienten, einer topographischen Korrekturfunktion (aus KUNKEL und WENDLAND, 2002) sowie der Disse-Gleichung berechnet (zur Berücksichtigung der Abhängigkeit der Evapotranspiration von der Bodenfeuchte; DISSE, 1995). In Abhängigkeit von der Wasserspannung in der Wurzelzone wird für grundwasserbeeinflusste Böden dynamisch ein kapillarer Aufstieg berechnet, d. h. auf solchen Standorten wird eine Grundwasserzehrung bestimmt. Zusätzlich berechnet mGROWA die Wasserbilanz für versiegelte Standorte (z. B. in urbanen Räumen), vegetationslose Flächen und offene Wasserflächen mit jeweils an die charakteristischen Speicherfähigkeiten angepassten Verfahren. Auf Basis der simulierten Bodenfeuchtedynamik können mit mGROWA klimaabhängige Größen bilanziert werden (Abbildung 2, rechte Spalte), z. B. Dürrestatistiken und ein fruchtartenspezifischer Bewässerungsbedarf, die jedoch nicht im Fokus dieser Veröffentlichung stehen.

Die Separation des Gesamtabflusses in die Komponenten des Direktabflusses (Interflow, Drainageabfluss, Abfluss von urbanen Flächen, Oberflächenabfluss) und die Grundwasserneubildung (Zugang von infiltriertem Wasser durch den Sickerraum zum Grundwasser, DIN 4049-3) wird mit Hilfe von BFI-Werten (Verhältnis von Basisabfluss zu Gesamtabfluss) im empirisch geprägten Modellteil durchgeführt. Hinter diesem Konzept steht die Prämisse, dass im langjährigen Mittel Basisabfluss und Grundwasserneubildung eines Einzugsgebietes gleichgesetzt werden können, wenn der gesamte Grundwasservorrat des Gebietes im langjährigen Mittel unverändert bleibt. Durch BFI-Werte wird demnach ein konstant bleibender Anteil des Gesamtabflusses ausgedrückt, der die gesamte ungesättigte Zone durchsickert, d. h. den Grundwasserleiter erreicht und dadurch zu Grundwasserneubildung transformiert wird. BFI-Werte wurden in Europa bereits vielfach flächendifferenziert für charakteristische Gebietseigenschaften bestimmt (z. B. BLOOMFIELD et al., 2009; EHLERS et al., 2016; HABERLANDT et al., 2001; KUNKEL und WENDLAND, 2002; PANAGOPOULOS et al., 2015; TETZLAFF et al., 2015) und sind auch für Niedersachsen rasterbasiert verfügbar (WENDLAND et al., 2003).

Die Tabelle 2 listet die im Rahmen der Studie für die Projektion der Grundwasserneubildung verwendeten Kombinationen der Modellkette TES-GCM-RCM-mGROWA auf, d. h. das gesamte Ensemble mit einer simulierten Zeitspanne über die Wasserwirtschaftsjahre 1961 bis 2100. Für den REMO-Teil des Ensembles existiert eine separate Klimasimulation für die 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts, die im Folgenden als C20-REMO bezeichnet wird und als Bezugsniveau für die 3 REMO-Projektionen dient. Die WETTREG2010-Realisierungen basieren ebenfalls bis zum Modelljahr 2000 auf dem C20-Lauf des GCMs.

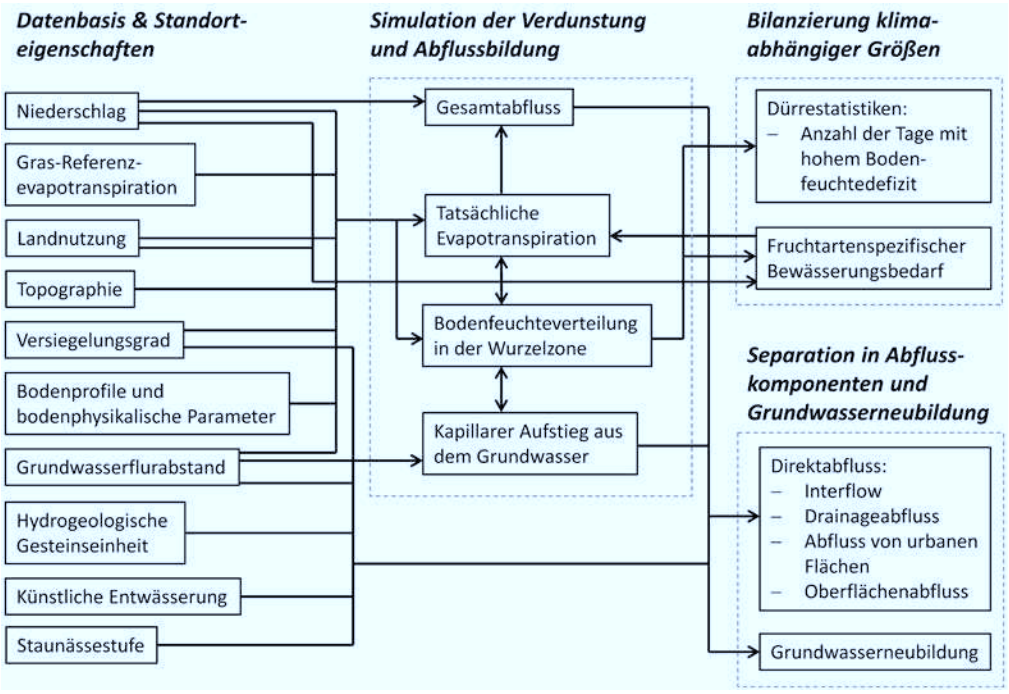

Abbildung 2
Datenbasis und generelles Schema des Modells mGROWA.
Data basis and general modelling scheme of the mGROWA model.

Klimaprojektionen sind prinzipiell nicht zeitpunktgenau, d. h. sie versuchen langjährige Klimastatistiken zu reproduzieren und nicht das Wettergeschehen an einem bestimmten Tag, auf dessen messtechnischer Dokumentation die mGROWA-Referenzsimulation basiert. Die Ergebnisse der beiden RCMs REMO und WETTREG2010 weisen in der Referenzperiode 1971 - 2000 gegenüber in Niedersachsen beobachteten Klimastatistiken zum Teil aber auch erhebliche systematische Abweichungen auf (siehe auch

Tabelle 2
Im Rahmen der Studie verwendete Kombinationen der Modellkette TES-GCM-RCM-mGROWA. (TES – Treibhausgasemissionsszenario; GCM – Globales Klimamodell; RCM – Regionales Klimamodell).
Combinations of the model chain TES-GCM-RCM-mGROWA. (TES – IPCC emission scenario; GCM – global climate model; RCM – regional climate model).

TES	GCM	RCM & Realisierung	Wasserhaushaltsmodel	Kurzbezeichnung der Kombination
B1	ECHAM5/MPI-OM	REMO UBA	mGROWA	B1-REMO
A1B	ECHAM5/MPI-OM	REMO UBA	mGROWA	A1B-REMO
A1B	ECHAM5/MPI-OM	WETTREG2010 R0	mGROWA	WETTREG2010-R0
A1B	ECHAM5/MPI-OM	WETTREG2010 R1	mGROWA	WETTREG2010-R1
A1B	ECHAM5/MPI-OM	WETTREG2010 R2	mGROWA	WETTREG2010-R2
A1B	ECHAM5/MPI-OM	WETTREG2010 R3	mGROWA	WETTREG2010-R3
A1B	ECHAM5/MPI-OM	WETTREG2010 R4	mGROWA	WETTREG2010-R4
A1B	ECHAM5/MPI-OM	WETTREG2010 R5	mGROWA	WETTREG2010-R5
A1B	ECHAM5/MPI-OM	WETTREG2010 R6	mGROWA	WETTREG2010-R6
A1B	ECHAM5/MPI-OM	WETTREG2010 R7	mGROWA	WETTREG2010-R7
A1B	ECHAM5/MPI-OM	WETTREG2010 R8	mGROWA	WETTREG2010-R8
A1B	ECHAM5/MPI-OM	WETTREG2010 R9	mGROWA	WETTREG2010-R9
A2	ECHAM5/MPI-OM	REMO UBA	mGROWA	A2-REMO

folgendes Kapitel). Diese Abweichungen werden als Bias bezeichnet und betreffen meist mehrere Kennzahlen der Klimastatistiken (Mittelwerte, Perzentile, etc.) verschiedener Klimagrößen (Niederschlag, Temperatur, Sonnenscheindauer, etc.), die für Projektionen des Wasserhaushalts relevant sind. PETRY et al. (2015) haben den Bias des RCM REMO in Teilen Niedersachsens und KUNKEL et al. (2012) den Bias des RCM WETTREG 2010 für ganz Niedersachsen detailliert dokumentiert. Es kann erwartet werden, dass ein Bias der Klimastatistiken der RCMs am Ende der Modelkette zu einem Bias der Grundwasserneubildungsstatistik führt.

Eine Bias-Korrektur der RCM-Ergebnisse wurde im Rahmen der hier dargestellten Studie jedoch nicht durchgeführt. Ausschlaggebend hierfür waren mehrere Gründe, die bereits von EHRET et al. (2012) ausführlich beschrieben wurden. Demnach verändern gängige Bias-Korrekturverfahren die raumzeitliche physikalische Konsistenz der RCM-Ergebnisse und vernachlässigen Rückkopplungseffekte weitgehend. Zudem bleibt unklar, ob die berechneten Korrekturparameter zeitinvariant sind. Außerdem kann eine Bias-Korrektur Einfluss auf das Trendverhalten haben (CHRISTENSEN et al., 2008), d. h. zu einer Vergrößerung oder Verkleinerung von Klimaänderungssignalen führen (DOSIO und PARUOLO, 2011). EHRET et al. (2012) kommen zu der Schlussfolgerung, dass Bias-Korrekturen von RCM-Ergebnissen eher dazu führen, die am Ende einer Modellkette bestehenden Unsicherheiten zu verschleiern, als sie zu reduzieren. Im Hinblick auf die Ziele dieser Studie, aufzuzeigen, welche Veränderungen der Grundwasserneubildung möglich erscheinen und die dahinterliegenden Mechanismen darzustellen, wurde auf eine Bias-Korrektur verzichtet. Folglich werden hier nur die projizierten langjährigen mittleren zeitlichen Veränderungen der Grundwasserneubildung (Änderungssignale) in Bezug auf das Referenzniveau analysiert.

Die im Folgenden dargestellten Werte der projizierten Grundwasserneubildung dienen vor diesem Hintergrund vor allem dem Aufzeigen von Tendenzen. Die Werte sollten nicht als absolutes Niveau einer zukünftigen Grundwasserneubildung interpretiert werden und dementsprechend aus den Werten keine Schlussfolgerungen für konkrete wasserwirtschaftliche Planungen gezogen werden. Außerdem wurden – bis auf die Klimainputgrößen – sämtliche Parameter des mGROWA-Setups über den gesamten Projektionszeitraum bis 2100 als stationär angesehen. Dementsprechend wurden beispielsweise keine Szenarien einer zukünftigen Landnutzungs- und Vegetationsentwicklung im mGROWA-Teil der Modellkette berücksichtigt. Solche Szenarien existieren derzeit für Niedersachsen nicht in einer in der Modelkette verwendbaren Form, sodass quasi der Einfluss eines möglichen Klimawandels auf die Grundwasserneubildung bei gegenwärtiger Landnutzung untersucht wird.

3 Projizierte Änderung des Niederschlags und der potentiellen Verdunstung über Gras in Niedersachsen

Eine kurze Analyse der vom Ensemble für Niedersachsen projizierten Veränderung der Klimagrößen Niederschlag und potentielle Verdunstung über Gras ist die Basis für eine Interpretation der projizierten Grundwasserneubildung. Die Abbildung 3 zeigt dazu die projizierten Zeitreihen der Jahres- und Halbjahressummen (Flächenmittel über ganz Niedersachsen) der Klimagrößen aller Ensemblemitglieder sowie die zugehörigen Zeitreihen des beobachteten Klimas der Vergangenheit (DWD-Referenz). Die Darstellungen verdeutlichen (1) die generelle Schwankungsbreite einzelner Ensembleteile, (2) die langfristigen Entwicklungstendenzen einzelner Ensemblemitglieder sowie (3) den Bias der projizierten Klimagrößen gegenüber dem Referenzniveau. Die Visualisierung der Schwankungsbreite erfolgt durch die Darstellung aller Jahres- oder Halbjahreswerte im Hintergrund in grau (10 WETTREG2010 Realisierungen), schwarz (3 REMO Realisierungen) und hellblau (DWD-Referenz). Diese Zeitreihen wurden mit einem Tiefpassfilter (15 Jahre Periode) geglättet, um die längerfristigen Tendenzen der einzelnen Ensemblemitglieder deutlicher herauszustellen. Sie sind im Vordergrund farbig als stärkere Linien dargestellt.

Das Niveau des Niederschlags und der potentiellen Verdunstung über Gras liegt in den WETTREG2010-Realisierungen ungefähr auf dem der DWD-Referenz. Im Gegensatz dazu weist die REMO-C20-Simulation einen größeren Bias des Niederschlagsniveaus auf, welcher jedoch im Winterhalbjahr geringer

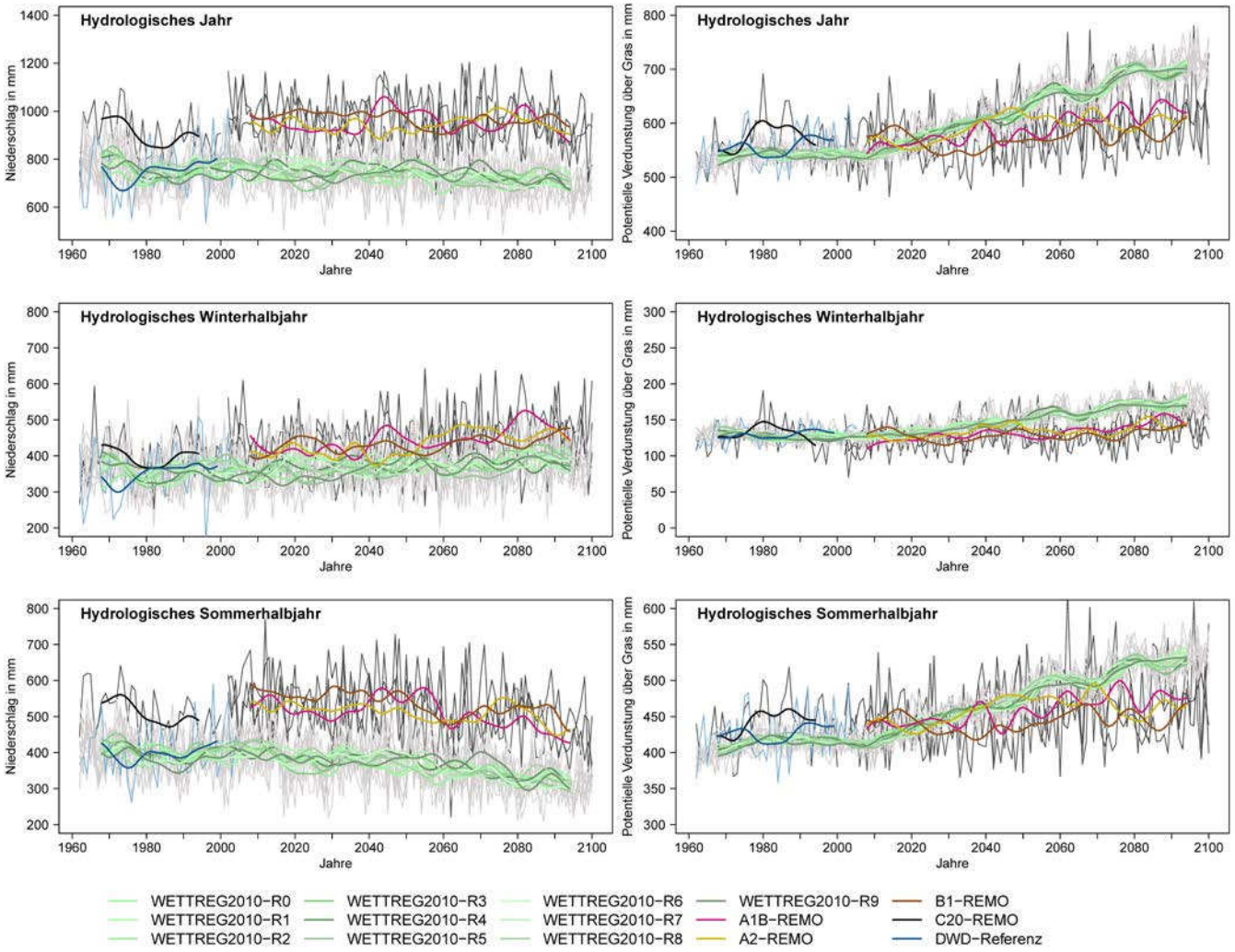

Abbildung 3
Vom Ensemble projizierte Niederschläge (linke Spalte) und Potentielle Verdunstung über Gras (rechte Spalte) im hydrologischen Jahr sowie den Halbjahren in Niedersachsen. In Grautönen sind die Jahreswerte aller Projektionen hinterlegt, um die tatsächliche Spannbreite der Ergebnisse zu illustrieren. Die farbigen Linien zeigen die zugehörigen Tiefpass-gefilterten Zeitreihen (15 Jahre Periode), um den Trend einzelner Projektionen zu visualisieren. Die blauen Linien zeigen die jährliche Variabilität der beobachteten Klimagrößen. Die hellblaue Linie zeigt die Jahreswerte, die dunkelblaue Linie die zugehörige Tiefpass-gefilterte Zeitreihe.
Projected precipitation and grass reference evapotranspiration in hydrological years and half-years in Lower Saxony. Grey background lines indicate the annual values of the whole ensemble in order to illustrate the total range of climate variables. Coloured lines show calculated low-pass-filter curves in order to show trends in individual projections. Blue lines indicate the annual variability of observed climate. The light blue curve shows annual values and the dark blue curve the associated low-pass-filtered time-series.

ausgeprägt ist als im Sommerhalbjahr. Der Bias des Niveaus der potentiellen Verdunstung über Gras ist in dieser Projektion ebenso im Sommer stärker ausgeprägt als im Winter, ist im Vergleich zum Niederschlagsbias jedoch geringer. Das gesamte Ensemble zeigt bis zum Jahr 2100 eine relativ gleichmäßige Tendenz zur Zunahme der Niederschläge im Winterhalbjahr und eine Abnahme der Niederschläge im Sommerhalbjahr, WETTREG2010- und REMO-Teil liegen dabei jedoch auf unterschiedlichem Niveau. Für die resultierenden Jahressummen des Niederschlags gleichen sich diese Tendenzen aus, sodass das Niveau des Jahresniederschlags relativ unverändert bleibt. Das Niveau der potentiellen Verdunstung über Gras steigt im gesamten Ensemble im Winter- wie auch im Sommerhalbjahr bis 2100 kontinuierlich an. Der Anstieg ist jedoch im WETTREG2010-Teil im Vergleich zum REMO-Teil des Ensembles deutlich stärker ausgeprägt. Der WETTREG2010-Teil projiziert einen deutlich stärkeren Anstieg des potentiellen Verdunstungsniveaus über Gras für die Sommerhalbjahre als für die Winterhalbjahre. Diese Tendenz ist im REMO-Teil auch erkennbar, jedoch schwächer ausgeprägt. Weitere Details der Abbildung 3 werden im folgenden Kapitel 4 im Zusammenhang mit der projizierten Grundwasserneubildung diskutiert.

4 Projizierte Änderungen der Grundwasserneubildung in Niedersachsen

Das Referenzniveau der Grundwasserneubildung für das beobachtete Klima der Periode 1971 - 2000 wurde mit mGROWA ermittelt und evaluiert (Abbildung 4). Für eine detaillierte Dokumentation sei auf HERRMANN et al. (2013) verwiesen.

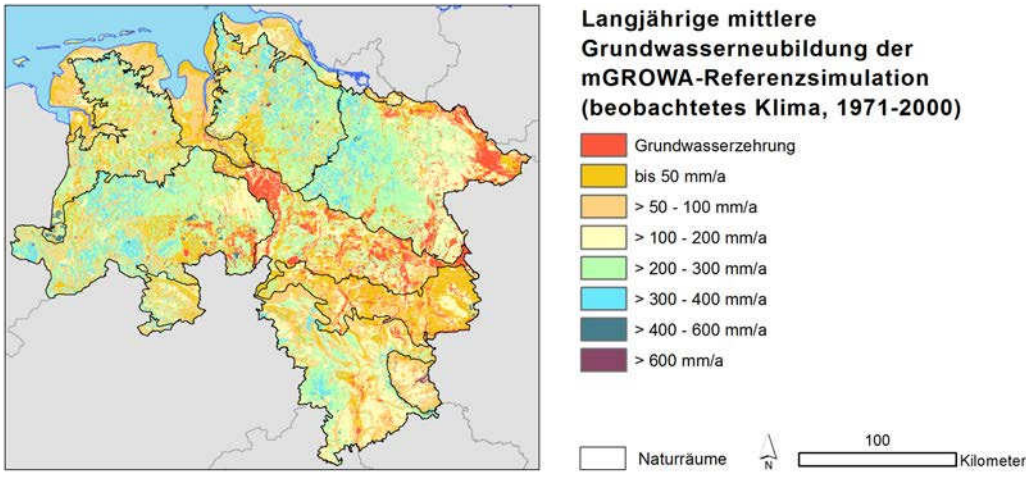

Abbildung 4
Langjährige mittlere Grundwasserneubildung der mGROWA-Referenzsimulation (beobachtetes Klima, 1971-2000) übernommen aus Herrmann et al. (2013). Namen der Naturräume in Abbildung 1.
Long-term mean annual groundwater recharge obtained from the mGROWA reference simulation (observed climate, 1971-2000) as determined by Herrmann et al. (2013). Designations of landscape units in Abbildung 1.

Wie Abbildung 4 zeigt, ist die räumliche Verteilung der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung in Niedersachsen sehr heterogen. Auf den grundwasserfernen Standorten im Tiefland liegt die langjährige mittlere Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von der Landnutzung in einer Spanne zwischen 100 und 300 mm/a. Im Bereich der Bördelandschaften verursachen die hohe Wasserspeicherkapazität der Böden und in südöstlicher Richtung eine zunehmende potentielle Verdunstung (zunehmende Kontinentalität) eine geringere Grundwasserneubildung. In den Mittelgebirgen wird die Grundwasserneubildung hauptsächlich durch die Gesteinseigenschaften determiniert. Im Harz findet um 100 mm/a Grundwasserneubildung statt, im Niedersächsischen Bergland zwischen 50 und 300 mm/a. Insbesondere auf den grundwassernahen Standorten in Elbe-, Weser- und Aller-Niederung existieren Grundwasserzehrgebiete, in denen im langjährigen Mittel netto keine Grundwasserneubildung stattfindet.

Das gesamte Ensemble TES-GCM-RCM-mGROWA liefert räumlich und zeitlich hochaufgelöste Grundwasserneubildungswerte (100 m Raster, Monatssummen) für mögliche Entwicklungspfade von 1961 bis 2100, die mit geeigneten Mitteln aufbereitet und visualisiert werden müssen. Aus wasserwirtschaftlicher Perspektive interessant sind dabei die zeitlichen Schwankungsbereiche der Grundwasserneubildung innerhalb hydrologischer 30-Jahres-Perioden, die langfristigen Tendenzen zwischen mehreren aufeinanderfolgenden 30-Jahres-Perioden, sowie die generellen räumlichen Muster dieser Schwankungen.

Die Abbildung 5 zeigt zunächst die Zeitreihen der projizierten jährlichen Grundwasserneubildung aller Ensemblemitglieder sowie der Referenzsimulation (mGROWA, beobachtetes Klima), räumlich aggregiert für die Naturräume Niedersachsens und das gesamte Bundesland. Die Darstellungen sind analog zu Abbildung 3 und verdeutlichen (1) die generelle Schwankungsbreite einzelner Ensembleteile, (2) die langfristigen Entwicklungstendenzen einzelner Ensemblemitglieder sowie (3) den regional unterschiedlichen Bias der projizierten Grundwasserneubildung gegenüber dem Referenzniveau. Die einzelnen Diagramme in Abbildung 5 weisen unterschiedlich skalierte Ordinaten-Achsen (Grundwasserneubildung) auf, um einerseits die regionalen Unterschiedliche und andererseits die Unterschiede in den einzelnen Entwicklungspfaden deutlich hervorzuheben.

Feststellen lässt sich als Erstes, dass die WETTREG2010-Realisierungen einen relativ geringen Unterschied gegenüber der Referenzsimulation aufweisen. Im Gegensatz dazu führt das Klima der REMO C20 Simulation in vielen Regionen zu einer Überschätzung der Grundwasserneubildung. Diese Überschätzung ist in den Küstenregionen sehr deutlich, wird jedoch im Landesinneren, insbesondere in den Mittelgebirgen, geringer. Die Schwankungsbreiten sind im 20. Jahrhundert bei allen Ensemblemitgliedern ähnlich ausgeprägt und entsprechen im Wesentlichen denen der Referenzsimulation. Das gesamte Ensemble wurde bis zum Modelljahr 2000 durch einen einzigen GCM-Lauf (C20 Kontrollsimulation, s. o.) angetrieben. Dies wird in den 1970er Jahren deutlich. Hier produzieren alle Ensemblemitglieder eine überdurchschnittliche Grundwasserneubildung (bezogen auf die 30-Jahres-Periode) wohingegen die Referenzsimulation die unterdurchschnittliche Grundwasserneubildung ergibt, die tatsächlich in dieser Dekade stattgefunden hat. Eine Dekade mit eher unterdurchschnittlicher Grundwasserneubildung wird dann vom gesamten Ensemble in die 1980er Jahre hinein verschoben simuliert, für die jedoch die Referenzsimulation eine eher überdurchschnittliche Grundwasserneubildung ergibt.

Die Interpretation der Entwicklungspfade bis zum Jahr 2100 sollte im Zusammenhang mit der Darstellung der räumlichen Verteilung der Veränderung der Grundwasserneubildung in Abbildung 6 erfolgen. Dargestellt sind hier die projizierten Veränderungen der Mittelwerte aus den drei 30-Jahres-Perioden 2011 - 2040, 2041 - 2070 und 2071 - 2100 gegenüber Periode 1971 - 2000 der jeweiligen C20-Kontrollläufen der RCM-mGROWA Kombinationen. Aufgrund desselben Treibhausgasemissionsszenarios und der tendenziell gleichgerichteten Entwicklung der WETTREG2010-mGROWA Projektionen, sind diese zu einem Ensemblemittel zusammengefasst dargestellt. Damit kann der gesamte WETTREG2010-Teil des Ensembles auch als ein einziger Entwicklungspfad angesehen werden.

Im WETTREG2010-Teil des Ensembles schwankt die Grundwasserneubildung bis ca. 2020 um ein relativ konstantes Niveau und zeigt danach bis zum Ende des Jahrhunderts, bei weitgehend unveränderter Schwankungsbreite, einen kontinuierlichen Trend zu geringerer Grundwasserneubildung. Diese Entwicklung wird mehr oder weniger stark ausgeprägt für alle Landesteile projiziert (Abbildung 6). KREIENKAMP et al. (2010) haben gezeigt, dass das

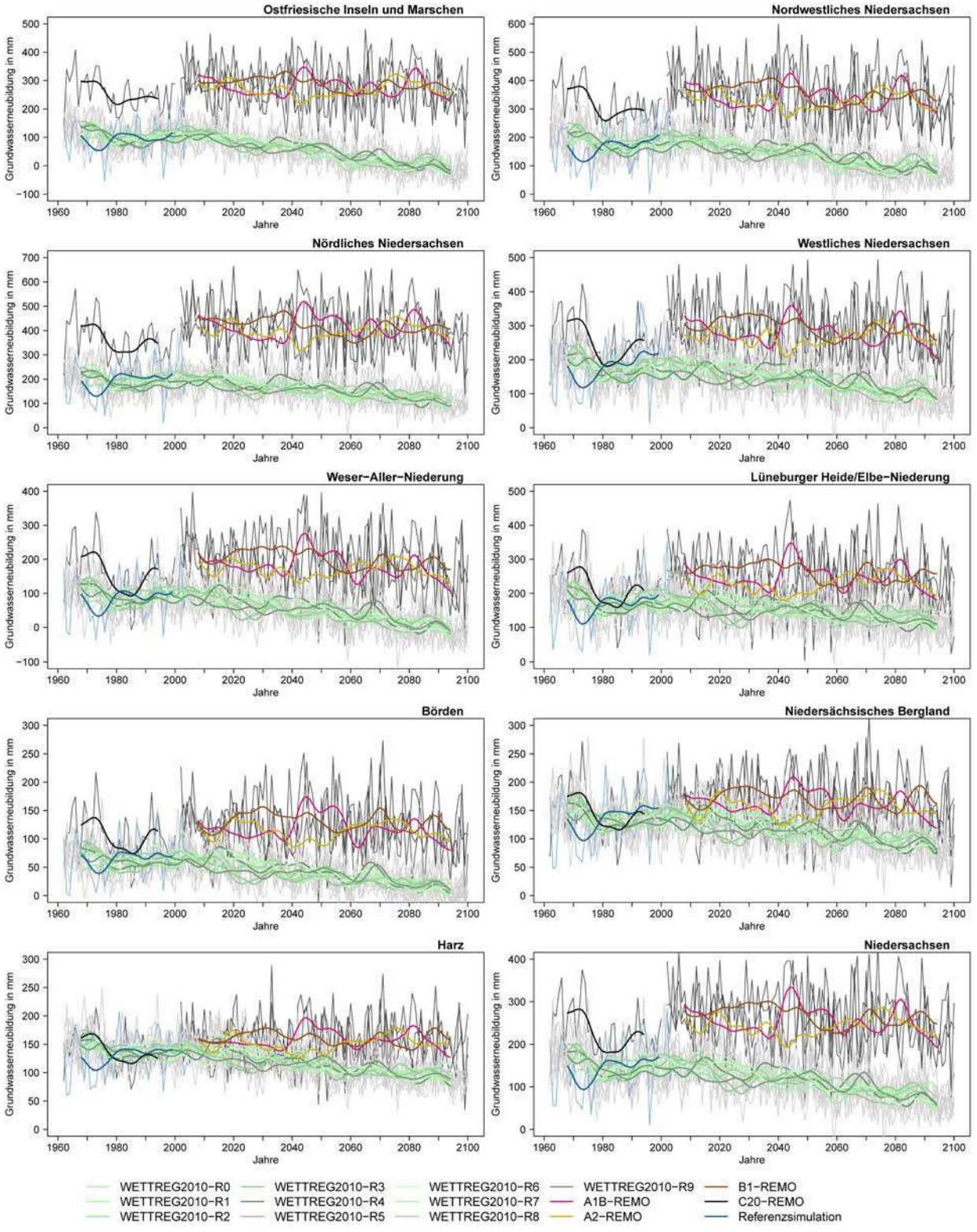

Abbildung 5
Vom Ensemble projizierte jährliche Grundwasserneubildung (Flächenmittel) in Niedersachsen und seinen naturräumlichen Regionen (Abbildung 1). In Grautönen sind die Jahreswerte aller Projektionen hinterlegt, um die tatsächliche Spannbreite der Ergebnisse zu illustrieren. Die farbigen Linien zeigen die zugehörigen Tiefpass-gefilterten Zeitreihen (15 Jahre Periode), um den Trend einzelner Projektionen zu visualisieren. Die blauen Linien zeigen die jährliche Variabilität der Grundwasserneubildung in der mGROWA-Referenzsimulation (beobachtetes Klima). Die hellblaue Linie zeigt die Jahreswerte, die dunkelblaue Linie die zugehörige Tiefpass-gefilterte Zeitreihe.
Projected annual groundwater recharge in the landscape units (Abbildung 1) of Lower Saxony. Grey background lines indicate the annual values of the whole ensemble in order to illustrate the total range of groundwater recharge. Coloured lines show calculated low-pass-filter curves in order to show trends in individual projections. Blue lines indicate the annual variability of groundwater recharge in the mGROWA reference simulation (observed climate). The light blue curve shows annual values and the dark blue curve the associated low-pass-filtered time-series.

RCM WETTREG 2010 für Niedersachsen für die fernere Zukunft (2071 - 2100) insgesamt ein schwaches Änderungsniveau des Niederschlags von ± 10 % bis maximal - 30 % für die Herbstmonate und von ± 10 % bis maximal + 30 % für die Wintermonate projiziert. Durch den kontinuierlichen Anstieg der Durchschnittstemperatur in diesen Jahreszeiten erhöht sich das Niveau der potentiellen Verdunstung. Dieses würde nicht im gleichen Maße durch höhere Niederschläge ausgeglichen werden und demzufolge würde sich die Grundwasserneubildung verringern.

Ursache für die räumliche Variabilität der Änderungen sind zusätzlich die Standorteigenschaften, die die in-situ Grundwasserneubildung maßgeblich beeinflussen. So nimmt in der Jahresbilanz die Grundwasserneubildung auf Standorten mit grundwasserbeeinflussten Böden, die ggf. zusätzlich drainiert sein können, stärker ab als auf Standorten ohne Grundwassereinfluss. Dies wird durch eine stärkere Grundwasserzehrung während der Sommermonate verursacht, welche wiederum durch geringere Sommerniederschläge und ein höheres potentielles Verdunstungsniveau begründet ist. Während der Wintermonate kann auf solchen Standorten jedoch die saisonale Grundwasserneubildung die erhöhte Grundwasserzehrung nicht ausgleichen, d. h. es verbleibt netto in der Jahresbilanz eine stärker verringerte Grundwasserneubildung als auf Standorten ohne Grundwassereinfluss. In den Darstellungen (Abbildung 5 u. Abbildung 6) weisen dann die Regionen mit einem hohen Anteil grundwasserbeeinflusster Standorte (z. B. die Weser-Aller-Niederung) auch eine betragsmäßig größere Abnahme der Grundwasserneubildung auf, als die Regionen mit vorwiegend grundwasserfernen Böden (z. B. die Lüneburger Heide-Geest).

In den drei REMO-mGROWA Projektionen werden neben dem Einfluss der Standortbedingungen auf die Änderung der Grundwasserneubildung auch die regional unterschiedlich projizierten Veränderungen im Niederschlagsregime deutlich (Abbildung 6). Tendenziell neigt das RCM REMO unabhängig vom zugrundeliegenden Treibhausgasemissionsszenario dazu, gegenüber dem RCM WETTREG2010 eine deutlichere Erhöhung der Niederschläge im Winterhalbjahr zu projizieren. Deutlich höhere Niederschläge im Winter führen, aufgrund eines in geringerem Maße gestiegenen Niveaus der potentiellen Verdunstung und von Wassergehalten im Boden, die sich meist auf dem Niveau der Feldkapazität befinden, sehr häufig direkt zu einer Erhöhung der saisonalen Grundwasserneubildung. JACOB et al. (2012) haben gezeigt, dass (auf Deutschland bezogen) das RCM REMO für die betrachteten drei Treibhausgasemissionsszenarien am Ende des Jahrhunderts eine Erhöhung der Winterniederschläge im Bereich von + 10 bis + 30% möglich erscheinen lässt. Bis dahin würde es jedoch auch Dekaden und 30-Jahres-Perioden mit einem Grundwasserneubildungsniveau geben, welches auf dem Niveau der Periode 1971 - 2000 und/oder regional leicht darunter oder darüber liegen könnte, z. B. REMO-UBA A2 in der Periode 2041 - 2070 und REMO-UBA A1B in der Periode 2071 - 2100. Insgesamt lässt sich feststellen, dass durch den REMO-Teil des Ensembles (1) im Vergleich zum WETTREG2010-Teil eine stärker schwankende jährliche Grundwasserneubildung projiziert wird (Abbildung 5), (2) keine ausgeprägte Tendenz zur Abnahme der Grundwasserneubildung besteht, vielmehr könnte sie sogar zunehmen, und (3) das heutige Grundwasserneubildungsniveau unabhängig vom Treibhausgasemissionsszenario in den meisten Regionen Niedersachsens mindestens erhalten bleiben würde.

Typischerweise findet der aus wasserwirtschaftlicher Perspektive bedeutende Hauptteil der Grundwasserneubildung im hydrologischen Winterhalbjahr statt. Für den Beginn der Neubildungsperiode im Herbst muss die durchwurzelte Bodenzone erstmal annähernd auf Feldkapazität aufgefüllt werden, dann kann nach Niederschlagsereignissen eine bedeutsame Sickerwasserbewegung einsetzen und ggf. Grundwasserneubildung. Die Dauer dieses Vorgangs des Speicherauffüllens und die dafür benötigten Wassermengen hängen von mehreren zeitlich variablen Faktoren ab: (1) dem Wassergehalt in der Wurzelzone am Ende des Sommers, (2) den Niederschlagsmengen und (3) dem potentiellen Verdunstungsniveau. In einzelnen Jahren können auch im Sommerhalbjahr günstige Bedingungen für Grundwasserneubildung bestehen, wenn nach Phasen mit andauernden starken Niederschlägen der Wassergehalt in der durchwurzelten Bodenzone auf Feldkapazität oder darüber hinaus ansteigt. Solche Ereignisse führen im langjährigen Mittel in entsprechenden Monaten zu einer geringen mittleren Grundwasserneubildung. Inwieweit der Vorgang des Speicherauffüllens und darauffolgende Neubildungsereignisse hinsichtlich ihres zeitlichen und mengenmäßigen Auftretens durch ein verändertes Klima beeinflusst werden, ist ebenfalls bedeutsam für die in der Jahresbilanz neugebildeten Grundwassermengen. Die Analyse der Veränderungen der mittleren monatlichen Grundwasserneubildung liefert diesbezüglich wichtige Hinweise. Im Hinblick auf den immanenten Bias der Projektionsergebnisse sollten die Änderungen des Jahresganges eher qualitativ als Verbesserung oder Verschlechterung der klimatischen Bedingungen für die Neubildung von Grundwasser interpretiert werden.

In Abbildung 7 sind die Änderungen der mittleren monatlichen Grundwasserneubildung in der Periode 2071 - 2100 gegenüber 1971 - 2000 für die Kombination A1B-REMO dargestellt. Deutlich wird, dass signifikant höhere Winterniederschläge, die ein höheres potentielles Verdunstungsniveau ausgleichen, sich auch in einer Erhöhung der Grundwasserneubildung widerspiegeln (Dezember und Januar). In den übrigen Wintermonaten würde sich die mittlere Grundwasserneubildung nicht wesentlich verändern. Im Küstenbereich wären bereits im Oktober die klimatischen Bedingungen für eine höhere Grundwasserneubildung gegeben. Während des Sommerhalbjahres verstärkt sich in den Regionen mit einem großen Anteil grundwasserbeeinflusster Böden die Grundwasserzehrung, wohingegen auf grundwasserfernen Standorten die Grundwasserneubildung relativ unverändert auf einem Niveau nahe Null verbleibt. Auf grundwasserfernen Standorten in den küstennahen Regionen würde die für September des Referenzzeitraums 1971 - 2000 simulierte geringe Grundwasserneubildung am Ende des 21. Jahrhunderts nicht mehr stattfinden, das bedeutet, auch in Jahren mit niederschlagsreicherem Sommer und Herbst würde sich der Beginn der Grundwasserneubildungsperiode verschieben.

Eine solche Verschiebung des Beginns der Grundwasserneubildungsperiode wird noch deutlicher in den in Abbildung 8 dargestellten Änderungen der Kombination WETTREG2010-R4 (2071 - 2100 gegenüber 1971 - 2000). Diese Kombination kann als repräsentativ für den gesamten WETTREG2010-Entwicklungspfad angesehen werden. Bis in den Dezember hinein würde in weiten Teilen Niedersachsens nur eine reduzierte Grundwasserneubildung stattfinden. Erst im Januar würden in einigen Regionen die höheren Winterniederschläge als Grundwasserneubildung wirksam. Ursache dafür ist, wie bereits oben diskutiert,

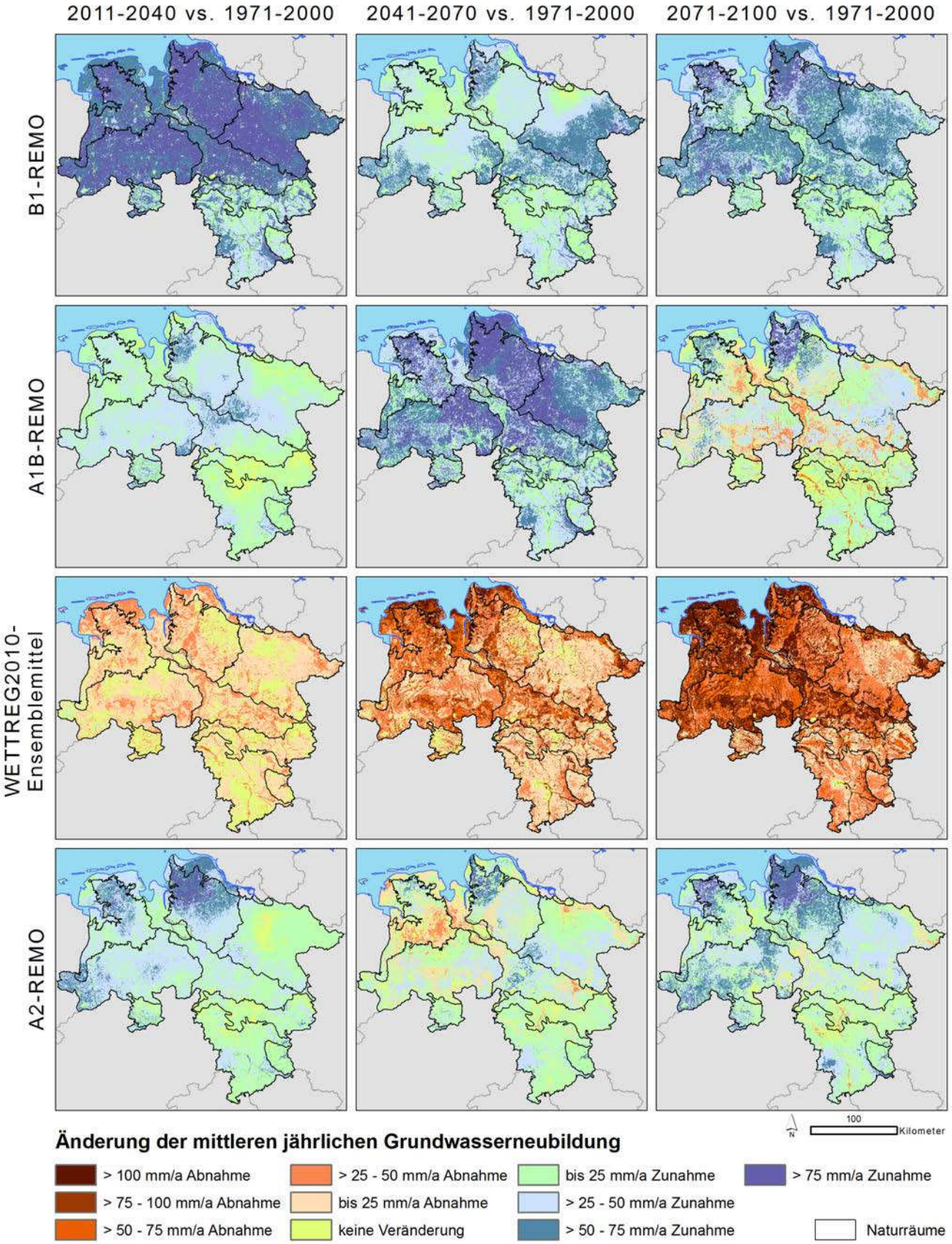

Abbildung 6
Vom Ensemble projizierte Änderungen der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung in den zukünftigen hydrologischen Perioden 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 gegenüber den zugehörigen C20-Kontrollläufen 1971-2000.
Projected change of long-term mean annual groundwater recharge in the future periods 2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100 compared to C20 control runs 1971-2000.

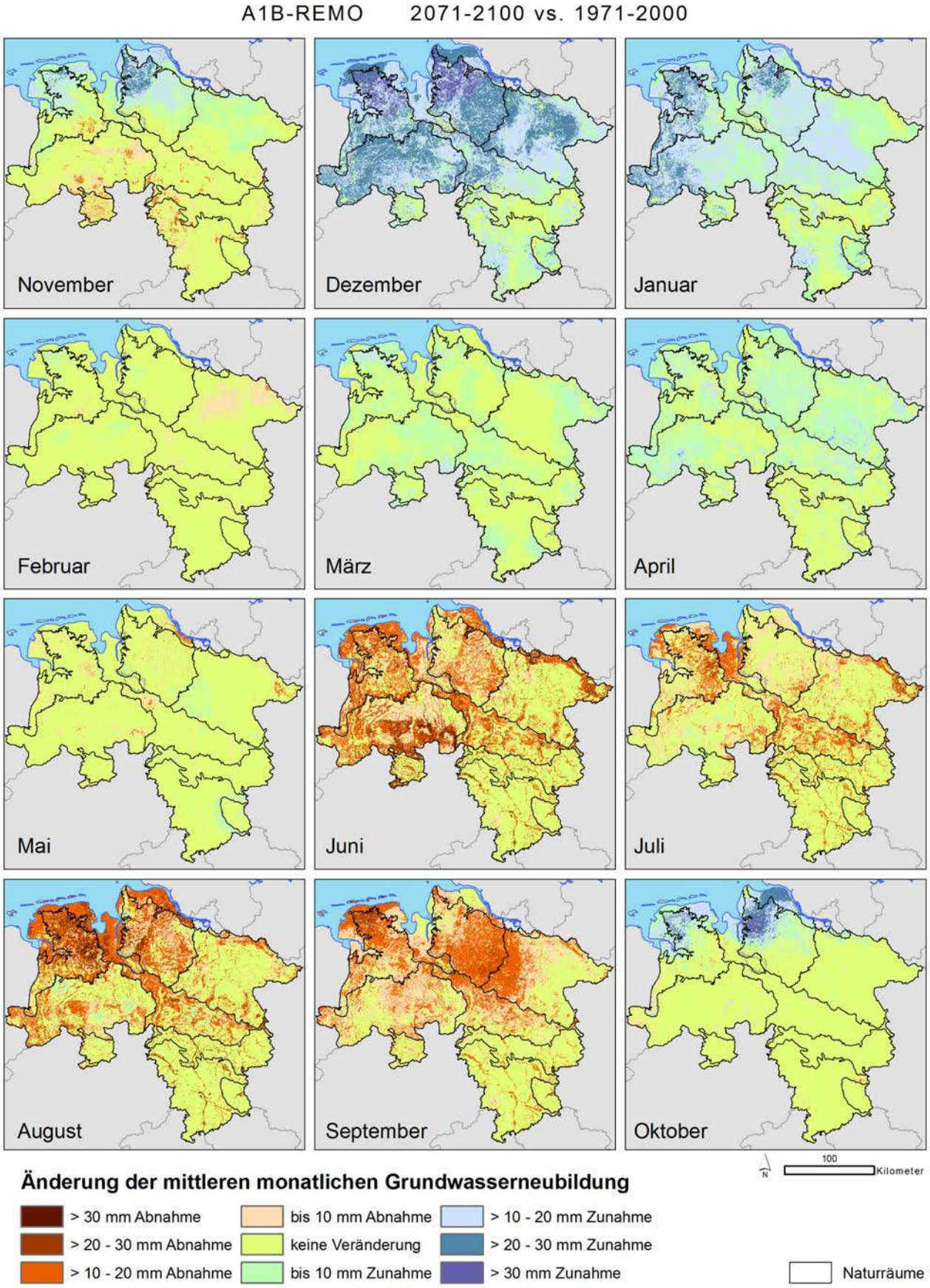

Abbildung 7
Mit der Kombination A1B-REMO projizierte Änderungen der mittleren monatlichen Grundwasserneubildung 2071-2100 gegenüber 1971-2000.
Projected change of mean monthly groundwater recharge 2071-2100 vs. 1971-2000 (combination A1B-REMO).

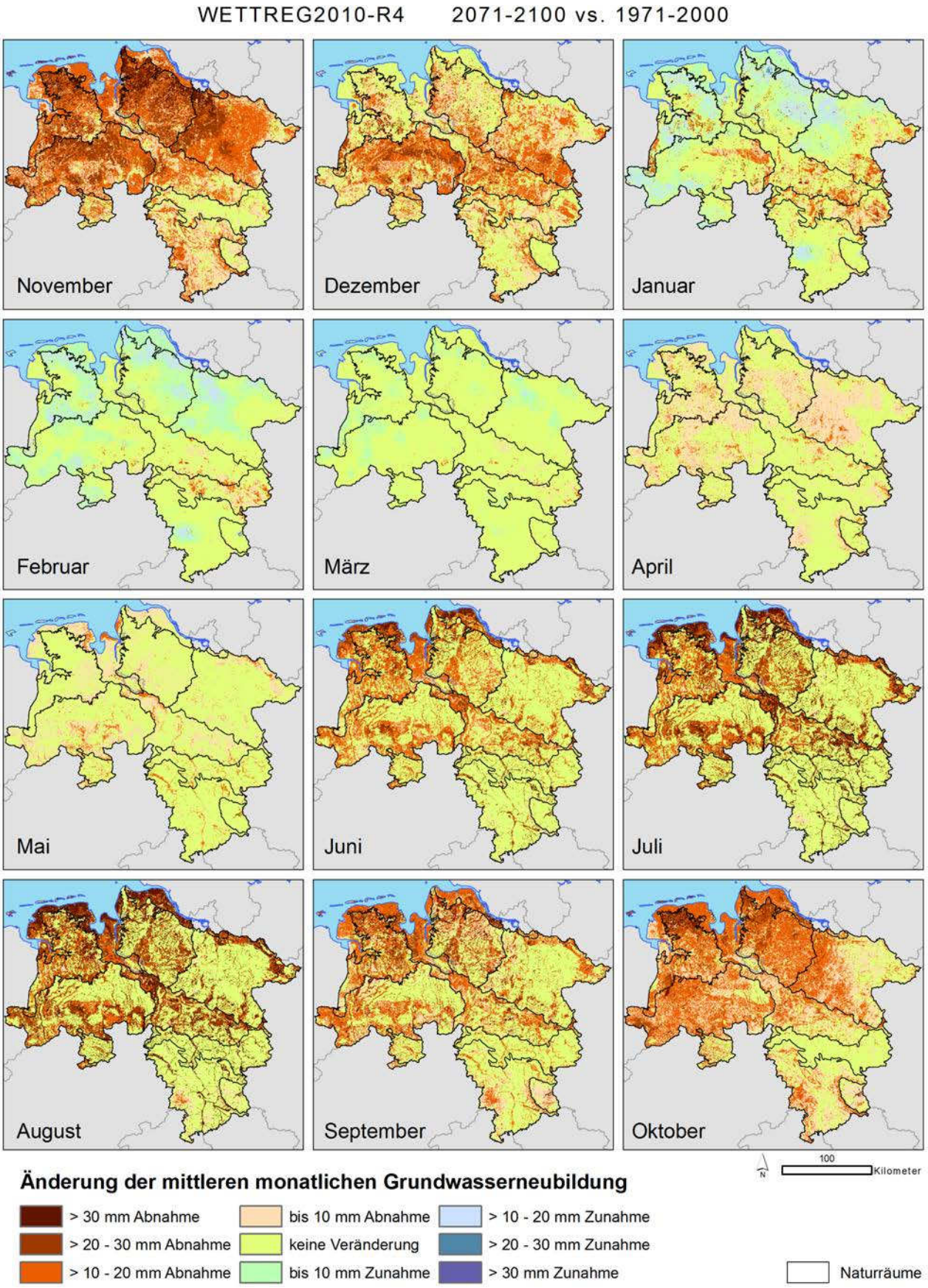

Abbildung 8
Mit der Kombination WETTREG2010-R4 projizierte Änderungen der mittleren monatlichen Grundwasserneubildung 2071-2100 gegenüber 1971-2000.
Projected change of mean monthly groundwater recharge 2071-2100 vs. 1971-2000 (combination WETTREG2010-R4).

das Zusammenspiel von Bodenwasserspeicher sowie zeitliche und räumliche Veränderungen von Niederschlagsmustern und potentiellem Verdunstungsniveau während des Herbstes. Dies wird insbesondere in Regionen deutlich, in denen die Böden im Wurzelraum eine sehr hohe nutzbare Feldkapazität aufweisen, wie zum Beispiel die Lößboden der Bördelandschaften nördlich der niedersächsischen Mittelgebirge (Abbildung 1, Nr. 7). Diese Böden weisen in der Wurzelzone am Ende des Sommers ein höheres aufzufüllendes Bodenfeuchtedefizit auf, als beispielsweise die sandigen Böden auf den Geestflächen und in der Lüneburger Heide. Im Oktober und November zeigt die Börderegion im Gegensatz zu vielen anderen Regionen keine Veränderung, weil das Neubildungsniveau noch nahe Null liegt und die Grundwasserneubildungsperiode aufgrund der langen Auffüllzeit des Bodenwasserspeichers auch bei gegenwärtigem Klima vergleichsweise spät einsetzt (vgl. HERRMANN et al., 2013). Auch während der Wintermonate würde auf vielen Standorten in den Bördelandschaften im mehrjährigen Mittel eine geringere Grundwasserneubildung stattfinden, weil sich in trockenen Winterhalbjahren die vollständige Auffüllung der Wurzelzone auf Feldkapazität bis in den Januar verzögert. Zusätzlich verstärkt wird dieser Effekt durch abnehmende Niederschläge und zunehmendes potentielles Verdunstungsniveau (zunehmende Kontinentalität) von der Nordseeküste in südöstliche Richtung. Die geringeren Niederschläge im April und ein eher einsetzender Frühling führen in der Kombination WETTREG2010-R4 zu einem früheren Ende der Grundwasserneubildungsperiode.

Für die zukünftigen Sommerhalbjahre projiziert WETTREG2010-R4 im Vergleich zu A1B-REMO einen stärkeren Rückgang der Niederschläge, was am Ende der Modellkette auf grundwasserbeeinflussten Standorten in einer stärkeren Grundwasserzehrung resultiert. In vielen Regionen Niedersachsens würde ein kleiner Zugewinn an Grundwasserneubildung in einzelnen Wintermonaten durch einen Anstieg der Grundwasserzehrung im Sommer sowie eine verkürzte Neubildungsperiode mehr als ausgeglichen werden und netto in der Jahresbilanz ein Rückgang resultieren.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die natürliche Klimavariabilität führt in Niedersachsen zu Schwankungen der Grundwasserneubildung auf unterschiedlichen Zeitskalen (Monate, Jahre, Dekaden). Längerfristige Veränderungen des Klimas können die zeitlichen und räumlichen Muster der Grundwasserneubildung verändern. Aus diesem Grund können statistische Kennzahlen zur Grundwasserneubildung, die für Klimabedingungen der jüngeren Vergangenheit berechnet wurden, nicht als unveränderlich angesehen werden und sollten trotz der großen Unsicherheiten auch für mögliche zukünftige Klimabedingungen abgeschätzt und auf Landesebene bei strategischen Überlegungen zum Grundwassermanagement berücksichtigt werden.

Vor diesem Hintergrund wurden mit einem Ensemble bestehend aus 3 IPCC-SRES-Emissionsszenarien, dem Globalen Klimamodell ECHAM5/MPI-OM, den zwei Regionalen Klimamodellen REMO und WETTREG2010 sowie dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA Projektionen bezüglich einer zukünftigen Entwicklung der Grundwasserneubildung in Niedersachsen durchgeführt. Aufgrund der derzeit bestehenden Unsicherheiten bei der Projektion zukünftigen Klimas sollten die projizierten Grundwasserneubildungshöhen noch nicht als Planungsbasis für konkrete lokale wasserwirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen genutzt werden. Vielmehr zeigen die Werte, in welchem Ausmaß der Klimawandel die Grundwasserbewirtschaftung langfristig vor neue Herausforderungen stellen kann.

Aufgrund des beschriebenen Einflusses des Wasserspeichervermögens der Böden und des potentiellen Verdunstungsniveaus auf die räumlichen, zeitlichen und mengenmäßigen Muster der Grundwasserneubildung sollten direkte Rückschlüsse aus projizierten Veränderungen der Winterniederschläge auf das Grundwasserneubildungsniveau vermieden werden. Auch wenn die Winterniederschläge eines RCM-Ensembles für sich genommen als robuste Projektion identifiziert werden, zum Beispiel mit der von PFEIFER et al. (2015) vorgeschlagenen Methodik, muss dies nicht zwingend auch für die Grundwasserneubildung gelten.

In Abbildung 6 wurde gezeigt, dass die durch das gesamte Ensemble projizierten Veränderungen der Grundwasserneubildung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber dem Referenzniveau (1971 - 2000) keine einheitliche Tendenz aufweisen. Der REMO-Teil des Ensembles neigt eher dazu, eine Grundwasserneubildung auf dem derzeitigen Niveau oder leicht darüber zu projizieren, wobei die verschiedenen Treibhausgasemissionsszenarien nicht zu grundlegend verschiedenen Entwicklungswegen führen. Demgegenüber projiziert der WETTREG2010-Teil eine deutliche Verringerung der Grundwasserneubildung. Zu den einzelnen dargestellten Entwicklungswegen sind derzeit keine Aussagen bezüglich der Wahrscheinlichkeiten ihres Eintretens möglich. Derart divergente Ergebnisse erschweren eine Entscheidungsfindung in Bezug auf die Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen an ein verändertes langjähriges Grundwasserneubildungsniveau.

Als strukturelle Maßnahme zur Milderung eines möglichen Rückgangs der Grundwasserneubildung wird beispielsweise ein Waldumbau zu Forstkulturen mit geringerem Verdunstungsniveau im Winterhalbjahr angesehen (DWA, 2011). Ebenso könnte – aus ausschließlicher wasserwirtschaftlicher Perspektive betrachtet – das partielle oder temporäre Schließen künstlicher Drainagesysteme in der Landwirtschaft einen Rückgang der Grundwasserneubildung lokal bremsen. Es ist naheliegend, dass Anpassungsmaßnahmen an ein verringertes Grundwasserneubildungsniveau als Erstes für die Sektoren mit den größten Anteilen an der Grundwassernutzung vorgeschlagen werden. Im Osten und Nordosten des Landes Niedersachsen ist die Bewässerungsfeldwirtschaft der größte Nutzer der regionalen Grundwasserressourcen. Auch diese genutzten Grundwassermengen müssen durch geeignete Modellansätze quantifiziert werden (HEIDT, 2009; KELLNER et al., 2012; RIEDIGER et al., 2016). Mit dem Modell mGROWA steht ein Simulationswerkzeug zur Verfügung, mit dem flächendeckend in großen Modellgebieten die Effekte verschiedener Szenarien von Anpassungs- und Milderungsmaßnahmen im Hinblick auf ein verändertes Grundwasserneubildungsniveau quantifiziert werden können (HERRMANN et al., 2014).

Um die weiterhin bestehenden Unsicherheiten in Bezug auf die zukünftige Grundwasserneubildung im Bundesland Niedersachsen zu reduzieren, sollten die hier vorgestellten Projektionen zukünftig auf Basis eines aktualisierten Ensembles wiederholt und erweitert werden. Dieses aktualisierte Ensemble könnte aus ausgewählten Teilen des EURO-CORDEX Ensembles Regionaler Klimamodelle (JACOB et al., 2014) bestehen, welches wiederum

auf einer neuen Generation von Szenarien des globalen Klimawandels basiert (MOSS et al., 2010). Die Robustheit der durch ein aktualisiertes und erweitertes GCM-RCM-mGROWA Ensemble projizierten Änderungssignale sollte dann mit einer einheitlichen Methodik überprüft werden.

Die projizierten Entwicklungswege der räumlichen Verteilung der Grundwasserneubildung sind in dieser Studie in erster Linie aus „Landesperspektive" dargestellt und diskutiert worden. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung (100 m Raster) können mGROWA-Ergebnisse jedoch prinzipiell auch für kleinräumige Klimaimpact-Analysen dienen. In diesem Rahmen können beispielsweise die Auswirkung von Extremjahren auf die lokale Grundwasserneubildung sowie die daraus für die lokale Grundwasserbewirtschaftung resultierenden Konsequenzen analysiert werden. Dies lag aber nicht im Fokus des vorliegenden Artikels, weshalb auf solche Art von Analysen verzichtet wurde.

Summary and conclusions

In Lower Saxony, natural climate variability causes varying patterns of groundwater recharge on different time-scales (months, years and decades). Long-term changes in climate may alter these spatio-temporal patterns. Consequently, groundwater recharge statistics determined for present climatic conditions cannot be assumed to be invariant and should therefore be estimated once again for possible future climatic conditions and taken into account in long-term strategic groundwater resources planning at the federal state level.

Against this background, an ensemble consisting of three IPCC-SRES emission scenarios, the global climate model ECHAM5/MPI-OM, the two regional climate models REMO and WETTREG2010, and the water balance model mGROWA were linked in order to project possible future developments of groundwater recharge in the Federal State of Lower Saxony, Germany. Due to the uncertainties inherent in current climate projections, the obtained groundwater recharge levels should not be used for specific medium-term local groundwater resources planning. Instead, the results show the extent to which climate change may pose new challenges for groundwater management.

Direct conclusions from the projected change in winter precipitation on the spatio-temporal patterns of future groundwater recharge should not been drawn, due to the significant influence of water storage capacity of soils and the changing level of reference evapotranspiration. Even if winter precipitation of the RCM-ensemble would have been identified as a robust projection, e.g. using the methods proposed by PFEIFER et al. (2015), this must not necessarily apply to groundwater recharge rates.

Figure 6 shows that the projected change in groundwater recharge in the whole ensemble doesn't exhibit a consistent trend until the end of the 21th century compared to the reference level (1971 - 2010). The REMO-part of the ensemble tends to project a groundwater recharge level comparable to the present level or slightly above respectively, independently of the selected emission scenarios (B1, A1B, A2). In contrast, the WETTREG2010-part of the ensemble showed significantly reduced groundwater recharge levels. Such diverging results are not conducive to the development and implementation of adaptation measures to counteract climate induced changes in the groundwater budget at the federal state level. Against this background we suggest the use of projected groundwater recharge levels for specific local groundwater resources planning only after the uncertainty still prevailing in climate projections has been further reduced.

Forest restructuring toward tree species, which transpire with a reduced rate during winter, is often suggested as a structural measure in order to mitigate the decrease in groundwater recharge (DWA, 2011). Likewise, from the water resources management perspective, the partial or temporary closing of artificial drainage systems in agriculture could mitigate the local decrease in groundwater recharge. It is self-evident that adaptation measures to a reduced groundwater recharge level are first of all suggested for the economic sectors whose share in groundwater consumption is highest. Irrigation agriculture, for example, is the user with the highest groundwater consumption from regional aquifers in the eastern and north-eastern parts of Lower Saxony. The groundwater quantities exploited by this sector should also be balanced using suitable modelling approaches (HEIDT, 2009; KELLNER et al., 2012; RIEDIGER et al., 2016). Using the mGROWA-model, the effects of adaptation or mitigation measures on groundwater recharge can be comprehensively evaluated at the federal state level (HERRMANN et al., 2014).

The repetition of this study using an extended and updated ensemble of RCMs in order to reduce the uncertainty concerning the future level of groundwater recharge in the Federal State of Lower Saxony is recommended. Such an updated ensemble could be composed by selected members of the EURO-CORDEX ensemble (JACOB et al., 2014) which is based on a new generation of scenarios of possible global climate change (MOSS et al., 2010). The robustness of the changing signals of such an extended GCM-RCM-mGROWA ensemble would then be evaluated using a consistent methodology.

Last but not least, we would like to point out that the projected spatio-temporal development of groundwater recharge has been analysed and discussed from a supra-regional, i.e. Federal State perspective. Due to the high spatial resolution (100 m grid), mGROWA results can in principle also be used for small-scale climate impact analyses. In this context, the impact of climatically extreme years on small-scale or even local groundwater recharge, as well as the consequences for the groundwater resources management may be assessed, respectively. This issue, however, is not the focus of this article, and related analyses have not been carried out.

Danksagung
Die Verfasser danken dem Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz für die finanzielle Förderung der dargestellten Forschungsarbeiten.

Anschriften der Verfasser
Dr. F. Herrmann
L. Keller
Dr. R. Kunkel
Prof. Dr. H. Vereecken
Prof. Dr. F. Wendland
Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Bio- und Geowissenschaften, IBG-3: Agrosphäre
Leo-Brandt-Straße, 52425 Jülich
f.herrmann@fz-juelich.de

L. Hübsch
Dr. J. Elbracht
N. Engel
Dr. U. Müller
H. Röhm
Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
Stilleweg 2, 30655 Hannover

L. Keller
Universität Bern, Geographisches Institut
Oeschger-Zentrum für Klimaforschung
Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern, Schweiz

6 Literaturangaben

AJAMI, N.K., DUAN, Q., GAO, X., SOROOSHIAN, S., (2006): Multimodel Combination Techniques for Analysis of Hydrological Simulations: Application to Distributed Model Intercomparison Project Results. - Journal of Hydrometeorology, 7(4): 755-768. DOI: 10.1175/jhm519.1

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.

BATES, B.C., KUNDZEWICZ, Z.W., WU, S., PALUTIKOF, J.P., (2008): Climate Change and Water - IPCC Secretariat, Geneva.

BLOOMFIELD, J.P., ALLEN, D.J., GRIFFITHS, K.J., (2009): Examining geological controls on baseflow index (BFI) using regression analysis: An illustration from the Thames Basin, UK. - Journal of Hydrology, 373(1-2): 164-176. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.04.025

CHRISTENSEN, J.H., BOBERG, F., CHRISTENSEN, O.B., LUCAS-PICHER, P., (2008): On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. - Geophysical Research Letters, 35(20). DOI: 10.1029/2008gl035694

DISSE, M., (1995): Modellierung der Verdunstung und der Grundwasserneubildung in ebenen Einzugsgebieten. - Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH).

DOSIO, A., PARUOLO, P., (2011): Bias correction of the ENSEMBLES high-resolution climate change projections for use by impact models: Evaluation on the present climate. - Journal of Geophysical Research, 116(D16). DOI: 10.1029/2011jd015934

DWA, (2011): Wirkung und Folgen möglicher Klimaänderungen auf den Grundwasserhaushalt. DWA-Themen. - T1/2011. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Hennef.

EHLERS, L., HERRMANN, F., BLASCHEK, M., DUTTMANN, R., WENDLAND, F., (2016): Sensitivity of mGROWA-simulated groundwater recharge to changes in soil and land use parameters in a Mediterranean environment and conclusions in view of ensemble-based climate impact simulations. - Science of The Total Environment, 543: 937-951. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.122

EHRET, U., ZEHE, E., WULFMEYER, V., WARRACH-SAGI, K., LIEBERT, J., (2012): Should we apply bias correction to global and regional climate model data? - Hydrology and Earth System Sciences, 16(9): 3391-3404. DOI: 10.5194/hess-16-3391-2012

ELBRACHT, J., MEYER, R., REUTTER, E., LINDER, B., MAI, C., (2016): Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen. - GeoBerichte - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 3: 3-118

ENGEL, N., MÜLLER, U., SCHÄFER, W., (2012): BOWAB - Ein Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell. - GeoBerichte - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 20: 85-98

FANGMANN, A., BELLI, A., HABERLANDT, U., (2013): Trends in beobachteten Abflusszeitreihen in Niedersachsen. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 57(5): 196-205. DOI: 10.5675/HyWa_2013,5_1

GROß, G., KRAUSE, A., LENSSEN, C., MÜLLER, U., BUTTLAR, C.v., KARPENSTEIN-MACHAN, M., BAUBÖCK, R., DRESSLER, D., LOEWEN, A., LESSMANN, D., MERSCH, I., FRICKE, E., WEIß, C., REICH, M., RODE, M., WIXWAT, T., RÖHM, H., FÜRSTENBERG, K., MATHEJA, A., MEINKEN, M., BEERMANN, B., (2011): Klimafolgenmanagement in der Metropolregion Hannover - Braunschweig - Göttingen. - GeoBerichte - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 18: 1-174

HABERLANDT, U., BELLI, A., HÖLSCHER, J., (2010): Trends in beobachteten Zeitreihen von Temperatur und Niederschlag in Niedersachsen. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 54(1): 28-36

HABERLANDT, U., KLÖCKING, B., KRYSANOVA, V., BECKER, A., (2001): Regionalisation of the base flow index from dynamically simulated flow components - a case study in the Elbe River Basin. - Journal of Hydrology, 248(1-4): 35-53. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00391-2

HEIDT, L., (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit Nordost-Niedersachsens. - GeoBerichte Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 13: 1-109

HERRMANN, F., CHEN, S., HEIDT, L., ELBRACHT, J., ENGEL, N., KUNKEL, R., MÜLLER, U., RÖHM, H., VEREECKEN, H., WENDLAND, F., (2013): Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Model mGROWA. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 57(5): 206-224. DOI: 10.5675/HyWa_2013,5_2

HERRMANN, F., CHEN, S., HÜBSCH, L., ENGEL, N., KUNKEL, R., MÜLLER, U., VEREECKEN, H., WENDLAND, F., (2014): Auswirkung von möglichen Klimaänderungen auf den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung in der Metropolregion Hamburg. In: Kaden, S., Dietrich, O., Theobald, S. (Eds.). - Wassermanagement im Klimawandel - Möglichkeiten und Grenzen von Anpassungsmanahmen. oekom Verlag.

HERRMANN, F., JAHNKE, C., JENN, F., KUNKEL, R., VOIGT, H.-J., VOIGT, J., WENDLAND, F., (2009): Groundwater recharge rates for regional groundwater modelling: a case study using GROWA in the Lower Rhine lignite mining area, Germany. - Hydrogeology Journal, 17(8): 2049-2060. DOI: 10.1007/s10040-009-0493-4

HERRMANN, F., KELLER, L., KUNKEL, R., VEREECKEN, H., WENDLAND, F., (2015): Determination of spatially differentiated water balance components including groundwater recharge on the Federal State level – A case study using the mGROWA model in North Rhine-Westphalia (Germany). - Journal of Hydrology: Regional Studies, 4: 294-312. DOI: 10.1016/j.ejrh.2015.06.018

HERRMANN, F., KUNKEL, R., OSTERMANN, U., VEREECKEN, H., WENDLAND, F., (2016): Projected impact of climate change on irrigation needs and groundwater resources in the metropolitan area of Hamburg (Germany). - Environmental Earth Sciences, 75(14). DOI: 10.1007/s12665-016-5904-y

HUANG, S., KRYSANOVA, V., ÖSTERLE, H., HATTERMANN, F.F., (2010): Simulation of spatiotemporal dynamics of water fluxes in Germany under climate change. - Hydrological Processes, 24(23): 3289-3306. DOI: 10.1002/hyp.7753

IPCC, (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A.(eds.)] - IPCC, Geneva, Switzerland.

JACOB, D., BÄRRING, L., CHRISTENSEN, O.B., CHRISTENSEN, J.H., DE CASTRO, M., DÉQUÉ, M., GIORGI, F., HAGEMANN, S., HIRSCHI, M., JONES, R., KJELLSTRÖM, E., LENDERINK, G., ROCKEL, B., SÁNCHEZ, E., SCHÄR, C., SENEVIRATNE, S.I., SOMOT, S., VAN ULDEN, A., VAN DEN HURK, B., (2007): An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. - Climatic Change, 81(S1): 31-52. DOI: 10.1007/s10584-006-9213-4

JACOB, D., BÜLOW, K., KOTOVA, L., MOSELEY, C., PETERSEN, J., RECHID, D., (2012): Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung - CSC Report 6, Climate Service Center, Germany.

JACOB, D., GÖTTEL, H., KOTLARSKI, S., LORENZ, P., SIECK, K., (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland - Umweltbundesamt.

JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O.B., BOUWER, L.M., BRAUN, A., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GEORGIEVSKI, G., GEORGOPOULOU, E., GOBIET, A., MENUT, L., NIKULIN, G., HAENSLER, A., HEMPELMANN, N., JONES, C., KEULER, K., KOVATS, S., KRÖNER, N., KOTLARSKI, S., KRIEGSMANN, A., MARTIN, E., MEIJGAARD, E., MOSELEY, C., PFEIFER, S., PREUSCHMANN, S., RADERMACHER, C., RADTKE, K., RECHID, D., ROUNSEVELL, M., SAMUELSSON, P., SOMOT, S., SOUSSANA, J.-F., TEICHMANN, C., VALENTINI, R., VAUTARD, R., WEBER, B., YIOU, P., (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. - Regional Environmental Change, 14(2): 563-578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2

JACOB, D., PODZUN, R., (1997): Sensitivity studies with the regional climate model REMO. - Meteorology and Atmospheric Physics, 63(1-2): 119-129. DOI: 10.1007/bf01025368

JANKIEWICZ, P., NEUMANN, J., DUIJNISVELD, W.H.M., WESSOLEK, G., WYCISK, P., HENNINGS, V., (2005): Abflusshöhe - Sickerwasserrate - Grundwasserneubildung - Drei Theme im Hydrologischen Atlas von Deutschland. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 49(1): 2-13

JUNGCLAUS, J.H., KEENLYSIDE, N., BOTZET, M., HAAK, H., LUO, J.J., LATIF, M., MAROTZKE, J., MIKOLAJEWICZ, U., ROECKNER, E., (2006): Ocean Circulation and Tropical Variability in the Coupled Model ECHAM5/MPI-OM. - Journal of Climate, 19(16): 3952-3972. DOI: 10.1175/jcli3827.1

KELLNER, U., MUßHOFF, O., BATTERMANN, H.W., (2012): The Economic Valuation of Irrigation under Consideration of Risk and Changes in Water Withdrawal Permits. - German Journal of Agricultural Economics, 61(1)

KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., ENKE, W., (2010): Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen - Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH.

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

KUNKEL, R., WENDLAND, F., (2002): The GROWA98 model for water balance analysis in large river basins - the river Elbe case study. - Journal of Hydrology, 259(1-4): 152-162. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00579-0

KUNKEL, R., WENDLAND, F., RÖHM, H., ELBRACHT, J., (2012): Das CLINT-Interpolationsmodell zur Regionalisierung von Klimadaten und WETTREG-Klimaprojektionen für Analysen zum regionalen Boden- und Grundwasserhaushalt in Niedersachsen und Bremen. - GeoBerichte - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 20: 6-31

LEMKE, D., ELBRACHT, J., (2008): Der Vergleich von Verfahren zur Grundwasserneubildung (Dörhöfer & Josopait, GROWA, GROWA06). - GeoBerichte - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 10: 1-61

LINKE, V., (2010): Einfluss des Klimas und der Landnutzung auf die Grundwasserneubildung im nördlichen Deistervorland (1938-2003). - GeoBerichte - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 16(1-73)

MARKE, T., MAUSER, W., PFEIFFER, A., ZÄNGL, G., (2011): A pragmatic approach for the downscaling and bias correction of regional climate simulations: evaluation in hydrological modeling. - Geoscientific Model Development, 4(3): 759-770. DOI: 10.5194/gmd-4-759-2011

MENZEL, L., THIEKEN, A.H., SCHWANDT, D., BÜRGER, G., (2006): Impact of Climate Change on the Regional Hydrology - Scenario-Based Modelling Studies in the German Rhine Catchment. - Natural Hazards, 38(1-2): 45-61. DOI: 10.1007/s11069-005-8599-z

MERZ, B., MAURER, T., KAISER, K., (2012): Wie gut können wir vergangene und zukünftige Veränderungen des Wasserhaushalts quantifizieren? - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 56(5): 244-256. DOI: 10.5675/HyWa_2012

MILLY, P.C.D., BETANCOURT, J., FALKENMARK, M., HIRSCH, R.M., KUNDZEWICZ, Z.W., LETTENMAIER, D.P., STOUFFER, R.J., (2008): Climate change. Stationarity is dead: whither water management? - Science, 319(5863): 573-574

MOSS, R.H., EDMONDS, J.A., HIBBARD, K.A., MANNING, M.R., ROSE, S.K., VAN VUUREN, D.P., CARTER, T.R., EMORI, S., KAINUMA, M., KRAM, T., MEEHL, G.A., MITCHELL, J.F.B., NAKICENOVIC, N., RIAHI, K., SMITH, S.J., STOUFFER, R.J., THOMSON, A.M., WEYANT, J.P., WILBANKS, T.J., (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. - Nature, 463(7282): 747-756. DOI: 10.1038/nature08823

PANAGOPOULOS, A., ARAMPATZIS, G., KUHR, P., KUNKEL, R., TZIRITIS, E., WENDLAND, F., (2015): Area-differentiated modeling of water balance in Pinios Basin, central Greece. - Global NEST Journal, 17(2): 221-235

PETRY, U., DIETRICH, J., FÖRSTER, K., WALLNER, M., BERNDT, C., MEON, G., HABERLANDT, U., (2015): Ein Ansatz zur Validierung von Klimamodelldaten als Basis für die Interpretation von wasserwirtschaftlichen Klimafolgenabschätzungen in Niedersachsen. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 59(4): 155–173. DOI: 10.5675/HyWa_2015,4_3

PFEIFER, S., BÜLOW, K., GOBIET, A., HÄNSLER, A., MUDELSEE, M., OTTO, J., RECHID, D., TEICHMANN, C., JACOB, D., (2015): Robustness of Ensemble Climate Projections Analyzed with Climate Signal Maps: Seasonal and Extreme Precipitation for Germany. - Atmosphere, 6(5): 677-698. DOI: 10.3390/atmos6050677

PIANI, C., HAERTER, J.O., COPPOLA, E., (2010): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. - Theoretical and Applied Climatology, 99(1-2): 187-192

RIEDIGER, J., BRECKLING, B., SVOBODA, N., SCHRÖDER, W., (2016): Modelling regional variability of irrigation requirements due to climate change in Northern Germany. - Science of The Total Environment, 541: 329-340. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.043

ROECKNER, E., BÄUML, G., BONAVENTURA, L., BROKOPF, R., ESCH, M., GIORGETTA, M., HAGEMANN, S., KIRCHNER, I., KORNBLUEH, L., MANZINI, E., RHODIN, A., SCHLESE, U., SCHULZWEIDA, U., TOMPKINS, A., (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description. 349 - Max-Planck-Institut für Meteorologie.

SCHLÜNZEN, K.H., HOFFMANN, P., ROSENHAGEN, G., RIECKE, W., (2010): Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. - International Journal of Climatology, 30(8): 1121-1136. DOI: 10.1002/joc.1968

SCHÖNWIESE, C.-D., JANOSCHITZ, R., (2008): Klima-Trendatlas Deutschland 1901-2000. 4 - Instituts für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt/Main.

SCHÖNWIESE, C.-D., STAEGER, T., TRÖMEL, S., (2005): Klimastatusbericht 2005. -. DWD, pp. 7-17.

SCHÖNWIESE, C.D., STAEGER, T., TRÖMEL, S., (2004): The hot summer 2003 in Germany. Some preliminary results of a statistical time series analysis. - Meteorologische Zeitschrift, 13(4): 323-327. DOI: 10.1127/0941-2948/2004/0013-0323

SPEKAT, A., KREIENKAMP, F., ENKE, W., (2010): An impact-oriented classification method for atmospheric patterns. - Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 35(9-12): 352-359. DOI: 10.1016/j.pce.2010.03.042

STOLL, S., HENDRICKS FRANSSEN, H.J., BUTTS, M., KINZELBACH, W., (2011): Analysis of the impact of climate change on groundwater related hydrological fluxes: a multi-model approach including different downscaling methods. - Hydrology and Earth System Sciences, 15(1): 21-38. DOI: 10.5194/hess-15-21-2011

TAYLOR, R.G., SCANLON, B., DÖLL, P., RODELL, M., VAN BEEK, R., WADA, Y., LONGUEVERGNE, L., LEBLANC, M., FAMIGLIETTI, J.S., EDMUNDS, M., KONIKOW, L., GREEN, T.R., CHEN, J., TANIGUCHI, M., BIERKENS, M.F.P., MACDONALD, A., FAN, Y., MAXWELL, R.M., YECHIELI, Y., GURDAK, J.J., ALLEN, D.M., SHAMSUDDUHA, M., HISCOCK, K., YEH, P.J.F., HOLMAN, I., TREIDEL, H., (2012): Ground water and climate change. - Nature Climate Change, 3(4): 322-329. DOI: 10.1038/nclimate1744

TETZLAFF, B., ANDJELOV, M., KUHR, P., UHAN, J., WENDLAND, F., (2015): Model-based assessment of groundwater recharge in Slovenia. - Environmental Earth Sciences, 74(7): 6177-6192. DOI: 10.1007/s12665-015-4639-5

TRÖMEL, S., SCHÖNWIESE, C.D., (2007): Probability change of extreme precipitation observed from 1901 to 2000 in Germany. - Theoretical and Applied Climatology, 87(1-4): 29-39. DOI: 10.1007/s00704-005-0230-4

TRÖMEL, S., SCHÖNWIESE, C.D., (2008): Robust trend estimation of observed German precipitation. - Theoretical and Applied Climatology, 93(1-2): 107-115. DOI: 10.1007/s00704-007-0341-1

WALLNER, M., HABERLANDT, U., (2015): Klimabedingte Änderung von Hochwasserabflüssen im Aller-Leine-Einzugsgebiet – eine Fallstudie mit HBV-IWW. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 59(4): 174–183. DOI: 10.5675/HyWa_2015,4_4

WENDLAND, F., KUNKEL, R., TETZLAFF, B., DÖRHÖFER, G., (2003): GIS-based determination of the mean long-term groundwater recharge in Lower Saxony. - Environmental Geology, 45(2): 273-278. DOI: 10.1007/s00254-003-0879-x

WERNER, P.C., GERSTENGARBE, F.-W., WECHSUNG, F., (2008): Großwetterlagen and precipitation trends in the Elbe river catchment. - Meteorologische Zeitschrift, 17(1): 61-66. DOI: 10.1127/0941-2948/2008/0263