



Kooperationsprojekt GROWA+ NRW 2021 Teil IX

Projektionen der Grundwasserneubildung unter dem Einfluss des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA und dem Regionalen Klimaprojektionen Ensemble (ReKliEs) für Deutschland

[LANUV-Fachbericht 110](#)

Kooperationsprojekt GROWA+ NRW 2021

Teil IX

Projektionen der Grundwasserneubildung unter dem Einfluss des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA und dem Regionalen Klimaprojektionen Ensemble (ReKliEs) für Deutschland

[LANUV-Fachbericht 110](#)

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Recklinghausen 2021

IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0 Telefax 02361 305-3215 E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de
Autoren	Frank Hermann, Tim Wolters & Frank Wendland (FZ Jülich) Forschungszentrum Jülich, Institut für Bio- und Geowissenschaften (IBG-3: Agrosphäre), 52425 Jülich, Tel.: 02461 61-0, E-Mail: info@fz-juelich.de
Titelbild	Fotolia/Countrypixel
Stand	August 2021
ISSN	1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachbericht
Informationsdienste	Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter • www.lanuv.nrw.de Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im • WDR-Videotext
Bereitschaftsdienst	Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV (24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
1 Einführung	5
2 Methodik.....	8
2.1 Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA	8
2.1.1 Klimaprojektionen	8
2.1.2 Bias-Korrektur und Downscaling der Klimaprojektionen.....	12
2.1.3 Das Wasserhaushaltsmodell mGROWA.....	13
2.1.4 Räumliche Zusatzinformationen für Interpretationszwecke	15
2.2 Kennzahlen zur Bewertung des Rest-Bias der Grundwasserneubildung.....	19
2.3 Methodik der Trendanalyse und des Tests auf Robustheit.....	22
3 Ergebnisse aus der Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA.....	26
3.1 Rest-Bias der Grundwasserneubildung in der projizierten historischen Referenzperiode	26
3.2 Projizierte Änderung der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung	34
3.3 Trends in den projizierten Zeitreihen der Grundwasserneubildung – Steckbriefe für die hydrogeologischen Großlandschaften NRW's	41
3.4 Regional differenzierte Bewertung der Robustheit der Änderungssignale der Grundwasserneubildung	45
3.5 Analyse zur „Grundwasserdürre“	48
4 Trendanalyse für die beobachtete Vergangenheit 1961 bis 2020.....	50
5 Zusammenfassung	57
6 Kurzzusammenfassung	61
7 Literaturverzeichnis.....	62

1 Einführung

In den vergangenen 10 Jahren wurde in nahezu allen Regionen Nordrhein-Westfalens (NRW) ein anhaltender Trend fallender Grundwasserstände beobachtet, welcher im Herbst 2019 in historischen Tiefstständen des Grundwassers mündete. Parallel dazu fiel die Grundwasserneubildung niedriger aus, als im langjährigen Mittel der Periode 1981 – 2010 (Herrmann et al., 2020). Als Erklärung dafür wird eine Überlagerung natürlicher Klimavariabilität mit den bereits beobachtbaren Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels vermutet. Mit dem EURO-CORDEX-Ensemble (Jacob et al., 2014) wurde im Mittel für NRW bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der Periode 1971 – 2000 ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur im Bereich zwischen 1,5 und 4,3 °C sowie eine Zunahme der Jahresniederschläge im Bereich zwischen 1 und 25 % projiziert (LANUV, o.J.). Die Veränderungen in den Temperatur- und Niederschlagsverteilungen werden wahrscheinlich saisonal und auch regional unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Damit stellt sich die Frage, ob sich der Klimawandel negativ auf den Grundwasserhaushalt und damit auf das Grundwasserdargebot auswirken könnte, was zu Anpassungen in der Grundwasserbewirtschaftung führen müsste, um eine Übernutzung der Ressource zu verhindern. Insbesondere ein langfristiger flächendeckender Rückgang der Grundwasserneubildung würde für einige Regionen des Landes ein verändertes Nutzungsregime notwendig erscheinen lassen, damit dort die Grundwasserressourcen erhalten bleiben.

Die zukünftige Konstanz statistischer Kennzahlen zum Landschaftswasserhaushalt wird schon seit längerer Zeit in Frage gestellt (z.B. Milly et al., 2008). Vor diesem Hintergrund würde es auch für die Grundwasserbewirtschaftungsplanung in NRW nicht mehr ausreichen, nur den Status Quo fortzuführen, z.B. durch periodische Aktualisierungen bei der Grundwasserneubildungsermittlung. Vielmehr müssen belastbare, statistisch abgesicherte Szenarien und Modellketten entwickelt werden, welche die Schaffung einer Datenbasis zur quantitativen Entwicklung des Wasserhaushalts und damit der Grundwasserressourcen zum Ziel haben (Merz et al., 2012). Dazu sollten Modelle eingesetzt werden, welche die Grundwasserneubildung nicht lediglich in ein lineares Verhältnis zum Niederschlag setzen, sondern in starkem Maße in Abhängigkeit von vorhandenem Bodenwasser und zeitlicher Verteilung der Niederschläge berechnen (Himmelsbach et al., 2018). Zur Schaffung einer solchen Datenbasis ist die Projektion der Grundwasserneubildung mit Hilfe eines Multi-Modell-Ensembles bestehend aus globalen Emissionsszenarien, globalen und regionalen Klimamodellen sowie eines hydro(geo)logischen Impakt-Modells das gegenwärtige Mittel der Wahl (Holman et al., 2012). Dieser Ansatz ist in der Vergangenheit bereits in einer Vielzahl hydrologischer Studien und bundesdeutschen Regionen verfolgt worden (z.B. Hattermann et al., 2015; Huang et al., 2010; Menzel et al., 2006). Für Deutschland sollten auf Ebene der Bundesländer Schlussfolgerungen aus derartigen Studien im Hinblick auf aktuell als verlässlich eingestufte Klimaprojektionen kontinuierlich überprüft werden (Scheihing, 2019).

Im Rahmen der in diesem Teilbericht dokumentierten Studie sollten mögliche zukünftige Veränderungen der räumlichen und zeitlichen Muster der Grundwasserneubildung in NRW untersucht werden. Dazu sollten Projektionen mit einem Multi-Modell-Ensemble sowie statistische Analysen der projizierten Änderungssignale der Grundwasserneubildung durchgeführt werden. Als hydro(geo)logisches Impakt-Modell kam das in NRW auf Landesebenen etablierte Wasserhaushaltsmodell mGROWA (Herrmann et al., 2015) zum Einsatz. Mit mGROWA können die Grundwasserneubildung und weitere Abflusskomponenten in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung (Tagesschritte, 100 m Raster) berechnet werden. Die Studie baut auf

dem im LANUV-Fachbericht 110 Teil IIa (Herrmann et al., 2021) ausführlich dokumentierten aktuellen mGROWA-Setup des Landes NRW auf. Die damit berechnete räumliche Verteilung der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung (1971 – 2000) wird als das historische beobachtete Referenzniveau verwendet (Abbildung 1), zu dem die projizierten Veränderungen der Grundwasserneubildung in Bezug gesetzt werden. Die Periode 1971 – 2000 ist, im Gegensatz zur im LANUV-Fachbericht 110 Teil IIa verwendeten Periode 1981 – 2010, die in Klima-Impakt-Studien standardmäßig verwendete Referenzperiode.

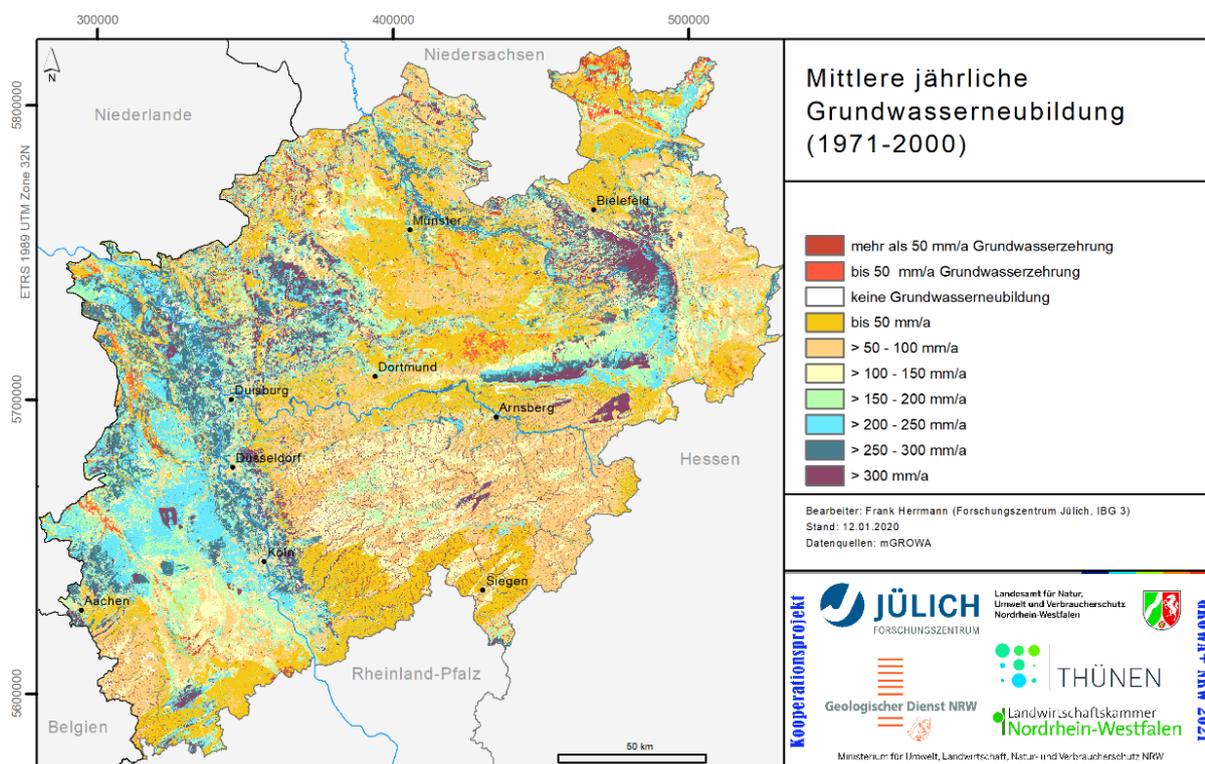


Abbildung 1: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung in NRW in der Periode 1971 – 2000 berechnet mit mGROWA unter Verwendung von beobachteten DWD-Klimadaten (aus Herrmann et al., 2021; LANUV-Fachbericht 110, Teil IIa).

Der vorliegende Teilbericht (LANUV-Fachbericht 110 Teil IX) ist in zwei große Kapitel zur Methodik (Kapitel 2) und zu den Ergebnissen (Kapitel 3) gegliedert, denen zum Abschluss kürzere Kapitel mit einer Trendanalyse für die beobachtete Vergangenheit (Kapitel 4) und einer Zusammenfassung (Kapitel 5) folgen. Die Erläuterung der Methodik beginnt mit einer Vorstellung des Multi-Modell-Ensembles (der Modellkette) RCP-GCM-RCM-mGROWA (Kapitel 2.1), führt weiterhin in die Berechnung von Kennzahlen zur Bewertung des Rest-Bias (Kapitel 2.2), die Trendanalyse und den Test auf Robustheit der Ensemble-Projektionen (Kapitel 2.3) ein. Die Ergebnisse werden gegliedert in die Analyse des Rest-Bias der einzelnen Ensemble-Mitglieder (Kapitel 3.1) und die projizierten Änderungen der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung in den zukünftigen 30-Jahre-Perioden 2011 – 2040, 2041 – 2070 und 2071 – 2100 (Kapitel 3.2) vorgestellt. Darauf aufbauend werden erkannte Trends in Zeitreihen der jährlichen Grundwasserneubildung (Kapitel 3.3), die Analyse zur Robustheit der Ensemble-Projektionen (Kapitel 3.4) und eine exemplarische Analyse zum Thema „Grundwasserdürre“ (Kapitel 3.5) präsentiert. Die Ergebnisse werden außerdem für die hydrogeologischen Großlandschaften

NRW's in Form von Steckbriefen dargestellt (näheres in Kapitel 3.3). Hinter der räumlichen Verteilung der gegenwärtigen Grundwasserneubildung (Abbildung 1) stehen die in Kapitel 4 dargestellten zeitlichen Muster und Trends. Kapitel 4 behandelt Simulationen mit mGROWA auf Basis beobachteter Klimadaten (1961 bis 2020) und illustriert die schon gegenwärtig einsetzenden Veränderungen im Grundwasserneubildungs-Regime. Die in diesem Teilbericht behandelten Fragestellungen zielen damit auf eine qualitative und quantitative Analyse der Veränderungen, die aus der Vergangenheit bekannten räumlichen und zeitlichen Variabilität des Referenzniveaus der Grundwasserneubildung, die aufgrund des Klimawandels möglich erscheinen. Die Ergebnisse werden abschließend in der Zusammenfassung (Kapitel 5) nochmals kurz diskutiert.

Zu den Steckbriefen ist ein Begleitdokument vorhanden, in dem der Aufbau und die Verwendung der Ergebnis-Steckbriefe erläutert werden. Sie finden das Dokument unter dem Link: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30110j_begleitdokument.pdf

2 Methodik

2.1 Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA

Für die Projektion zukünftig möglich erscheinender Grundwasserneubildungshöhen in NRW unter dem Einfluss des Klimawandels wurde ein Multi-Modell-Ensemble etabliert. Dieses Ensemble besteht aus insgesamt 37 Mitgliedern der Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA, deren Elemente und Verknüpfungen in den folgenden Unterkapiteln in ihren wichtigsten Grundzügen vorgestellt werden. Die tatsächlich im Rahmen der hier präsentierten Studie durchgeführten Simulationen betreffen die Impakt-Modellierung mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA. Die Ergebnisse aus den mGROWA vorgelagerten Klimamodellen sind im Rahmen einer Vielzahl von Projekten entstanden und in den hier verwendeten Kombinationen frei verfügbar über das Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ, o.J.). An der Schnittstelle zwischen den RCMs (Regional Climate Model) und mGROWA erfolgt eine Bias-Korrektur der simulierten täglichen Niederschlagssummen. Weiterhin wird die Berechnung einer täglichen Summe der potentiellen Evapotranspiration über Gras aus den simulierten atmosphärischen Zustandsgrößen und der Strahlungsbilanz, sowie ein räumliches Downscaling vom RCM-Gitter auf das mGROWA-Modellraster durchgeführt.

2.1.1 Klimaprojektionen

Eine lesenswerte Einführung in den Themenkreis der Klimaprojektionen mit einigem Basiswissen liefert DWD (2017), welches im Rahmen dieses Teilberichtes vorausgesetzt wird. Die RCP-Szenarien (Moss et al., 2010) geben in der Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA die möglich erscheinende globale Erwärmung vor. Hinter RCP (engl. Representative Concentration Pathways) stehen Annahmen für eine zukünftig weiter veränderte Strahlungsbilanz der Erdatmosphäre, die aus steigenden Treibhausgaskonzentrationen resultiert (Abbildung 2). RCP2.6 impliziert einen Strahlungsantrieb von maximal 3 W/m^2 vor 2050 und nach diesem Maximum einen Rückgang der Treibhausgaskonzentrationen. Im RCP4.5 wird eine Stabilisierung des Strahlungsantriebs bei $4,5 \text{ W/m}^2$ angenommen, d.h. die Treibhausgaskonzentrationen verbleiben in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts dauerhaft auf einem erhöhten Niveau. Das RCP8.5 steht für einen weiterhin kontinuierlich ansteigenden Strahlungsantrieb bis auf $8,5 \text{ W/m}^2$ am Ende des Jahrhunderts, der aus relativ ungebremst steigenden Treibhausgaskonzentrationen resultiert. Das RCP6.0 wurde im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt. Die Tabelle 1 liefert praktische Trivialbezeichnungen für die im Rahmen dieser Studie relevanten RCP-Szenarien.

Tabelle 1: Trivialbezeichnungen für RCP-Szenarien.

RCP-Szenario	Trivialbezeichnung
RCP2.6	„Klimaschutz-Szenario“
RCP4.5	„Stabilisierungs-Szenario“
RCP8.5	„Weiter-wie-bisher-Szenario“

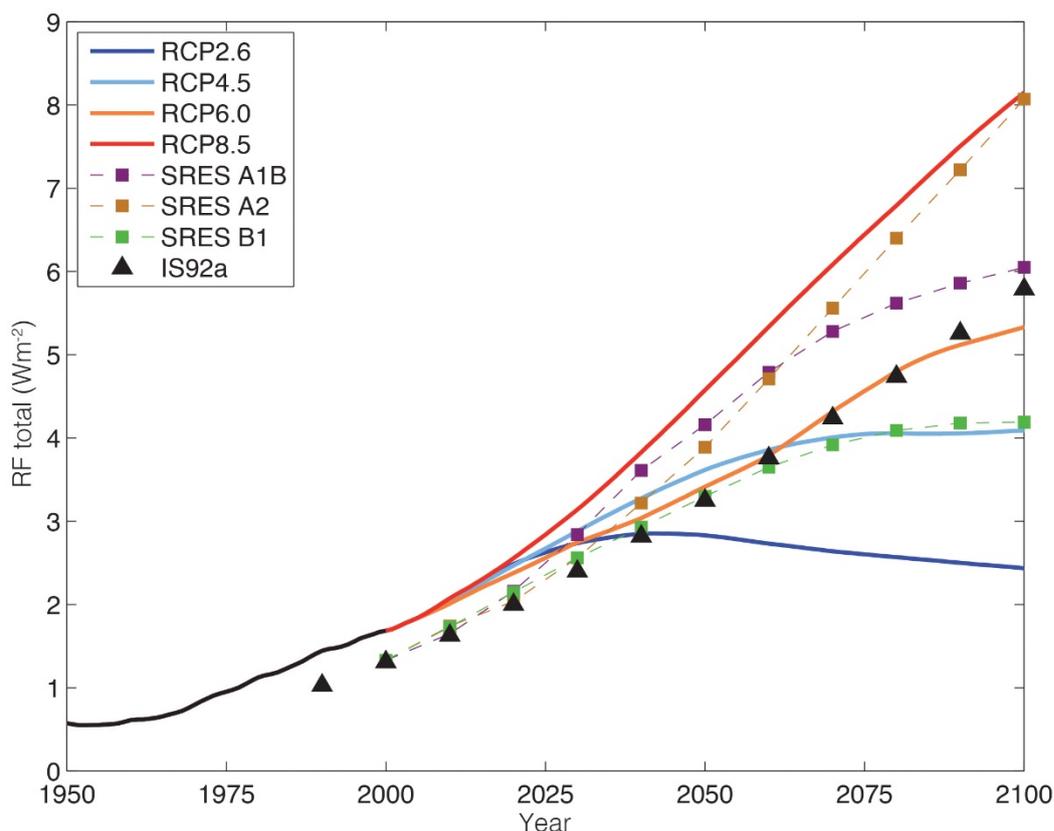


Abbildung 2: Strahlungsantrieb (engl.: Radiative Forcing, RF) in W/m^2 für die SRES-Szenarien (gestrichelte Linien mit Symbolen) und die RCP-Szenarien (durchgezogene Linien). Zusätzlich ist das veraltete Szenario IS92a mit schwarzen Dreiecken dargestellt. Quelle: IPCC, 2013, AR5-WGI, Abb.1-15. Für weitere Erläuterungen siehe Hübener et al. (2017a, Kapitel 7.1).

Die RCP-Szenarien liefern Randbedingungen für Globale Klimamodelle (GCM, General Circulation Model) welche wiederum die Randbedingungen für räumlich höher auflösende Regionale Klimamodelle (RCM, Regional Climate Model) bereitstellen. Für den Antrieb des Wasserhaushaltsmodells mGROWA in der Modellkette wurde ein durch die Europäische Initiative EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014) geschaffenes und dann im Verbundprojekt Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De; Hübener et al., 2017) erweitertes Ensemble aus GCM-RCM-Kombinationen verwendet. Dieses Ensemble wurde jedoch aufgrund der vom Deutschen Wetterdienst (DWD) publizierten Empfehlungen reduziert (DWD, o.J.). Es umfasst derzeit nur noch dynamische RCMs, deren prinzipielle Funktionsweise in Knoche et al. (2017) vorgestellt wird. Die Ensemblemitglieder (RCP-GCM-RCM-Kombinationen) sind in Tabelle 2 gelistet.

Die Verkettung von GCMs mit RCMs wird auch als dynamische Regionalisierung bezeichnet (Knoche et al., 2017). GCMs bilden die wichtigsten physikalischen Prozesse in der Atmosphäre der Erde ab, die in ihrer Wirkung über längere Zeiträume das Klima bestimmen. GCMs rechnen üblicherweise mit einer Gitterweite von ca. 200 km. Die resultierenden globalen Verteilungen klimatischer Größen sind jedoch zu grob, um daraus lokal und kleinregional verlässliche Schlussfolgerungen zu ziehen. Aus diesem Grund werden in die Gitterstrukturen der GCMs die RCMs verschachtelt (engl. nested), d.h. die GCMs liefern die atmosphärischen Randbedingungen an den Grenzen der RCMs. Diese simulieren ebenfalls die wichtigsten phy-

sikalischen Prozesse in der Atmosphäre einer größeren Region (z.B. Europas), derzeit typischerweise auf einer Gitterweite von ca. 12 km. Als Ergebnis resultieren für die Gitterpunkte hochaufgelöste Zeitreihen atmosphärischer Größen (häufig auf Stundenbasis), wie zum Beispiel Niederschlagsmengen, oberflächennahe Lufttemperaturen, die Komponenten des Strahlungshaushaltes, die Komponenten des Windfeldes, etc., die im Falle des EURO-CORDEX Ensembles die Zeit von 2006 bis Ende 2100 umfassen. Aus diesen Größen muss ein für hydrologische Impakt-Modelle geeigneter klimatischer Input berechnet werden (Kapitel 2.1.2).

Die Änderungssignale der projizierten zukünftigen Klimagrößen werden aus methodischen Gründen immer in Bezug auf Projektionen mit denselben GCM-RCM-Kombinationen für die Vergangenheit berechnet. Für den Zeitraum 1971 bis 2005 basieren diese Projektionen auf beobachteten Treibhausgasemissionen. Die 30-Jahre-Periode 1971 – 2000 wird demzufolge als „projizierte historische Referenzperiode“ bezeichnet. Die Tabelle 3 listet die zu den RCP-GCM-RCM-Kombinationen in Tabelle 2 gehörenden historischen Projektionen auf. Es sind jedoch im vom DWD empfohlenen Ensemble für diese historischen Projektionen nicht immer auch drei Projektionen in die Zukunft auf Basis der RCP-Szenarien verfügbar.

Prinzipiell wird in der Impakt-Modellierung mit den projizierten historischen und zukünftigen Klimagrößen gleich verfahren. Beide Kategorien werden Bias-korrigiert auf das Modellraster des Wasserhaushaltsmodells übertragen (Kapitel 2.1.2). Damit werden konsistente Berechnungen von Änderungssignalen der projizierten Wasserhaushaltsgrößen möglich. Des Weiteren ist eine Vergleichbarkeit bei der Anwendung von statistischen Verfahren zur Analyse von Trends und der Robustheit der Ensembleprojektionen gegeben.

Tabelle 2: Zusammensetzung des Ensembles aus RCP-GCM-RCM-Kombinationen. Die Abkürzungen entsprechen der im Projekt ReKliEs-De verwendeten Nomenklatur. Diese Projektionen decken die Zeit 2006 bis 2100 ab (Ergebnissteckbriefe sind beigefügt).

Szenario	Globalmodell	Lauf	Regionalmodell	Abkürzung
RCP2.6	ICHEC-EC-EARTH	12	CCLM 4-8-17	R26-E12-CLM
RCP2.6	MPI-M-MPI-ESM-LR	1	CCLM 4-8-17	R26-MP1-CLM
RCP2.6	ICHEC-EC-EARTH	12	KNMI-RACMO22E	R26-E12-RAC
RCP2.6	MOHC-HadGEM2-ES	1	KNMI-RACMO22E	R26-HG2-RAC
RCP2.6	ICHEC-EC-EARTH	12	SMHI-RCA4	R26-E12-RCA
RCP2.6	MOHC-HadGEM2-ES	1	SMHI-RCA4	R26-HG2-RCA
RCP2.6	MPI-M-MPI-ESM-LR	1	SMHI-RCA4	R26-MP1-RCA
RCP2.6	MPI-M-MPI-ESM-LR	1	REMO2009	R26-MP1-R09
RCP2.6	MPI-M-MPI-ESM-LR	2	REMO2009	R26-MP2-R09
RCP4.5	ICHEC-EC-EARTH	12	CCLM 4-8-17	R45-E12-CLM
RCP4.5	MOHC-HadGEM2-ES	1	CCLM 4-8-17	R45-HG2-CLM
RCP4.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	1	CCLM 4-8-17	R45-MP1-CLM
RCP4.5	ICHEC-EC-EARTH	1	KNMI-RACMO22E	R45-E01-RAC
RCP4.5	MOHC-HadGEM2-ES	1	KNMI-RACMO22E	R45-HG2-RAC
RCP4.5	IPSL-IPSL-CM5A-MR	1	SMHI-RCA4	R45-IP5-RCA
RCP4.5	ICHEC-EC-EARTH	12	SMHI-RCA4	R45-E12-RCA
RCP4.5	MOHC-HadGEM2-ES	1	SMHI-RCA4	R45-HG2-RCA
RCP4.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	1	SMHI-RCA4	R45-MP1-RCA
RCP4.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	1	REMO2009	R45-MP1-R09
RCP4.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	2	REMO2009	R45-MP2-R09
RCP8.5	CCCMa-CanESM2	1	CCLM 4-8-17	R85-CA2-CLM
RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	12	CCLM 4-8-17	R85-E12-CLM
RCP8.5	MOHC-HadGEM2-ES	1	CCLM 4-8-17	R85-HG2-CLM
RCP8.5	MIROC-MIROC5	1	CCLM 4-8-17	R85-MI5-CLM
RCP8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	1	CCLM 4-8-17	R85-MP1-CLM
RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	1	KNMI-RACMO22E	R85-E01-RAC
RCP8.5	MOHC-HadGEM2-ES	1	KNMI-RACMO22E	R85-HG2-RAC
RCP8.5	IPSL-IPSL-CM5A-MR	1	SMHI-RCA4	R85-IP5-RCA
RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	12	SMHI-RCA4	R85-E12-RCA
RCP8.5	MOHC-HadGEM2-ES	1	SMHI-RCA4	R85-HG2-RCA
RCP8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	1	SMHI-RCA4	R85-MP1-RCA
RCP8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	1	REMO2009	R85-MP1-R09
RCP8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	2	REMO2009	R85-MP2-R09
RCP8.5	CCCMa-CanESM2	1	REMO2015	R85-CA2-R15
RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	12	REMO2015	R85-E12-R15

RCP8.5	MOHC-HadGEM2-ES	1	REMO2015	R85-HG2-R15
RCP8.5	MIROC-MIROC5	1	REMO2015	R85-MI5-R15

Tabelle 3: Historische Projektionen zum Ensemble aus RCP-GCM-RCM-Kombinationen (Tabelle 2). Diese Projektionen decken die Zeit von 1971 bis 2005.

Szenario	Globalmodell	Lauf	Regionalmodell	Abkürzung
HISTORISCH	ICHEC-EC-EARTH	12	CCLM 4-8-17	HIS-E12-CLM
HISTORISCH	MOHC-HadGEM2-ES	1	CCLM 4-8-17	HIS-HG2-CLM
HISTORISCH	MPI-M-MPI-ESM-LR	1	CCLM 4-8-17	HIS-MP1-CLM
HISTORISCH	CCCMa-CanESM2	1	CCLM 4-8-17	HIS-CA2-CLM
HISTORISCH	MIROC-MIROC5	1	CCLM 4-8-17	HIS-MI5-CLM
HISTORISCH	ICHEC-EC-EARTH	12	KNMI-RACMO22E	HIS-E12-RAC
HISTORISCH	MOHC-HadGEM2-ES	1	KNMI-RACMO22E	HIS-HG2-RAC
HISTORISCH	ICHEC-EC-EARTH	1	KNMI-RACMO22E	HIS-E01-RAC
HISTORISCH	ICHEC-EC-EARTH	12	SMHI-RCA4	HIS-E12-RCA
HISTORISCH	MOHC-HadGEM2-ES	1	SMHI-RCA4	HIS-HG2-RCA
HISTORISCH	MPI-M-MPI-ESM-LR	1	SMHI-RCA4	HIS-MP1-RCA
HISTORISCH	IPSL-IPSL-CM5A-MR	1	SMHI-RCA4	HIS-IP5-RCA
HISTORISCH	MPI-M-MPI-ESM-LR	1	REMO2009	HIS-MP1-R09
HISTORISCH	MPI-M-MPI-ESM-LR	2	REMO2009	HIS-MP2-R09
HISTORISCH	CCCMa-CanESM2	1	REMO2015	HIS-CA2-R15
HISTORISCH	ICHEC-EC-EARTH	12	REMO2015	HIS-E12-R15
HISTORISCH	MOHC-HadGEM2-ES	1	REMO2015	HIS-HG2-R15
HISTORISCH	MIROC-MIROC5	1	REMO2015	HIS-MI5-R15

2.1.2 Bias-Korrektur und Downscaling der Klimaprojektionen

Die mit Klimamodellen für die historische Referenzperiode simulierten räumlichen und zeitlichen Niederschlagsmuster weisen gegenüber Beobachtungsdaten meistens einen sogenannten Bias auf, d.h. die Modelle über- oder unterschätzen beobachtete langjährige Mittelwerte und in vielen Fällen auch die saisonalen Verteilungsmuster, z.B. die der täglichen Niederschlagshöhen. Die durch aktuelle RCMs projizierten Niederschlagsmuster weisen im Vergleich zu den antreibenden GCMs jedoch schon einen systematisch reduzierten Bias auf (z.B. Sørland et al., 2018), der dennoch in hydrologischen und hydrogeologischen Klimafolgestudien einen relevanten Einfluss auf die projizierten Abflusskomponenten haben kann (z.B. Huang et al., 2013). Der räumliche und saisonale Bias des mit dem EURO-CORDEX-Ensemble simulierten Niederschlags ist europaweit für die Periode 1989 – 2008 von Kotlarski et al. (2014) qualitativ und quantitativ dokumentiert worden. Hübener et al. (2017b) stellen den Niederschlags-Bias der RCMs des ReKliEs-De-Ensembles für Deutschland (Periode 1971 – 2000) detaillierter dar und beschreiben die generelle Problematik der Evaluierung der Qualität der regionalen Klimamodelle. Die saisonale Unter- und Überschätzung einzelner RCMs im

deutschlandweiten Mittel liegt demnach in einer bemerkenswerten Bandbreite zwischen -37 und +50 %. Im Hinblick auf die Zielstellung der hier dargestellten Studie wird deshalb von einer Notwendigkeit der Verwendung Bias-korrigierter Niederschläge ausgegangen, ohne den Bias einzelner RCMs für NRW detailliert zu beschreiben. Bezüglich des Bias der aus projizierten Klimasignalen berechneten potentiellen Evapotranspiration über Gras fehlen derzeit noch landesweite detaillierte Untersuchungen. Dieser Bias wird jedoch um eine Größenordnung geringer als der Niederschlags-Bias eingeschätzt.

Über geeignete Bias-Korrekturverfahren wurde in den vergangenen zwei Dekaden viel diskutiert, wobei ihre Vor- bzw. Nachteile in Klimafolgestudien herausgearbeitet wurden. So argumentieren Ehret et al. (2012) beispielsweise, dass durch Bias-Korrekturen die Unsicherheiten in den Modellketten weiter verschleiert werden. Andererseits können in der Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA, wenn Niederschläge ohne Bias-Korrektur verwendet werden, negative Änderungssignale der Grundwasserneubildung resultieren, die betragsmäßig größer sind, als das Referenzniveau der Grundwasserneubildung in der beobachteten Vergangenheit. In der Interpretation der Änderungssignale würde dies dann ein Absinken der Grundwasserneubildung unter das Niveau Null bedeuten, d.h. es wären keine formal sinnvollen Aussagen über ein zukünftiges Niveau der Grundwasserneubildung möglich.

Vor diesem Hintergrund wurden in der hier präsentierten Modellkette die projizierten Niederschlagssummen in Bias-korrigierter Form verwendet. Der Niederschlags-Bias wurde im Rahmen des Verbundprojektes ReKliEs-De mit dem LOCI-Verfahren (Local Intensity Scaling, Schmidli et al., 2006) für die in Deutschland lokalisierten RCM-Gitterpunkte korrigiert. Die Korrektur wurde von Dr. Klaus Keuler (BTU Cottbus-Senftenberg) durchgeführt, er hat die korrigierten Daten freundlicherweise bereitgestellt. Mit LOCI werden alle Tagesniederschläge einer Simulation so angepasst, dass für jeden Kalendertag der klimatologische Witterungsverlauf einer vorgegebenen Referenzperiode (hier 1971 – 2000) adäquat wiedergegeben wird. So reproduzieren die korrigierten Niederschläge an jedem Gitterpunkt des Modellgebietes die klimatologischen Monatsmittelwerte und insbesondere die mittleren saisonalen Muster der Referenzperiode. Die dabei für jeden Kalendertag und jeden Gitterpunkt ermittelten Korrekturfaktoren werden dann auf alle Tagesniederschläge, also auch die der verschiedenen Klimaszenarien, übertragen. Neben der Veränderung der Niederschlagsmenge kann sich dabei auch die Stärke der Niederschlagsänderung zwischen verschiedenen Klimaperioden verändern. Als Vergleichsdaten wurden im Rahmen der Bias-Korrektur die HYRAS-Daten (Rauthe et al., 2013) verwendet, für deren Erzeugung Beobachtungsdaten auf die RCM-Gitterpunkte projiziert wurden.

Für die Übertragung der Klimadaten (Niederschlag und berechnete potentielle Evapotranspiration über Gras als Tagessummen) vom RCM-Gitter (ca. 12 km) auf das mGROWA-Modellraster (100 m) wurde im Rahmen dieser Studie die von Marke et al. (2011) vorgeschlagene bilineare Interpolation angewendet (siehe auch Abbildung 3). Die räumliche Lage der RCM-Gitter ist in Abbildung 4 ersichtlich.

2.1.3 Das Wasserhaushaltsmodell mGROWA

Die räumlich und zeitlich hochaufgelöste, flächendifferenzierte Projektion des Wasserhaushaltes erfolgt mit dem letzten Element der Modellkette, dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA

(Herrmann et al., 2013; Herrmann et al., 2015), in zwei Stufen. Der Simulation der Abflussbildung in Tagesschritten folgt eine Abflusseparation in Monatsschritten, an deren Ende projizierte rasterbasierte Zeitreihen der monatlichen Grundwasserneubildungshöhe stehen. Diese Zeitreihen können für weitere Analysen zu Jahressummen oder langjährigen Mittelwerten aggregiert werden. In der Implementierung für das Bundesland Nordrhein-Westfalen ist das Modell mGROWA detailliert in Herrmann et al. (2014) und Herrmann et al. ([2021; LANUV-Fachbericht 110, Teil IIa](#)) erläutert. Im Rahmen der hier vorgestellten Studie wurden alle Parameter (Landnutzung, Grundwasserflurabstände, etc.; mit dem Stand der Daten von 2017) zeitlich konstant gehalten, um eine reine Wirkanalyse der Klimaänderung zu ermöglichen.

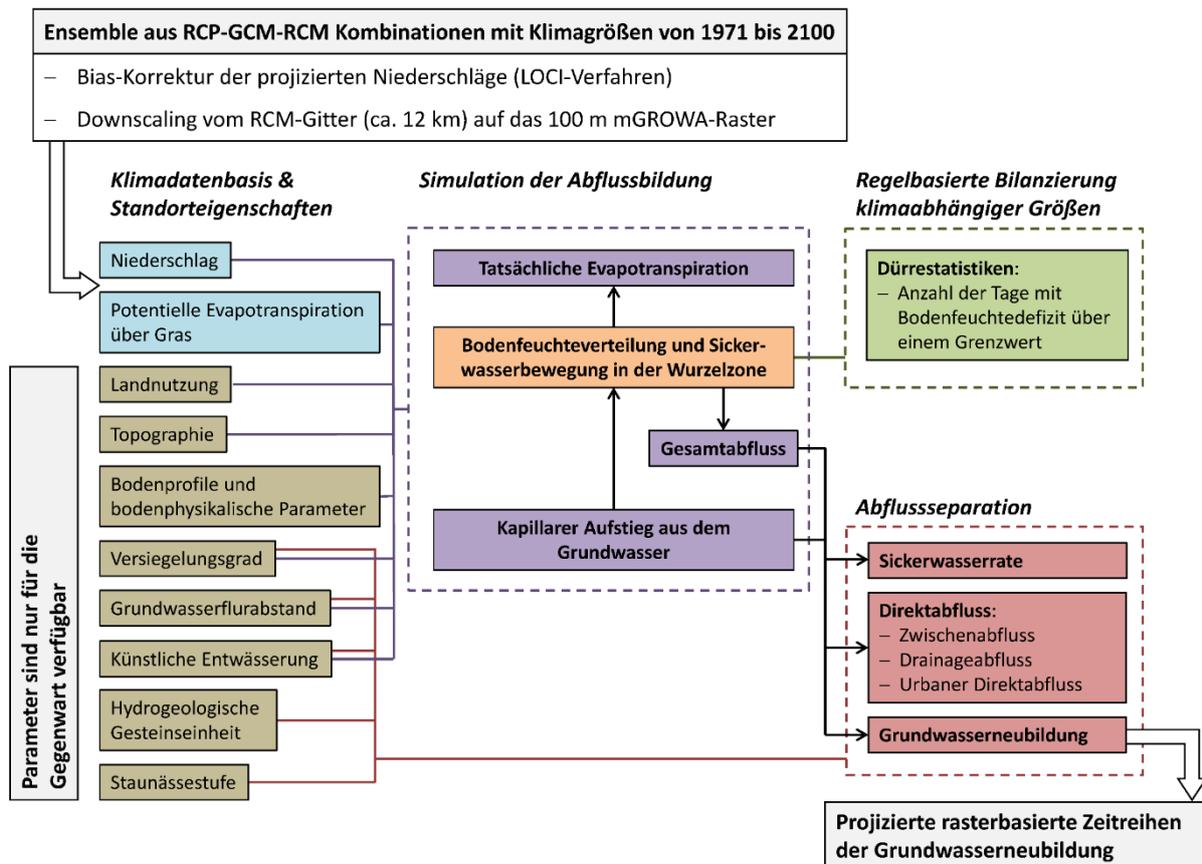


Abbildung 3: Konzept des Wasserhaushaltsmodells mGROWA integriert in die Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA.

In der prozessorientierten ersten Stufe des Modells werden in Tagesschritten die tatsächliche Evapotranspiration von der Erdoberfläche und die Abflussbildung in Form des Gesamtabflusses flächendifferenziert und instationär berechnet (Abbildung 3). Grundlage hierfür ist die allgemeine hydrologische Wasserhaushaltsgleichung. Die Bodenwasserdynamik, repräsentiert durch den Speicherterm der Gleichung, wird mit dem als Modul integrierten Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell BOWAB (Engel et al., 2012) simuliert. Ein derartiges Modul ist essentiell für Projektionen der Grundwasserneubildung mit einem Multi-Modell-Ensemble. Sickerwasserbewegung und damit spätere Grundwasserneubildung kann in relevanter Größenordnung erst stattfinden, wenn im Herbst der Bodenwasserspeicher nahezu auf Feldkapazität aufgefüllt wurde.

Das Zusammenspiel von veränderten Niederschlags- und Temperaturmustern im Sommer (stärker ausgeprägte Dürren), Herbst (langsames Auffüllen des Bodenwasserspeichers) und Winter (wärmer und verspätetes Einsetzen der Grundwasserneubildung) steuert maßgeblich das jährliche Niveau der Grundwasserneubildung und damit die resultierenden Änderungssignale (Herrmann et al., 2017). Das bedeutet, dass höhere Winterniederschläge nicht zwangsläufig in ein höheres Grundwasserneubildungsniveau münden. Dieses Zusammenspiel kann jedoch nur adäquat projiziert werden, wenn alle relevanten Prozesse in einem Bodenwasserhaushaltsmodul abgebildet sind.

In der empirischen zweiten Stufe des Wasserhaushaltsmodells mGROWA erfolgt in Monatschritten die Separation des Gesamtabflusses in die Grundwasserneubildung sowie in mehrere Komponenten des Direktabflusses. Basis für diesen Verfahrensschritt ist die Identifizierung und Parametrisierung der Standorteigenschaften, die für die Auftrennung des gebildeten Abflusses lokal relevant sind (Abbildung 5 in Kapitel 2.1.4). In NRW haben beispielsweise landwirtschaftliche Drainagesysteme (Tetzlaff, 2021; LANUV-Fachbericht 110, Teil IIb) und geringe Grundwasserflurabstände in vielen Lockergesteinsgebieten einen erheblichen Einfluss auf die netto stattfindende Grundwasserneubildung. Dieser Situation wird mit entsprechend angepassten Datengrundlagen und Berechnungsschritten Rechnung getragen (Details in Herrmann et al., 2021; LANUV-Fachbericht 110, Teil IIa). In den Festgesteinsregionen NRW's wird die Grundwasserneubildung mit Hilfe kalibrierter BFI-Werte berechnet (Bogena et al., 2005), die flächendifferenziert und abhängig von den hydraulischen Gebirgsdurchlässigkeiten das Verhältnis der Grundwasserneubildung zum Gesamtabfluss wiedergeben. Dabei wird explizit die mit dem Bodenwasserhaushaltsmodul für die Böden über Festgesteinsgrundwasserleitern berechnete monatliche Sickerwassermenge in einen schneller und mit lateraler Strömungskomponente abfließenden Interflow sowie eine tatsächlich den nutzbaren Grundwasserleiter auffüllende Grundwasserneubildung aufgespalten. Als Interflow wird dabei im Sinne von Bloomfield et al. (2009) und Haberlandt et al. (2001) die schnelle unterirdische Direktabflusskomponente verstanden, die nicht zum Grundwasserdargebot beiträgt. Eine Darstellung der räumlichen Verteilung der BFI-Werte in NRW ist in Herrmann et al. (2021; LANUV-Fachbericht 110, Teil IIa) gegeben.

2.1.4 Räumliche Zusatzinformationen für Interpretationszwecke

Für die Beantwortung grundwasserwirtschaftlicher Fragestellungen können die Ergebnisse der Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA theoretisch auf beliebige Gebietskulissen aggregiert (gemittelt) werden. Im Rahmen der hier dokumentierten Studie wurde eine solche Aggregation exemplarisch für die in Abbildung 4 dargestellten hydrogeologischen Großlandschaften durchgeführt. Aus hydrogeologischer Perspektive sind die dargestellten Großlandschaften zum Beispiel in Ad-hoc-AG_Hydrogeologie (2016) beschrieben. Die Projektionsergebnisse für die gezeigten Flächeneinheiten – d.h. die berechneten Änderungssignale der Grundwasserneubildung (z.B. in den Kapiteln 3.3 und 3.4) – basieren auf den projizierten Klimaänderungen von jeweils ca. 20 bis 50 Knoten der RCMs.

Für die Interpretation der projizierten zukünftigen Grundwasserneubildung sind Hintergrundinformationen bezüglich der Standortfaktoren nützlich, die für die Berechnungen mit mGROWA schlussendlich relevant sind (Abbildung 5). Diese Standortfaktoren wurden aus den für NRW

verfügbaren Datengrundlagen anhand eines Entscheidungsbaumes ermittelt und sind ausführlich in Herrmann et al. (2021; LANUV-Fachbericht 110, Teil IIa) erläutert. Im Folgenden werden die wichtigsten Standortfaktoren und die hydrogeologischen Großlandschaften kurz charakterisiert.

Eifel (mit Siebengebirge), Bergisches Land, Sauer- und Siegerland sowie das Weserbergland sind dominiert von Festgesteinseinheiten mit teilweise geringen BFI-Werten (BFI: Verhältnis von Grundwasserneubildung zu Gesamtabfluss) und damit auch relativ geringer Grundwasserneubildung. In diesen Landschaften findet in beträchtlichem Maße ein Interflow statt, welcher analog zur Grundwasserneubildung zukünftig zu- oder abnehmen wird. In Bereichen mit hohem Versiegelungsanteil findet ein urbaner Direktabfluss statt, dessen Veränderungen auch stark durch zeitlich veränderte Niederschlagsmuster (statistische Verteilung der Tagesniederschlagssummen und der Niederschlagsintensität) gesteuert wird. Im Sandmünsterland in der Westfälischen Bucht dominieren Lockergestein und flurnahes Grundwasser, welches häufig künstlich entwässert wird. In diesen Landschaften haben mehrere Effekte einen signifikanten Einfluss auf die Netto-Grundwasserneubildung im Gesamtjahr. Einerseits wird die Wasserbilanz auf diesen Standorten durch die Veränderungen der Winterniederschläge beeinflusst. Andererseits führen auch wärmere Sommer mit längeren Trockenperioden zu stärkerem kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser und damit zu einer Grundwasserzehrung. In den Lockergesteinsregionen im Niederrheinischen Tiefland und in der Niederrheinischen Bucht wirken mehrere Standortfaktoren auf die Grundwasserneubildung, sehr bedeutsam sind hier die geringen Grundwasserflurabstände, die Staunässe und die variierende Hangneigung. Hier dominieren demnach die Eigenschaften der durchwurzelten Bodenzone die klimabedingte Veränderung der Grundwasserneubildung. In den Landschaften der Westfälischen Bucht und im Westfälischen Tiefland liegt ein starker Mix verschiedenster Standortfaktoren vor, welcher die großräumige Interpretation von Änderungssignalen der Grundwasserneubildung nicht vereinfachen dürfte.

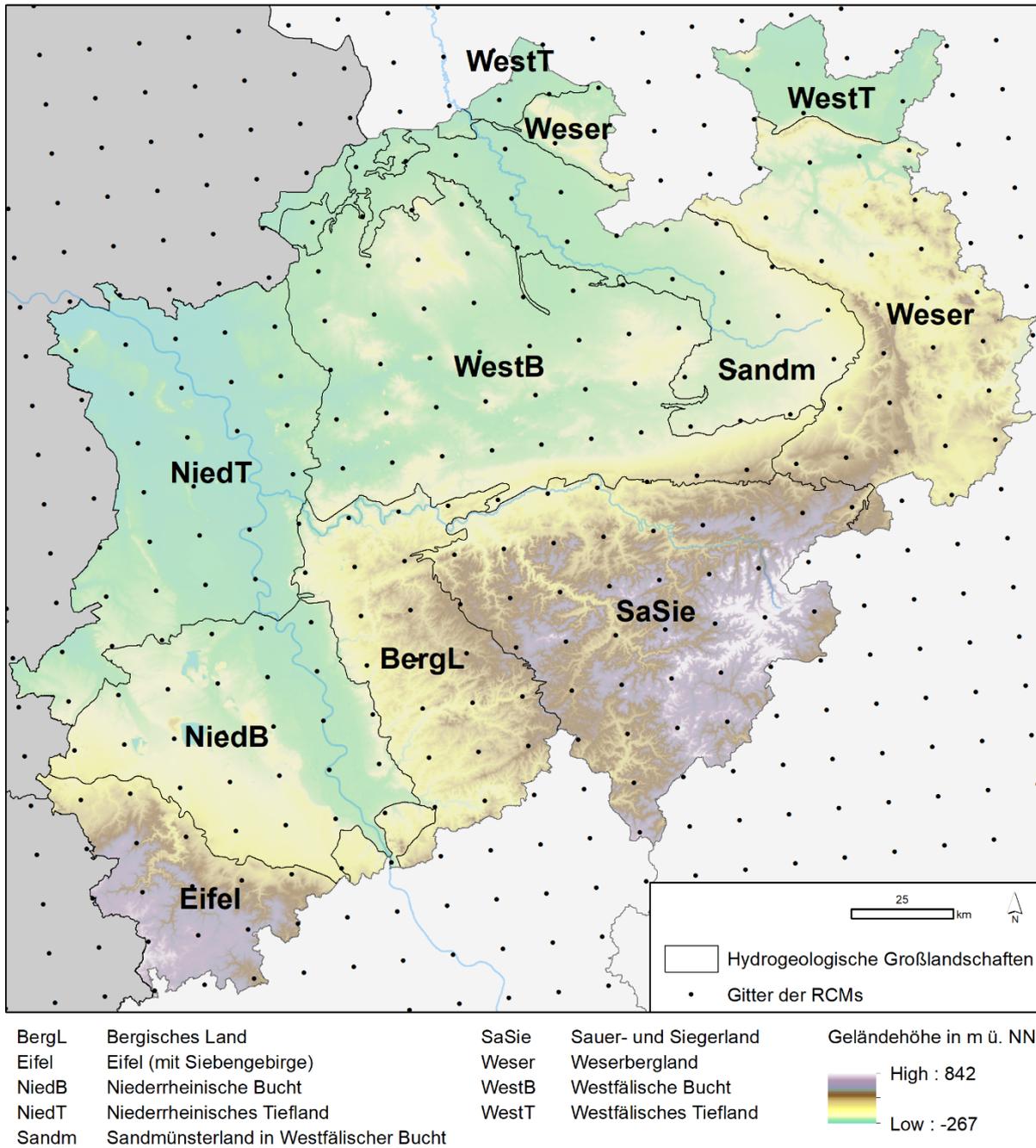
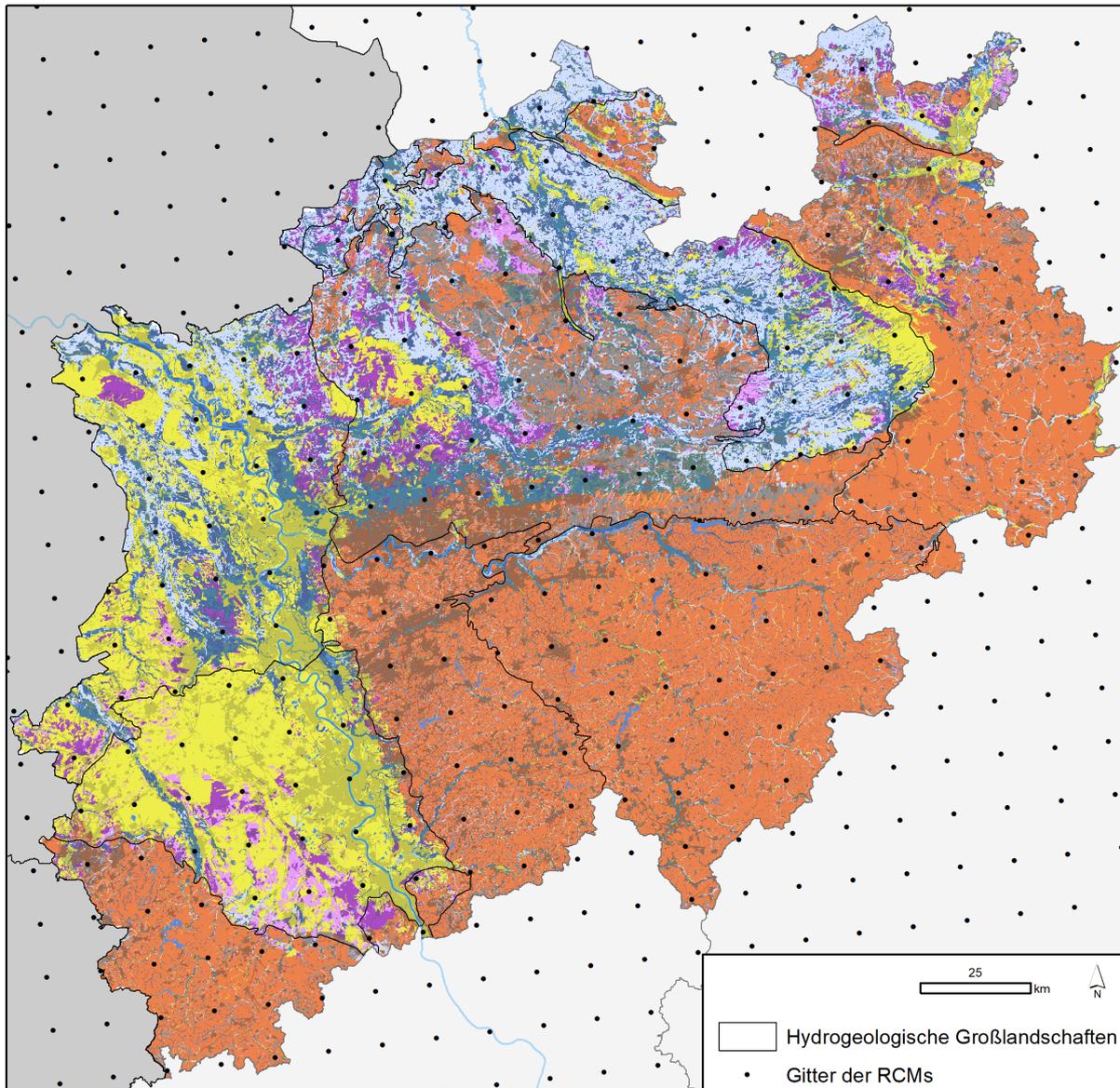


Abbildung 4: Hydrogeologische Raumgliederung für eine regionsspezifische Analyse der Ensembleergebnisse in NRW.



In mGROWA für die Separation des Gesamtabflusses relevante Standorteigenschaften

 1 - Oberflächenwasser	 14 - Versieg. + Festgestein
 3 - Grundwasserflurabstand	 15 - Versieg. + Staunäseeinfluss
 4 - Festgestein	 16 - Versieg. + Hangneigung
 5 - Staunäseeinfluss	 17 - Versieg. + Drain. (Grundwasser)
 6 - Hangneigung	 18 - Versieg. + Drain. (Stauwasser)
 7 - Drainagen (Grundwasser)	 21 - Festgestein + Drain. (Stauwasser)
 8 - Drainagen (Stauwasser)	 22 - Grundwasserflurabstand + Drain. (Stauwasser)
 11 - Versiegelung + Oberflächenwasser	 31 - Versieg. + Festgestein + Drain. (Stauwasser)
 13 - Versieg. + Grundwasserflurabstand	 32 - Versieg. + Grundwasserflurabstand + Drain. (Stauwasser)

Abbildung 5: Für die Separation des Gesamtabflusses in den hydrogeologischen Großlandschaften (Benennung in Abbildung 4) relevante Standorteigenschaften.

2.2 Kennzahlen zur Bewertung des Rest-Bias der Grundwasserneubildung

Obwohl der größte der Modellkette innewohnende Bias im Rahmen dieser Studie korrigiert wurde (Niederschlag, siehe Kapitel 2.1.2), weisen die mit dem Ensemble für die historische Referenzperiode berechneten Grundwasserneubildungshöhen in den einzelnen Projektionen einen variierenden und räumlich unterschiedlich stark ausgeprägten sogenannten Rest-Bias auf. Die Kenntnis eines solchen Rest-Bias ist im Hinblick auf die aus den projizierten Änderungssignalen zu ziehenden Schlussfolgerungen von zusätzlichem Wert.

In diesem Kapitel erfolgt eine kurze Einführung in die Methodik zur Darstellung des Rest-Bias. Präsentiert und diskutiert wird der Rest-Bias für das gesamte Ensemble im Kapitel 3.1. Die Berechnung der im Folgenden eingeführten statistischen Kennzahlen erfolgt im Rahmen dieser Studie rasterbasiert (Modellraster, 100 m Auflösung) aus den Jahressummen der Grundwasserneubildung. Gegenübergestellt werden die historischen Projektionen (Tabelle 3) der Referenzsimulation (auf Basis beobachteter Klimadaten; Abbildung 1 und Abbildung 23). In weiteren Berechnungsschritten können diese Statistiken räumlich aggregiert werden. Prinzipiell kann die Methodik auch auf alle weiteren in der Modellkette berechneten hydrologischen und klimatologischen Größen angewendet werden.

Die Klimaprojektionen mit RCMs sind auch nach einer Bias-Korrektur generell nicht zeitpunktgenau. Das heißt, sie bilden nicht die Wetterlagen der Vergangenheit in ihrer zeitlichen Reihenfolge exakt ab, sondern zielen auf die Reproduktion langjähriger Klimastatistiken (z.B. Mittelwerte des Niederschlags). Dabei können die interannuellen Variationen und die saisonalen Variationen eines einzelnen Jahres individuell von realen Abläufen abweichen. Aus diesen Gründen zielt die Bewertung des Rest-Bias nicht auf eine direkte Gegenüberstellung der simulierten Jahreszeitreihen ab, sondern auf eine Darstellung der Güte der durch die Projektionen für die Jahre 1971 bis 2000 reproduzierten langjährigen Statistik.

Die folgenden Gleichungen stehen hinter der Berechnung der statistischen Kennzahlen, in denen allgemein Y für die betrachtete Größe steht, d.h. im Rahmen dieser Studie für die Grundwasserneubildung (siehe Kapitel 3.1). Y_o steht für Jahressummen der Größe, die auf Basis von beobachteten Klimadaten (Referenzsimulation in Abbildung 1 und Abbildung 23) simuliert wurde und Y_p für Jahressummen der Größe, die auf Basis der Modellkette für die historische Periode projiziert wurde. \bar{Y}_o und \bar{Y}_p stehen für jeweilige Mittelwerte über die Jahre 1971 bis 2000, sowie σ_o und σ_p für die zugehörigen Standardabweichungen. In Aufsummierungen über die betrachtete Zeitreihe wird auf einen zusätzlichen Zeitindex verzichtet, N steht in diesem Zusammenhang für die Anzahl der Jahre.

Eine einfach zu berechnende und dabei relativ aussagekräftige Kennzahl ist die prozentuale Verzerrung PBIAS (Gupta et al., 1999) in Gl. 1:

$$PBIAS = \frac{\sum_1^N (Y_o - Y_p) \cdot 100}{\sum_1^N Y_o} \quad \text{Gl. 1}$$

Mit PBIAS (engl. percent bias) wird die Tendenz einer simulierten Zeitreihe gemessen, prozentual größer oder kleiner als die entsprechende Vergleichszeitreihe zu sein. Der optimale Werte für PBIAS ist 0, d.h. im Mittel wird die Vergleichszeitreihe weder über- noch unterschätzt. Positive Werte zeigen eine Unterschätzung und negative Werte eine Überschätzung der Vergleichszeitreihe an.

Die Nash-Sutcliffe Modelleffizienz NSE (Nash et al., 1970) in Gl. 2 ist eine normalisierte Statistik die angibt, wie gut die Darstellung der simulierten Werte gegenüber Vergleichswerten in einem Streudiagramm die 1:1-Line approximiert:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_1^N (Y_o - Y_p)^2}{\sum_1^N (Y_o - \bar{Y}_o)^2} \right] \quad \text{Gl. 2}$$

Aufgrund der Tatsache, dass die Projektionen nicht zeitpunktgenau sein können, werden für die Berechnung nach der Größe sortierte Jahressummen verwendet. Der Wertebereich von NSE reicht von $-\infty$ bis 1, wobei 1 den optimalen Wert darstellt, d.h. alle Wertepaare im Streudiagramm liegen auf der 1:1-Linie. Werte >0 können dahingehend interpretiert werden, dass die zeitliche Variabilität der projizierten Jahreswerte die der Vergleichswerte akzeptabel gut widerspiegelt (Moriasi et al., 2007).

RMSE (engl. root mean square error) in Gl. 3 ist eine sehr weit verbreitete Fehler- und Streuungsstatistik:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_1^N (Y_o - Y_p)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Gl. 3}$$

Allgemein reproduzieren simulierte Werte die entsprechenden Vergleichswerte besser, je kleiner der resultierende RMSE wird. RMSE kann vielfältig angewendet werden. Im Rahmen der Bewertung des Rest-Bias wird RMSE einerseits als Streuungsmaß genutzt und zum Mittelwert der Jahressummen berechnet (in Gl. 3 wird dann beispielsweise \bar{Y}_o anstatt Y_p genutzt). Andererseits wird RMSE auch als Fehlermaß im sogenannten Taylor-Diagramm verwendet (Erläuterung weiter unten im Text).

Ebenfalls im Taylor-Diagramm findet der Korrelationskoeffizient R Verwendung:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_1^N (Y_o - \bar{Y}_o) \cdot (Y_p - \bar{Y}_p)}{\sigma_o \cdot \sigma_p} \quad \text{Gl. 4}$$

Der Wertebereich des Korrelationskoeffizienten reicht von -1 bis +1, wobei beide Werte jeweils ein Optimum darstellen, d.h. eine vollständig negative bzw. positive lineare Beziehung zwischen den betrachteten Größen. Ein Wert von 0 indiziert keine lineare Beziehung zwischen den Größen.

Die Berechnung und Darstellung von PBIAS, NSE und RMSE erfolgt im Rahmen dieser Studie rasterbasiert, d.h. räumlich verteilt für individuelle Rasterzellen, und zielt auf die Darstellung der **Güte der zeitlichen Muster** und Mittelwerte der historischen Projektionen im Vergleich zur historischen Referenzsimulation (auf Basis beobachteter Klimadaten) in Form von Karten. Die Darstellung der **Güte der räumlichen Muster** der langjährigen Mittelwerte erfolgt hingegen im sogenannten Taylor-Diagramm (Taylor, 2001). Damit ist es möglich, mehrere Aspekte der Güte räumlicher Verteilungen in einer einzelnen Darstellung zusammenzufassen.

Taylor (2001) nutzt für die Darstellung in seinem Diagramm den geometrischen Zusammenhang von RMSE, R und σ (Standardabweichung), der sich über den Kosinussatz herstellen lässt. Die Abbildung 6 zeigt ein exemplarisches Diagramm. Ziel der Darstellung ist es, statistisch quantitativ die Ähnlichkeit der räumlichen Verteilung der projizierten langjährigen Mittelwerte in Bezug zur Referenzsimulation (auf Basis beobachteter Klimadaten) aufzuzeigen.

Demnach müssen die Kennzahlen jeweils für ein räumlich definiertes Gebiet, z.B. eine hydrogeologische Großlandschaft, berechnet werden. Die historische beobachtete Referenzsimulation ist als grauer Punkt dargestellt, mehrere historische Projektionen der Grundwasserneubildung in Farbe. Der RMSE der Referenzsimulation zu sich selbst ist Null. Dies ist der Mittelpunkt (Referenzpunkt) der grauen Kurven, durch die der RMSE der Projektionen zur Referenzsimulation abgelesen werden kann (RMSE über alle Rasterzellen des definierten Gebiets). Die radialen Abstände der Punkte vom Ursprung (gepunktete Kreise) messen die Standardabweichungen σ um die jeweiligen räumlichen Mittelwerte der Projektionen und die azimuthale Position (gepunktete Radien) gibt die Korrelationskoeffizienten R zwischen Projektionen und Referenzsimulation (über alle Rasterzellen des definierten Gebiets) wieder. Je näher sich die Punkte der Projektionen auf den entsprechenden Linien/Kurven am Referenzpunkt befinden, desto stärker ähneln die räumlichen Verteilungen der der Referenzsimulation, desto besser kann die räumliche Modellperformance des jeweiligen Ensemblemitglieds im definierten Gebiet eingeschätzt werden.

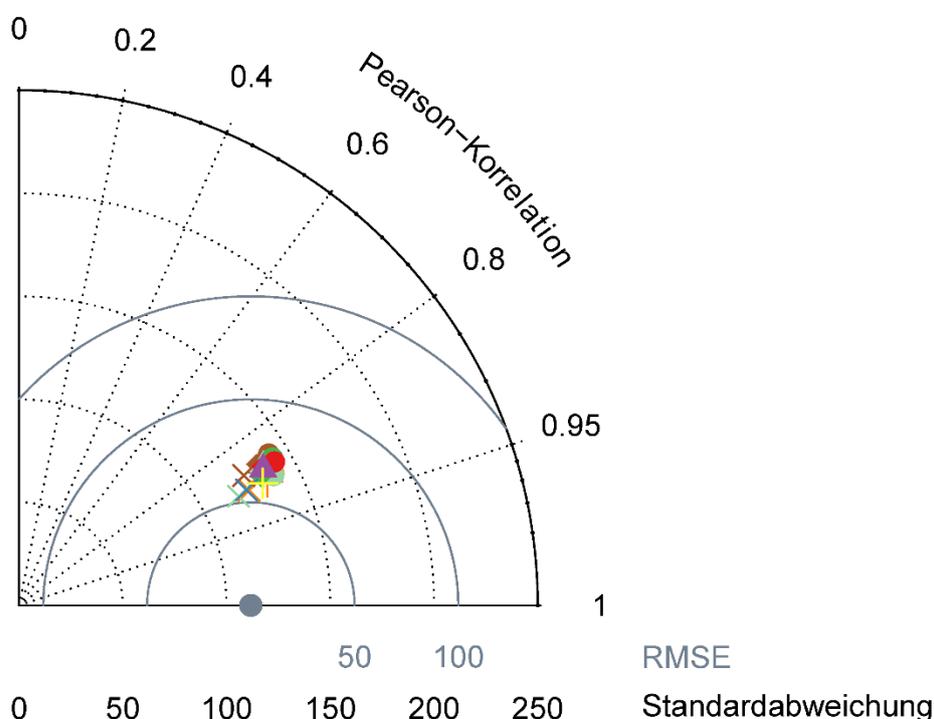


Abbildung 6: Exemplarische Darstellung der Güte der räumlichen Muster der langjährigen Mittelwerte der Grundwasserneubildung im Taylor-Diagramm. RMSE und Standardabweichung in mm/a.

Im Beispiel (Abbildung 6) zeigt das hellgrüne Kreuz die Projektion mit der besten Modellperformance an, d.h. die beste Reproduktion der räumlichen Verteilung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung. Die Standardabweichung des räumlichen Mittelwertes der Referenzsimulation (grau) beträgt ca. 110 mm/a, die am hellgrünen Kreuz ca. 120 mm/a. Alle weiteren Projektionen weisen größere Standardabweichungen auf. Der RMSE am hellgrünen Kreuz beträgt ca. 55 mm/a. Ebenso ist der RMSE für alle anderen Projektionen größer, d.h. schlechter. Letztendlich beträgt R am hellgrünen Kreuz ca. 0,9 und ist ebenfalls größer als die Korrelationskoeffizienten der meisten anderen Projektionen.

2.3 Methodik der Trendanalyse und des Tests auf Robustheit

Insgesamt werden durch die Projektionen mehrere hydrologische 30-Jahre-Perioden von 1971 bis 2100 abgedeckt. Neben der Referenzperiode 1971 – 2000 werden derzeit in Klima-Impakt-Studien üblicherweise die projizierten zukünftigen Perioden 2011 – 2040, 2041 – 2070 und 2071 – 2100 analysiert, so auch in der hier dokumentierten Studie. Im Rahmen der Analysen soll einerseits festgestellt und nachgewiesen werden, ob in einzelnen Projektionen (Entwicklungspfaden) zukünftig mit einem signifikant veränderten Grundwasserneubildungs-Regime zu rechnen ist und in welche Richtung diese Veränderung führt, eher zu einem höheren oder zu einem geringeren langjährigen mittleren Niveau. Andererseits ist auch von wesentlichem Interesse, ob durch das gesamte Ensemble eine einheitliche Richtung der Veränderung angezeigt wird, oder ob keine einheitliche Tendenz nachweisbar ist. Ein signifikant verändertes Grundwasserneubildungs-Regime einer einzelnen Projektion kann nachgewiesen werden, wenn zwischen zwei 30-Jahre-Perioden eine signifikant unterschiedliche Verteilung der Jahreswerte um den Mittelwert erkannt und damit ein Trend offensichtlich wird. Zeigen diese Trends im Ensemble mehrheitlich in dieselbe Richtung, kann von einem robusten Änderungssignal des Ensembles für die betreffende Periode gesprochen werden. Ein solcher Nachweis ist Ziel der Trendanalyse und des Tests auf Robustheit.

Als Test auf einen Trend, d.h. auf Signifikanz der Änderungssignale zwischen zwei Perioden, wird im Rahmen dieser Studie ein verteilungsfreier U-Test (Mann–Whitney–Wilcoxon-Test, Mann et al., 1947; Wilcoxon, 1945) verwendet. Die Nutzung eines verteilungsfreien Tests hat den Vorteil, dass keine Normalverteilung der zu untersuchenden Größe notwendig ist. Bei stark klimatologisch beeinflussten hydrologischen Größen wie der Grundwasserneubildung ist eine Normalverteilung häufig nicht gegeben. Für die Analyse multidekadischer Regime-Verschiebungen von Abflusskomponenten wird der U-Test mittlerweile häufig angewendet (z.B. Mauget, 2003). Ebenso gibt es Empfehlungen für eine Anwendung im Rahmen der Erstellung von Klimasignalkarten und der Bewertung der Robustheit von Klimaprojektionen (Pfeifer et al., 2015).

Ziel des U-Tests ist es hier, eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit zu erhalten, ob sich die Verteilungen der Jahreswerte der Grundwasserneubildung in zwei 30-Jahre-Perioden unterscheiden. Mit unterschiedlichen Verteilungen gehen natürlich unterschiedliche statistische Kennwerte der zentralen Tendenz (Mittelwerte, Median, etc.) und der Dispersion (Variationsbreite, Streuung, etc.) einher. Der U-Test hat explizit zum Ziel, wie andere quantitative statistische Testverfahren auch, die Wahrscheinlichkeiten für eine Nullhypothese H_0 und damit indirekt für eine Alternativhypothese H_1 zu schätzen. Wird die Nullhypothese aufgrund eines Kriteriums (Signifikanzniveau α) abgelehnt, gilt die Alternativhypothese als bestätigt. Für die Anwendung im Rahmen dieser Studie lautet die Nullhypothese H_0 :

Die Verteilung der zukünftigen jährlichen Grundwasserneubildungshöhen (2011 – 2040, 2041 – 2070 oder 2071 – 2100) unterscheidet sich nicht signifikant von der Verteilung der jährlichen Grundwasserneubildungshöhen der Referenzperiode (1971 – 2000).

Entsprechend ist die Alternativhypothese H_1 folgendermaßen zu formulieren:

Die Verteilung der zukünftigen jährlichen Grundwasserneubildungshöhen unterscheidet sich signifikant von der Verteilung der jährlichen Grundwasserneubildungshöhen der Referenzperiode.

Die Wahrscheinlichkeit, die Nullhypothese H_0 (keine signifikante Änderung) fälschlicherweise zurückzuweisen, wird auf 15 % festgelegt, d.h., das Signifikanzniveau α beträgt 0,15. Dieses Signifikanzniveau wurde auch von Pfeifer et al. (2015) für die Erstellung deutschlandweiter Klimasignalkarten festgelegt und wird daher aus Gründen der Vergleichbarkeit hier übernommen. Die theoretischen Aspekte und genauen Berechnungsschritte zum U-Test können Sachs et al. (2009) entnommen werden. Es resultiert eine Wahrscheinlichkeit p des berechneten U-Wertes unter Annahme der Nullhypothese H_0 . Ist p kleiner als das Signifikanzniveau α , wird H_0 abgelehnt und es wird geschlussfolgert, dass H_1 wahrscheinlicher ist, dass demnach eine signifikante Veränderung der Grundwasserneubildung vorliegt.

Die folgenden Beispiele illustrieren die Interpretation des U-Tests im Hinblick auf eine zukünftige Grundwasserbewirtschaftung. Die Abbildung 7 zeigt dazu zwei projizierte Zeitreihen der Grundwasserneubildung im Sauer- und Siegerland. Die Tabelle 4 listet die zugehörigen Kennzahlen. Die Zeitreihen sind zusammengesetzt aus den jeweiligen historischen Projektionen (1971 – 2005) und einer RCP-Szenario-basierten Projektion in die Zukunft (2006 – 2100). Beide Beispiele basieren auf dem RCP8.5-Szenario („Weiter-wie-bisher-Szenario“) und dem Regionalmodell CCLM 4-8-17, unterscheiden sich jedoch im antreibenden Globalmodell (MPI-M-MPI-ESM-LR vs. CCCMa-CanESM2; Bezeichnungen siehe Tabelle 2 und Tabelle 3). Das bedeutet, die dargestellten Entwicklungswege sind nur durch den unterschiedlichen Einfluss der beiden Globalmodelle begründet.

Deutlich sichtbar variiert die Grundwasserneubildung um die jeweiligen Mittelwerte der 30-Jahre-Perioden. Für die Projektionen R85-MP1-CLM und HIS-MP1-CLM (Abbildung 7 oben) resultiert ein kontinuierlicher leichter Anstieg der langjährigen Mittelwerte von 134 auf 145 mm/a. Die Wahrscheinlichkeit p sinkt von Periode zu Periode, unterschreitet jedoch nicht das Signifikanzniveau von 0,15. Demnach lautet die Schlussfolgerung, dass sich die projizierten Verteilungen der zukünftigen Grundwasserneubildung nicht signifikant von der aus der Gegenwart bekannten Grundwasserneubildung unterscheiden. Die durch das RCP8.5-Szenario hervorgerufenen Änderungen im klimatischen Antrieb des Modells mGROWA führen insgesamt nicht zu einem grundlegend veränderten Grundwasserneubildungs-Regime und damit nicht zu einem veränderten Grundwasserdargebot, welches evtl. Anpassungen in der Grundwasserbewirtschaftung erlauben würde. Auf diesem Entwicklungspfad kann kein im Vergleich zur Gegenwart um mehrere Millimeter pro Jahr erhöhtes Niveau der Grundwasserneubildung erwartet und verplant werden.

Für die Projektionen R85-CA2-CLM und HIS-CA2-CLM (Abbildung 7 unten) resultiert ein kontinuierlicher erst nur leichter und später stärker werdender Rückgang der langjährigen Mittelwerte von 121 auf 95 mm/a. Die Wahrscheinlichkeit p sinkt ebenfalls von Periode zu Periode, und unterschreitet dann mit 0,01 das Signifikanzniveau von 0,15 in der letzten Periode 2071 – 2100 deutlich. Demnach lautet die Schlussfolgerung, dass sich die projizierte Verteilung der zukünftigen Grundwasserneubildung in dieser Zukunft dann signifikant von der aus der Gegenwart bekannten Grundwasserneubildung unterscheidet. Die durch das RCP8.5-Szenario hervorgerufenen Änderungen im klimatischen Antrieb des Modells mGROWA führen insgesamt zu einem grundlegend veränderten Grundwasserneubildungs-Regime und damit zu einem geringeren Grundwasserdargebot, welches evtl. Anpassungen in der Grundwasserbewirtschaftung notwendig machen könnte. Auf diesem Entwicklungspfad wird ein im Vergleich zur Gegenwart um mehr als 20 mm/a reduziertes Niveau der Grundwasserneubildung erwartet.

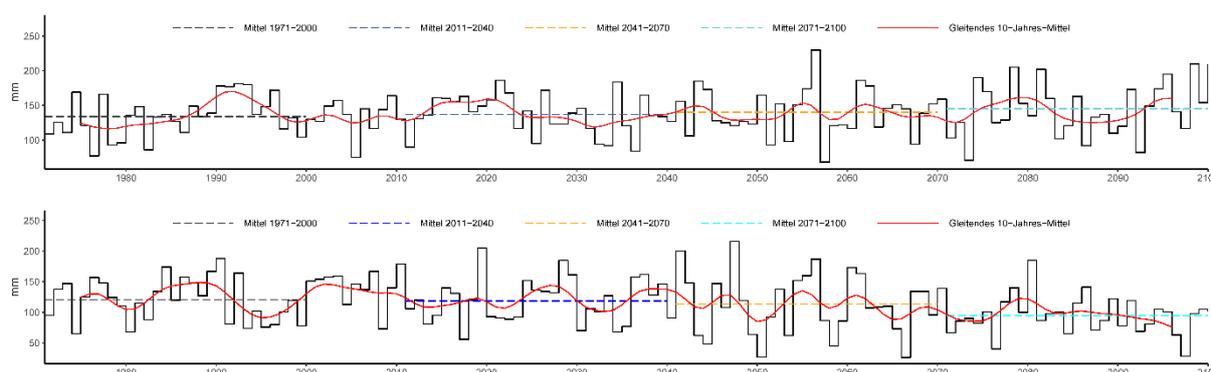


Abbildung 7: Projizierte Zeitreihen der jährlichen Grundwasserneubildung im Sauer- und Siegerland als Ergebnis der Projektionen R85-MP1-CLM nach HIS-MP1-CLM (oben) und R85-CA2-CLM nach HIS-CA2-CLM (unten).

Tabelle 4: Langjährige Mittelwerte der Grundwasserneubildung und Ergebnisse des U-Tests für die in Abbildung 7 dargestellten projizierten Zeitreihen. p bezeichnet die Wahrscheinlichkeit des berechneten U-Wertes unter Annahme der Nullhypothese H_0 . p kleiner 0,15 ist fett dargestellt und bedeutet eine signifikante Veränderung der Grundwasserneubildung in der jeweiligen Periode.

Projektionen	1971 – 2000	2011 – 2040		2041 – 2070		2071 – 2100	
	Mittelwert in mm/a	Mittelwert in mm/a	p	Mittelwert in mm/a	p	Mittelwert in mm/a	p
R85-MP1-CLM nach HIS-MP1-CLM	134	137	0.65	140	0.51	145	0.23
R85-CA2-CLM nach HIS-CA2-CLM	121	118	0.80	114	0.49	95	0.01

Für eine Bewertung der Robustheit von Ensembleprojektionen haben Pfeifer et al. (2015) eine statistische Methodik und Visualisierung mit Hilfe von Klimasignalkarten vorgeschlagen, sowie für Deutschland auf die Änderung saisonaler und extremer Niederschläge angewendet. Eben-diese Methodik wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit mit denselben Entscheidungskrite-rien (Signifikanzniveaus) angewendet, um die Robustheit der projizierten Änderungssignale der Grundwasserneubildung in NRW auf der Ensemble-Ebene zu bewerten. Pfeifer et al. (2015) definieren Robustheit als Kombination aus Übereinstimmung im Vorzeichen der projizierten Änderungssignale im gesamten Ensemble (engl. test for agreement) und der statistischen Signifikanz der Änderungen in individuellen Projektionen (engl. test for significance), d.h. die Bewertung erfolgt anhand von zwei zu erfüllenden Kriterien.

Der Test auf Übereinstimmung im Vorzeichen der Änderungssignale ist erfüllt, wenn jeweils mindestens 66 % der Mitglieder in den RCP-Teilensembles eine Zu- oder Abnahme der 30-jährigen Mittelwerte der Grundwasserneubildung für die 3 zukünftigen Perioden gegenüber der historischen Referenzperiode projizieren. Als Test auf Signifikanz der Änderungssignale

wird von Pfeifer et al. (2015) der oben eingeführte U-Test durchgeführt. Der Test auf Signifikanz ist erfüllt, wenn jeweils mindestens 66 % der Mitglieder in den RCP-Teilensembles („Klimaschutz-Szenario“, „Stabilisierungs-Szenario“ und „Weiter-wie-bisher-Szenario“) signifikante Änderungen in der Verteilung der Jahreswerte aufweisen.

Des Weiteren kann neben einem Trend hin zu einer veränderten Verteilung der jährlichen Grundwasserneubildung – mit der meist ein veränderter langjähriger Mittelwert einhergeht – auch ein monotoner Trend innerhalb einer diskreten Zeitspanne ausgeprägt sein. Die Zeitreihe der jährlichen Grundwasserneubildung entwickelt sich dann relativ kontinuierlich in Richtung einer Zu- oder Abnahme. Ein monotoner Trend kann mit Hilfe des Mann–Kendall-Trendtests (Kendall, 1938; Mann, 1945) auf einem vorausgesetzten Signifikanzniveau nachgewiesen werden. In Analogie zum U-Test wird dabei eine Wahrscheinlichkeit unter Annahme der Nullhypothese H_0 (kein monotoner Trend) bestimmt und dann auf eine Alternativhypothese H_1 (monotoner Trend) geschlossen. Der Mann–Kendall-Trendtests wurde im Rahmen dieser Studie nur auf die Zeitreihen der jährlichen Grundwasserneubildung angewendet, die aus mGROWA-Simulationen zum beobachteten Referenzniveau resultieren (Kapitel 4). Als Signifikanzniveau wurde ebenfalls 0,15 festgelegt.

3 Ergebnisse aus der Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA

Die mit der Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA durchgeführten Projektionen können im Hinblick auf die Veränderung verschiedener Wasserhaushaltsgrößen ausgewertet werden. Mit denselben Methoden können auch die Änderungssignale in den verwendeten Klimagrößen analysiert werden. Im Rahmen der hier vorliegenden Studie lag der Analysefokus auf der Erneuerung der Grundwasserressourcen. Aus diesem Grund behandeln die folgenden Kapitel nur die projizierte Grundwasserneubildung detailliert. Eine analoge Aufbereitung wäre jedoch auch beispielsweise für den Gesamtabfluss oder die simulierte Abflussbildung in urbanen Räumen möglich, was für die Bewirtschaftung urbaner Abflussmengen von Interesse sein kann.

3.1 Rest-Bias der Grundwasserneubildung in der projizierten historischen Referenzperiode

Die mit dem Ensemble für die historische Referenzperiode 1971 – 2000 (Tabelle 3) projizierten Grundwasserneubildungshöhen weisen in den einzelnen Projektionen im Vergleich zur Referenzsimulation auf Basis beobachteter Klimadaten (Abbildung 1) einen räumlich unterschiedlich ausgeprägten sogenannten Rest-Bias auf. Die Methodik zur Bewertung dieses Rest-Bias wurde bereits im Kapitel 2.2 eingeführt. Im Folgenden werden die Ursachen für den Rest-Bias und die jeweiligen räumlichen Ausprägungen in den historischen Projektionen dargestellt.

Der Rest-Bias der projizierten Grundwasserneubildung ist durch mehrere methodisch bedingte und sich in ihrer Wirkung überlagernde Ursachen begründet, und ein starkes Argument dafür, dass Änderungssignale der Grundwasserneubildung immer innerhalb einer konsistenten Simulation berechnet werden sollten und nicht zwischen einem beobachteten Referenzniveau und einer Projektion.

- Die Klimaprojektionen mit RCMs sind auch nach einer Bias-Korrektur generell nicht zeitpunktgenau. Das heißt, sie bilden nicht die Wetterlagen der Vergangenheit in ihrer zeitlichen Reihenfolge exakt ab, sondern zielen auf die Reproduktion langjähriger Klimastatistiken (z.B. Mittelwerte des Niederschlags). Dabei können die interannuellen Variationen und die saisonalen Variationen eines einzelnen Jahres individuell von realen Abläufen abweichen.
- Für die Bias-Korrektur des Niederschlages wurde mit HYRAS (Rauthe et al., 2013) ein anderer Datensatz verwendet, als für die mGROWA-Simulation zur Bestimmung des beobachteten Referenzniveaus.
- Zusätzlich weisen weitere projizierte Klimagrößen (z.B. Temperatur, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit, etc.) mit Relevanz für die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration über Gras (klimatischer Input für mGROWA) einen – wenn auch häufig geringen – Bias auf (z.B. Willkofer et al., 2018), der jedoch in vielen Fällen nicht korrigiert werden kann oder sollte (Erläuterungen in Ehret et al., 2012), und der auch im Rahmen dieser Studie nicht korrigiert wurde.
- Letztendlich sind auch die für die Bias-Korrektur verwendeten Verfahren aus methodischer Sicht immer in ihrer Wirkung begrenzt, d.h. sie sind nicht in der Lage, alle Parameter einer Klimastatistik in gleicher Qualität an die beobachteten Parameter exakt

anzupassen (Reproduktion der Extremwerte, saisonale Verteilung und Mittelwerte, Korrekte Anzahl an Tagen mit Nieselregen, etc.).

Aus Gründen der Vollständigkeit sollte nicht unerwähnt bleiben: der Rest-Bias der für die historische Referenzperiode projizierten Grundwasserneubildung variiert räumlich auch aufgrund eines komplexen Zusammenspiels aus den Klimasignalen der RCMs und der Parametrisierung einzelner Standorte in mGROWA.

Die räumlichen Verteilungen der Kennzahlen NSE, PBIAS und RMSE (eingeführt in Kapitel 2.2) sind in Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt. Grundlage für die Berechnung bilden für jede Rasterzelle die jeweiligen Jahressummen der Grundwasserneubildung in der Periode 1971 – 2000. Damit zielen diese Kennzahlen auf die Darstellung und Bewertung der **Güte der zeitlichen Muster**. NSE und PBIAS wurden als Performance-Kennzahlen zur Referenzsimulation (auf Basis beobachteter Klimadaten) berechnet. RMSE wurde hingegen bezogen auf die jeweiligen langjährigen Mittelwerte in den Rasterzellen berechnet und kann daher für eine Gegenüberstellung der zeitlichen Dispersion um den langjährigen Mittelwert herangezogen werden. Die Tabelle 5 listet die Mediane der räumlichen Verteilungen der Kennzahlen. Diese Mediane beziehen sich auf das gesamte Modellgebiet, d.h. das gesamte Land NRW. Der RMSE für die Referenzsimulation wurde zu 52 mm/a bestimmt.

Tabelle 5: Mediane (landesweit) der in Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellten Kennzahlen der historischen Projektionen.

Historische Projektion	PBIAS in %	NSE	RMSE in mm/a
HIS-E12-CLM	-10,8	0,79	54
HIS-HG2-CLM	-3,0	0,83	47
HIS-MP1-CLM	-14,1	0,72	42
HIS-CA2-CLM	-5,9	0,80	52
HIS-MI5-CLM	-8,2	0,64	62
HIS-E12-RAC	-10,9	0,78	49
HIS-HG2-RAC	-6,3	0,85	45
HIS-E01-RAC	-7,5	0,81	41
HIS-E12-RCA	-1,8	0,86	48
HIS-HG2-RCA	4,3	0,86	45
HIS-MP1-RCA	3,9	0,87	38
HIS-IP5-RCA	-1,7	0,81	40
HIS-MP1-R09	-6,0	0,79	47
HIS-MP2-R09	-8,1	0,72	52
HIS-CA2-R15	-5,6	0,83	46
HIS-E12-R15	-3,8	0,85	51
HIS-HG2-R15	0,8	0,81	43
HIS-MI5-R15	-2,4	0,84	49

Hinsichtlich der prozentualen Über- und Unterschätzung des beobachteten Referenzniveaus befinden sich die Mediane aller Projektionen in einer Spannweite von -14 % bis +5 %, die für hydrologische Modelle im Vergleich zu beobachteten Abflusszeitreihen als gute ($< \pm 15\%$) bis sehr gute ($< \pm 10\%$) Modellperformance bezeichnet wird (Moriasi et al., 2007). Tendenziell kann demnach der Rest-Bias der projizierten Grundwasserneubildung als relativ gering eingestuft werden, wobei auffällig ist, dass ein größerer Teil der Projektionen zu einer leichten Überschätzung (negative Werte) neigt. In den Karten der Abbildung 8 sind Projektionen mit eher kleinräumiger stärkerer räumlicher Variabilität von PBIAS sichtbar, beispielsweise HIS-HG2-RAC. Diese Variabilität des Rest-Bias lässt sich durch die oben erläuterte Überlagerung verschiedener Ursachen erklären.

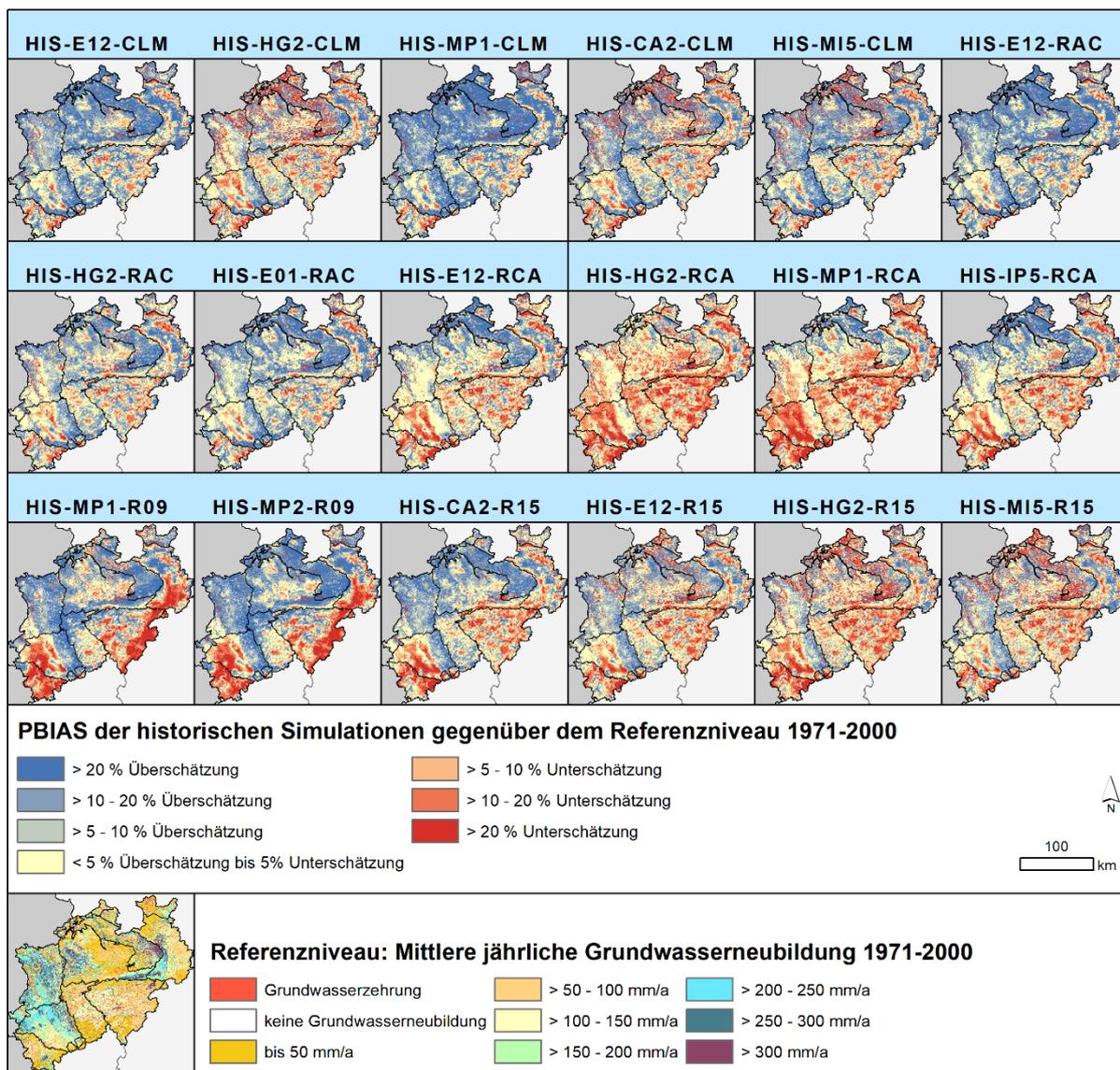


Abbildung 8: PBIAS der historischen Simulationen gegenüber dem Referenzniveau 1971 – 2000. Hydrogeologische Raumgliederung wie in Abbildung 4.

Es sind jedoch auch Projektionen auffällig (z.B. HIS-MP1-R09) die einen stärkeren Kontrast von positivem und negativem Rest-Bias zwischen größeren zusammenhängenden Regionen aufweisen. In diesen Fällen scheint die Bias-Korrektur die Schwächen der RCMs in der Auflösung der durch das Relief bedingten Niederschläge weniger gut auszugleichen. Die Identifizierung genauer Ursachen für den Rest-Bias auf einzelnen Rasterzellen oder kleinen Gebiets-einheiten ist eine eher spekulative Angelegenheit. Dies ist auch eines der Argumente für die Betrachtung von Änderungssignalen der Grundwasserneubildung, die auf größere Gebiets-einheiten aggregiert wurden.

Mit NSE wurde ein Gütemaß auf die Jahressummen der Grundwasserneubildung angewendet (Abbildung 9), welches ebenfalls in hydrologischen Simulationen für den Vergleich von Zeitreihen breite Anwendung findet. Im Wert von NSE spiegelt sich stärker als in PBIAS die Qualität der Abbildung der statistischen Verteilung (Dispersion) der Jahressummen der Grundwasserneubildung über die 30-Jahre-Periode wider. Werte größer als 0,75 können als „sehr gute“ Modellperformance interpretiert werden (Moriasi et al., 2007). Dies ist für fast alle Mediane von

NSE der Fall (Tabelle 5). Eine Ausnahme bildet HIS-MI5-CLM mit einem Wert von 0,64. Dieser kann jedoch noch als „gut“ eingestuft werden.

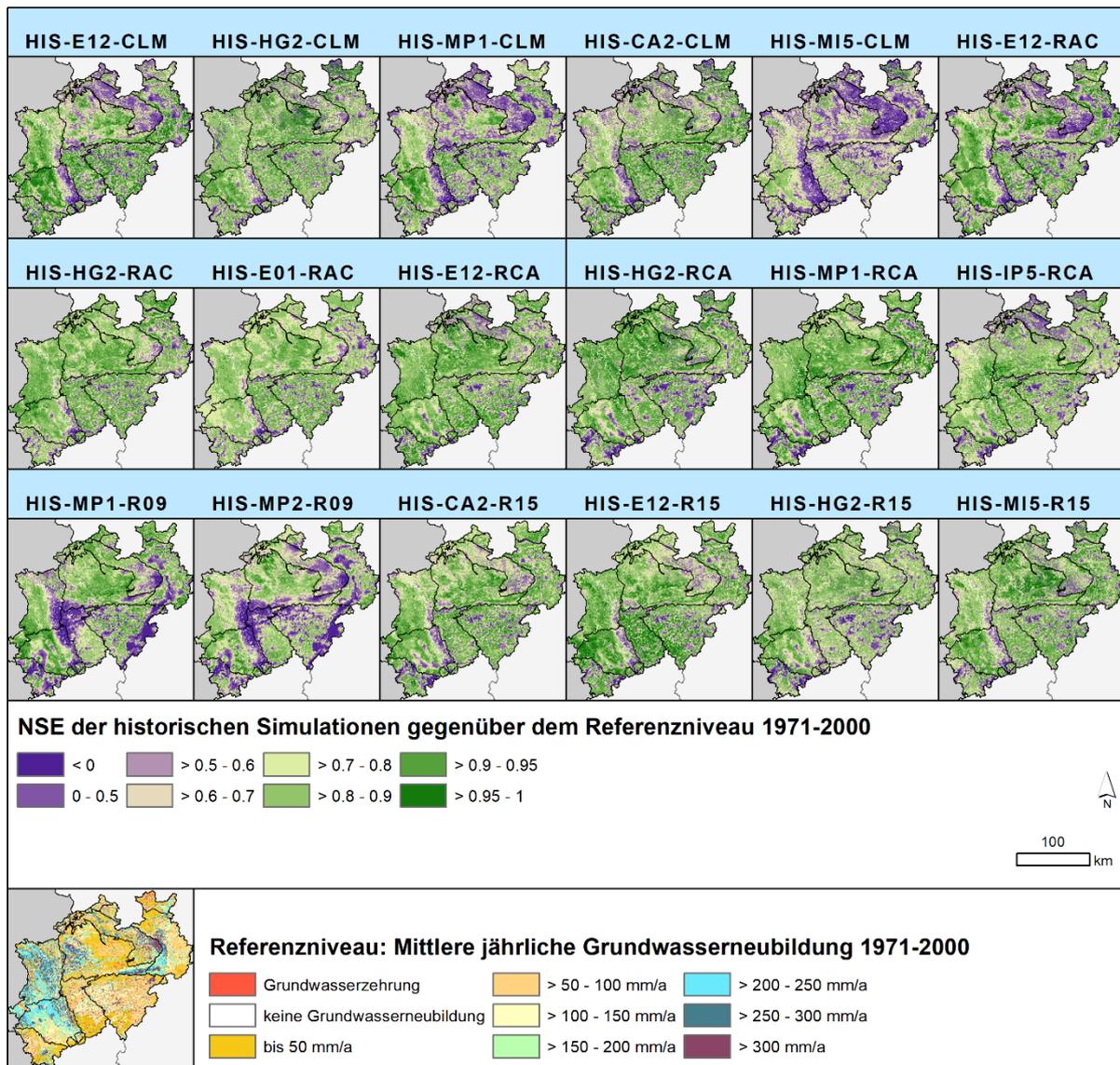


Abbildung 9: NSE der historischen Simulationen gegenüber dem Referenzniveau 1971 – 2000. Hydrogeologische Raumgliederung wie in Abbildung 4.

Bemerkenswert ist in einigen historischen Projektionen eine räumliche Übereinstimmung von Werten für NSE kleiner als 0,5 mit grundwasserbeeinflussten Standorten (vgl. Abbildung 5 u. Abbildung 4; Sandmünsterland in der Westfälischer Bucht). Dies ist ein Hinweis darauf, dass in diesen Projektionen insbesondere die Grundwasserzehrung während des Sommerhalbjahres fehler eingeschätzt wird. Die kleinräumigen Schwankungen von NSE in vielen Projektionen sind ebenfalls durch die oben diskutierten Ursachen für den Rest-Bias erklärbar. In einigen Projektionen treten jedoch auch größere zusammenhängende Flächen mit geringen NSE auf, die mit stärkeren Tendenzen zum Über- oder Unterschätzen (PBIAS, Abbildung 8) zusammenfallen (z.B. HIS-MP1-R09). NSE liefert in diesen Fällen Indizien für eine Erklärung. Der Rest-Bias ist dann stärker begründet durch eine schlechtere Abbildung der Relationen der Jahressummen der Grundwasserneubildung zueinander innerhalb der Zeitreihe (Dispersion) in der betreffenden Region und Projektion. Eine größere Anzahl extrem trockener oder feuchter

Jahre im Vergleich zur Referenzsimulation (auf Basis beobachteter Klimadaten) kann aber muss sich auf PBIAS nicht auswirken, NSE zeigt derartige Unterschiede in der Dispersion jedoch durch geringere Werte an.

Der Median von RMSE der Referenzsimulation beträgt 52 mm/a. Die Mediane von RMSE vieler Projektionen (Abbildung 10) liegen in einer ähnlichen Größenordnung (Tabelle 5), sind jedoch im Vergleich zur Referenzsimulation häufiger kleiner als größer. Größere Mediane von RMSE werden als eine stärkere und kleinere als eine weniger starke Ausprägung (Dispersion) von Nass- und Trockenjahren interpretiert. Die räumliche Verteilung von RMSE innerhalb einer Projektion ist stark von den Standorteigenschaften (Abbildung 5) abhängig. Zum Beispiel weisen gering durchlässige Festgesteinseinheiten mit einem geringen Grundwasserneubildungsniveau auch relativ geringe RMSE auf. Im Festgesteinsbereich sind demzufolge auch die Unterschiede von RMSE zwischen Referenzsimulation und den Projektionen weniger stark ausgeprägt. Bemerkenswert sind wieder die teilweise größeren Unterschiede von RMSE auf grundwasserbeeinflussten Standorten, z.B. im Sandmünsterland in der Westfälischer Bucht. Eine veränderte Ausprägung von Nass- und Trockenjahren wirkt sich auf die Grundwasserneubildung und -zehrung auf Standorten dieses Typs besonders deutlich aus.

Auf eine Darstellung der **Güte der räumlichen Muster** der projizierten langjährigen mittleren Grundwasserneubildung zielen die im Kapitel 2.2 eingeführten Taylor-Diagramme. Diese sind für das gesamte Modellgebiet NRW sowie die hydrogeologischen Großlandschaften in Abbildung 11 dargestellt. Bemerkenswert ist als Erstes, dass alle historischen Projektionen ein einziges relativ kompaktes Cluster bilden und nicht in Gruppen oder stärker verteilt in den Taylor-Diagrammen erscheinen. Die Abstände in den Kennzahlen innerhalb des Clusters sind meist geringer als die individuellen Abstände der Projektionen zur Referenzsimulation. Demnach ähneln sich die räumlichen Muster der Projektionen untereinander stärker als dem räumlichen Muster der Referenzsimulation. Dies ist hauptsächlich durch die Bias-Korrektur des Niederschlags und den dazu verwendeten HYRAS-Datenbestand, sowie die unterschiedlichen Regionalisierungsverfahren zur Erzeugung der Niederschlagsfelder für mGROWA begründet. Für die Referenzsimulation wurden vom DWD mit IDW interpolierte Raster der Monatssummen des Niederschlags verwendet (Herrmann et al., 2021; LANUV-Fachbericht 110, Teil IIa), wohingegen die Niederschlagsfelder der historischen Projektionen aus den Tagessummen an den Modellknoten der RCMs durch bilineare Interpolation erzeugt wurden.

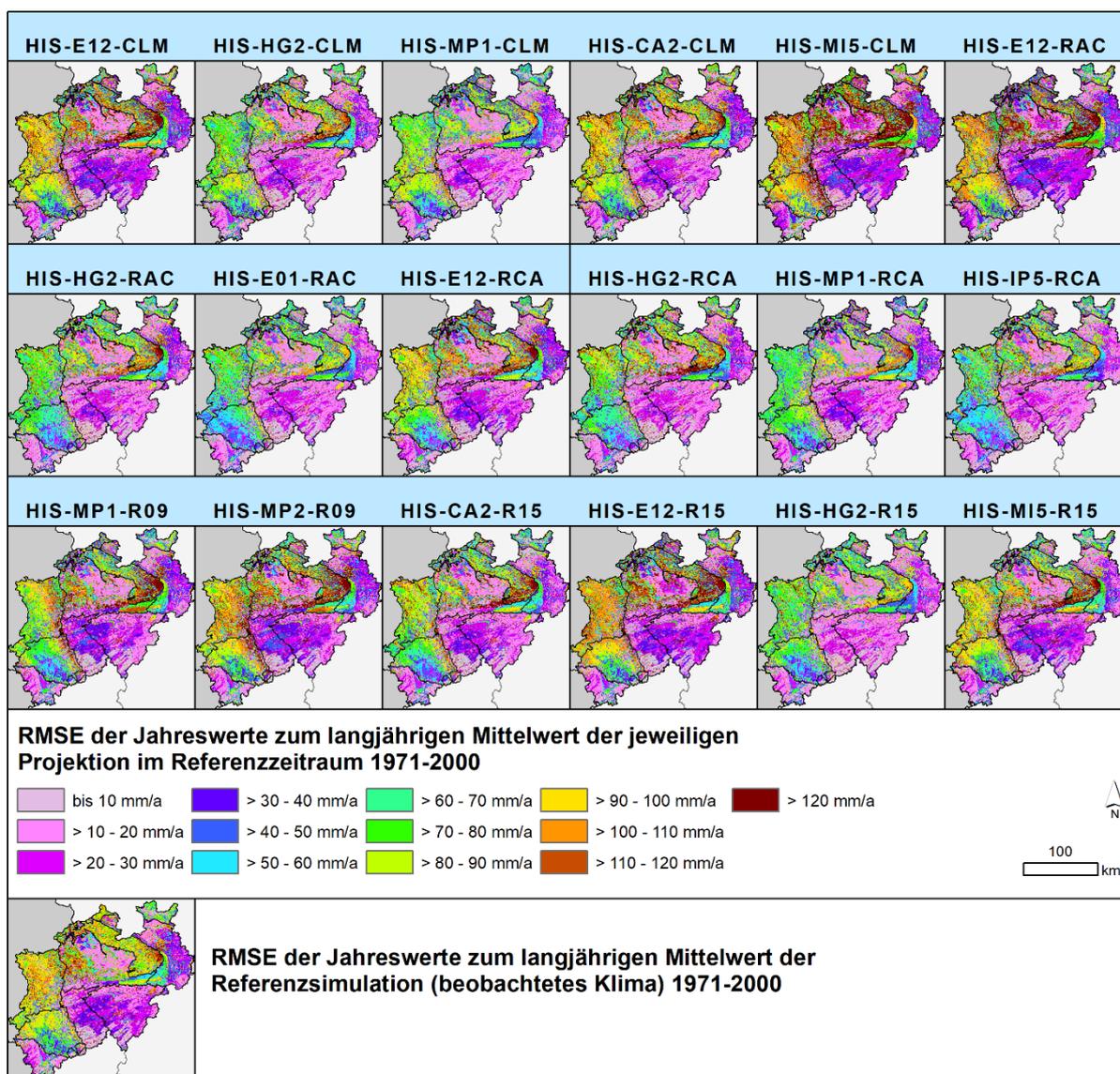


Abbildung 10: RMSE der Jahreswerte zum langjährigen Mittelwert der historischen Simulationen im Referenzzeitraum 1971 – 2000. Hydrogeologische Raumgliederung wie in Abbildung 4.

Aus regionalem Blickwinkel wird in der Niederrheinischen Bucht die höchste Güte der Abbildung der räumlichen Muster durch die historischen Projektionen erreicht. Der Cluster befindet sich sehr nahe am Punkt der Referenzsimulation (auf Basis beobachteter Klimadaten). Etwas geringer ist die Güte in der Eifel und im Niederrheinischen Tiefland einzuschätzen. Die relativ gesehen geringste Güte wird im Sandmünsterland in der Westfälischen Bucht erreicht, auch ist in dieser Großlandschaft das Cluster stärker auseinandergezogen (linienförmig), d.h. die Projektionen ähneln einander nicht im selben Maße wie in den stärker elliptischen Clustern. Als Ursache für diese relativ geringere Güte kann die vergleichsweise größere Anzahl grundwasserbeeinflusster und drainierter Standorte, also die standörtliche Variabilität, identifiziert werden.

Tendenziell liegen Projektionen mit Beteiligung des RCM RCA (dargestellt in Abbildung 11 als Kreuze) näher zum Punkt der Referenzsimulation, als beispielsweise Projektionen mit Beteiligung des RCM CLM (dargestellt in Abbildung 11 als gefüllte Kreise). Die RCMs unterscheiden sich demnach graduell untereinander in ihrer Stärke, regional und kleinregional belastbare

räumliche Verteilungen des Niederschlags und weiterer klimatischer Größen zu projizieren, die dann in mGROWA die räumlichen Muster der Grundwasserneubildung beeinflussen. Insgesamt sind jedoch keine Indizien erkennbar, die einen Ausschluss einer GCM-RCM-Kombination aus dem Ensemble rechtfertigen würden.

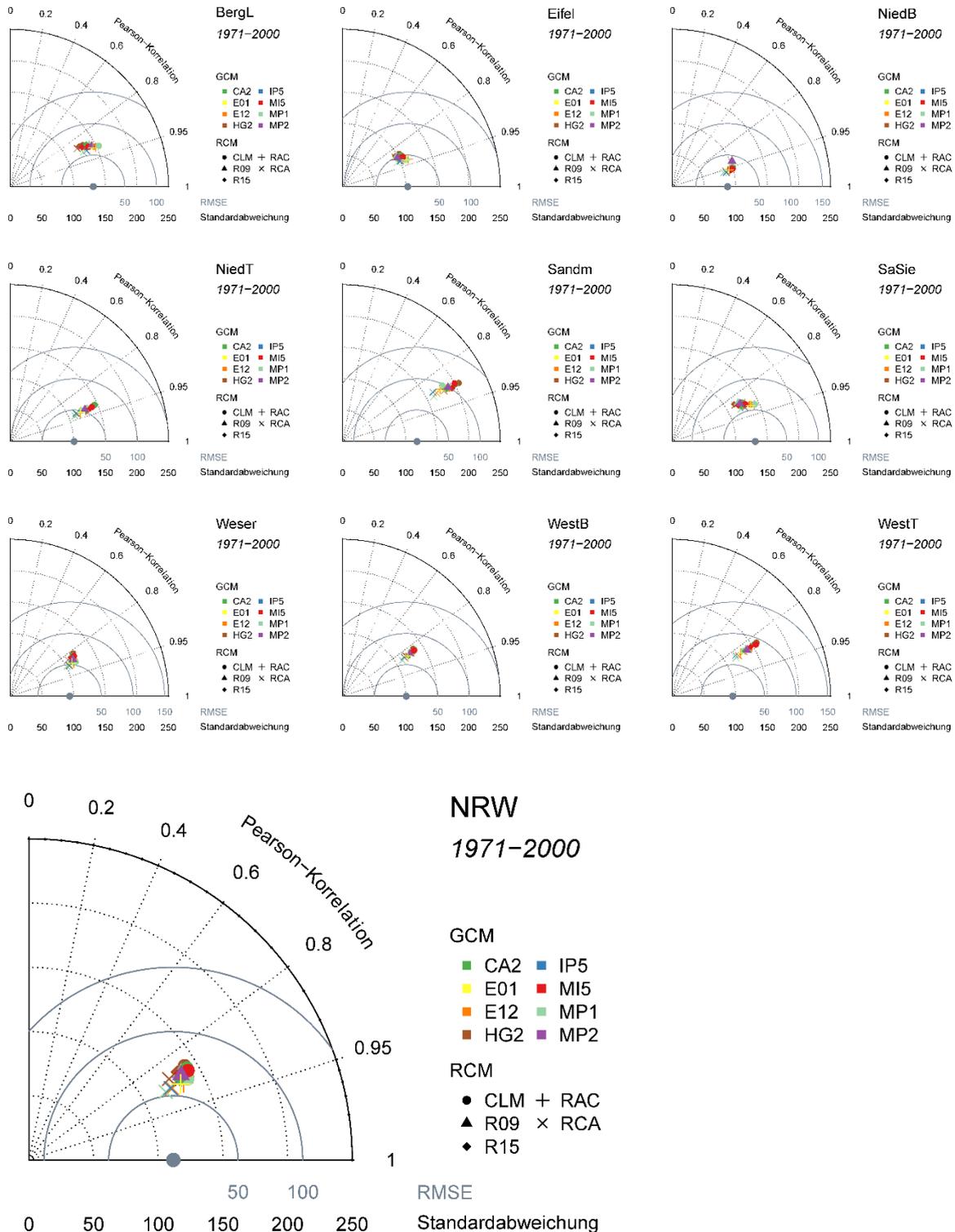


Abbildung 1: Taylor-Diagramme der historischen Projektionen berechnet für NRW und die hydrogeologischen Großlandschaften in Abbildung 4. RMSE und Standardabweichung in mm/a. Die Referenzprojektion ist durch den grauen Punkt gekennzeichnet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass aus methodischer Perspektive die Kenntnis des Rest-Bias einer projizierten Wasserhaushaltsgröße zur Reduzierung eines Teils der Unsicherheiten beiträgt, die weiterhin mit Ensembleprojektionen verbunden sind. In der Praxis sollte aufgrund des existierenden Rest-Bias weniger der Blick auf das absolute Niveau der projizierten Grundwasserneubildungshöhen gerichtet werden. Vielmehr sollten die Änderungssignale einer Projektion in Bezug zum Referenzniveau (auf Basis beobachteter Klimadaten) bewertet werden, um ein absolutes zukünftiges Niveau abzuschätzen.

3.2 Projizierte Änderung der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung

Die mit der Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA projizierten Zeitreihen der Grundwasserneubildung liegen in hoher räumlicher Auflösung – d.h. in NRW für insgesamt ca. 3,41 Millionen je 1 ha große Rasterzellen – vor. Die Karten in Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die räumlichen Muster der Änderungssignale der projizierten Grundwasserneubildung der 30-Jahre-Perioden 2011 – 2040, 2041 – 2070 und 2071 – 2100 gegenüber der projizierten historischen Referenzperiode 1971 – 2000. Die Zugehörigkeit der einzelnen Projektionen zu den RCP-Teilensembles ist farblich hinterlegt. In Grün erscheint das RCP2.6-Teilensemble („Klimaschutz-Szenario“), in Gelb das RCP4.5-Teilensemble („Stabilisierungsszenario“) und in Rot das RCP8.5-Teilensemble („Weiter-wie-bisher-Szenario“). Auf einen ersten Blick weisen die Projektionen teilweise sehr unterschiedliche räumliche Muster der Änderungen der Grundwasserneubildung auf. Für die Beantwortung von grundwasserwirtschaftlichen Fragestellungen können diese Änderungen theoretisch auf beliebige Gebietskulissen aggregiert (gemittelt) werden. Im Rahmen der hier dokumentierten Studie wurde eine solche Aggregation exemplarisch für die in Abbildung 4 dargestellten hydrogeologischen Großlandschaften durchgeführt. Die aggregierten Änderungen der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung in den drei zukünftigen 30-Jahre-Perioden sind – aufgeteilt in RCP-Teilensembles – in Abbildung 15 als Boxplots dargestellt. Die in den vier Abbildungen dargestellten Änderungssignale werden im Folgenden aus der Ensemble-Perspektive gemeinsam erläutert.

Die in den Großlandschaften regional unterschiedlichen Änderungen der Grundwasserneubildung haben zwei wesentliche Ursachen. Einerseits variieren die klimatischen Änderungssignale (Niederschlag und potentielle Evapotranspiration) aus den RCMs auf der regionalen Skala. Änderungssignale des Niederschlags können beispielsweise in den Mittelgebirgen im Vergleich zu den Tieflandregionen unterschiedlich stark ausgeprägt sein. In den Karten (Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14) sind solche Muster für viele Ensemblemitglieder erkennbar. Zusätzlich hat die regionale Häufigkeit spezifischer lokaler Standorteigenschaften (z.B. BFI-Werte im Festgesteinsbereich) einen Einfluss, wie stark sich die klimatischen Änderungssignale und ihre zeitlichen Muster auf die Grundwasserneubildung auswirken.

Im Sandmünsterland in der Westfälischen Bucht dominieren beispielsweise künstlich entwässerte grundwasserbeeinflusste Standorte. Auf diesen Standorten findet zukünftig wahrscheinlich während der Sommermonate eine stärkere Grundwasserzehrung statt. Aufgrund eines projizierten höheren Niveaus der potentiellen Evapotranspiration im Sommerhalbjahr resultieren höhere mittlere Bodenfeuchtedefizite in der Wurzelzone über der Grundwasseroberfläche

und damit höhere kapillare Aufstiegsraten, d.h. negative Grundwasserneubildung im Sommerhalbjahr. Es wird im Wasserhaushaltsmodell mGROWA jedoch von langfristig konstanten Grundwasserflurabständen ausgegangen (dies ist eine Randbedingung), die nur im Jahresverlauf zwischen Hoch- und Niedrigständen schwanken. Deshalb wird in diesem Zusammenhang keine eventuell mögliche Tendenz zum langfristigen Absinken von Grundwasserständen berücksichtigt. Höhere Winterniederschläge können jedoch die Grundwasserzehrung nicht unbedingt vollständig ausgleichen (z.B. R85-MI5-CLM-mGROWA in Abbildung 13).

In der Eifel (mit Siebengebirge) fehlen Standorte mit geringen Grundwasserflurabständen weitgehend und es dominieren Festgesteinsstandorte. Eine sommerliche Grundwasserzehrung findet auf den Festgesteinsstandorten nicht statt. Es kann jedoch das komplexe Zusammenspiel von höheren Winterniederschlägen, einer höheren potentiellen Evapotranspiration und dem zeitlich variablen Bodenwasserspeicher in der regionalen Bilanz zu einer nur geringen Veränderung der Grundwasserneubildung führen. Die regional variierende nutzbare Feldkapazität der Böden hat dabei ebenfalls einen Einfluss auf den Zeitpunkt des Beginns der Grundwasserneubildungsperiode und damit auf die regionale Ausprägung der Änderungssignale (Herrmann et al., 2017).

Des Weiteren kann festgestellt werden (Abbildung 15), dass die Mediane in einem engen Bereich um Null streuen, d.h. im Mittel keine gravierende Veränderung der Grundwasserneubildung projiziert wird. Insgesamt zeigen mehr Mediane eine leichte Zunahme gegenüber dem Referenzniveau an, wobei insbesondere im RCP2.6-Teilensemble („Klimaschutz-Szenario“) in der ferneren Zukunft die Mediane auch wieder unter das Referenzniveau fallen. Im RCP4.5-Teilensemble („Stabilisierungs-Szenario“) und im RCP8.5-Teilensemble („Weiter-wie-bisher-Szenario“) sind nahezu alle Mediane positiv. Die Interquartilsabstände variieren einerseits in den Regionen und auch in den verglichenen Perioden. Im RCP2.6-Teilensemble nehmen sie mit der Zeit meist ab, wohingegen sie im RCP8.5-Teilensemble am Ende des Jahrhunderts eher zunehmen. Eine ebensolche Tendenz ist auch bei den Spannbreiten der extremen Entwicklungspfade erkennbar, wobei das RCP8.5-Teilensemble diesbezüglich die größten Spannbreiten aufweist.

Für das RCP2.6-Teilensemble kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die klimatischen Randbedingungen zum Ende des 21. Jahrhunderts ungünstiger für die Grundwasserneubildung werden könnten. Die Mediane und ebenso die oberen und unteren Quartile werden von Periode zu Periode kleiner, d.h. sie weisen immer stärker in Richtung einer Abnahme der Grundwasserneubildung. Davon wären alle Regionen NRW's in ähnlichem Ausmaß betroffen. Das RCP4.5-Teilensemble zeigt eher eine stabile Grundwasserneubildung auf einem leicht erhöhten Niveau. Im RCP8.5-Teilensemble streuen die Änderungssignale der Grundwasserneubildung deutlich stärker und auch extreme Entwicklungen können häufiger indiziert werden. Insgesamt ist keine eindeutig in allen hydrogeologischen Großlandschaften ausgeprägte einheitliche Richtung der Entwicklung zu erkennen. Tendenziell ist die Streuung im RCP8.5-Teilensemble stärker in den hydrogeologischen Großlandschaften ausgeprägt, in denen auch im RCP2.6-Teilensemble und im RCP4.5-Teilensemble größere Interquartilsabstände resultieren. Dies hat wahrscheinlich mehrere sich in ihrer Wirkung überlagernde Ursachen, die durch weitergehende Untersuchungen noch zu identifizieren wären. Insgesamt könnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass im RCP8.5-Teilensemble in allen zukünftigen Perioden eine höhere Grundwasserneubildung stattfinden könnte, jedoch die Unsicherheiten hinsichtlich der Ausprägung der klimatischen Randbedingungen am größten sind.

Als Resultat dieses vielfältigen Zusammenspiels tendieren letztendlich R85-MI5-CLM-mGROWA und R85-CA2-CLM-mGROWA zu einem sehr starken Rückgang der Grundwasserneubildung, weil das projizierte Klima im Sommerhalbjahr zu einer stärkeren Grundwasserzehrung führt, der im Winterhalbjahr nur eine geringe Veränderung der Grundwasserneubildung gegenübersteht. R85-CA2-CLM-mGROWA impliziert zusätzlich einen besonders stark ausgeprägten Rückgang der Sommerniederschläge (vgl. Hübener et al., 2017a). Mit R85-MP2-R09-mGROWA wird eine sehr starke Zunahme projiziert, weil vom RCM ein vergleichsweise starker Anstieg der Winterniederschläge projiziert wird (vgl. Hübener et al., 2017a), der viele andere Mechanismen überlagert. Die genannten Projektionen können als Begrenzungen der Bandbreite der Entwicklungspfade angesehen werden.

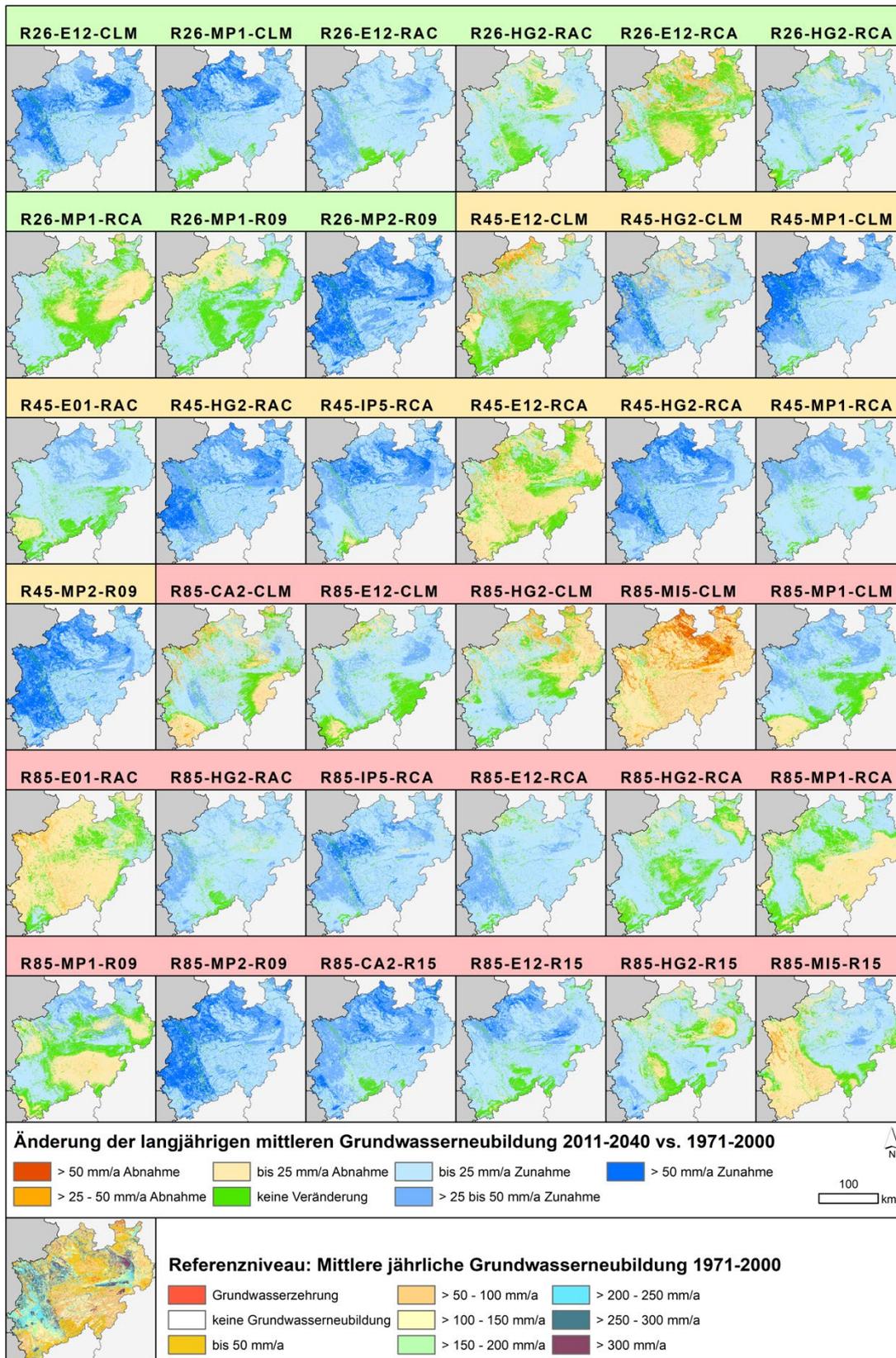


Abbildung 12: Räumlich verteilte Änderungssignale der projizierten Grundwasserneubildung (2011 – 2040 vs. 1971 – 2000). Unterste Zeile: Das Referenzniveau der Grundwasserneubildung in NRW simuliert auf Basis beobachteter Klimadaten. Das RCP2.6-Teilensembel („Klimaschutz-Szenario“) ist grün hinterlegt, das RCP4.5-Teilensembel („Stabilisierungs-Szenario“) ist gelb hinterlegt und das RCP8.5-Teilensembel („Weiter-wie-bisher-Szenario“) ist rot hinterlegt.

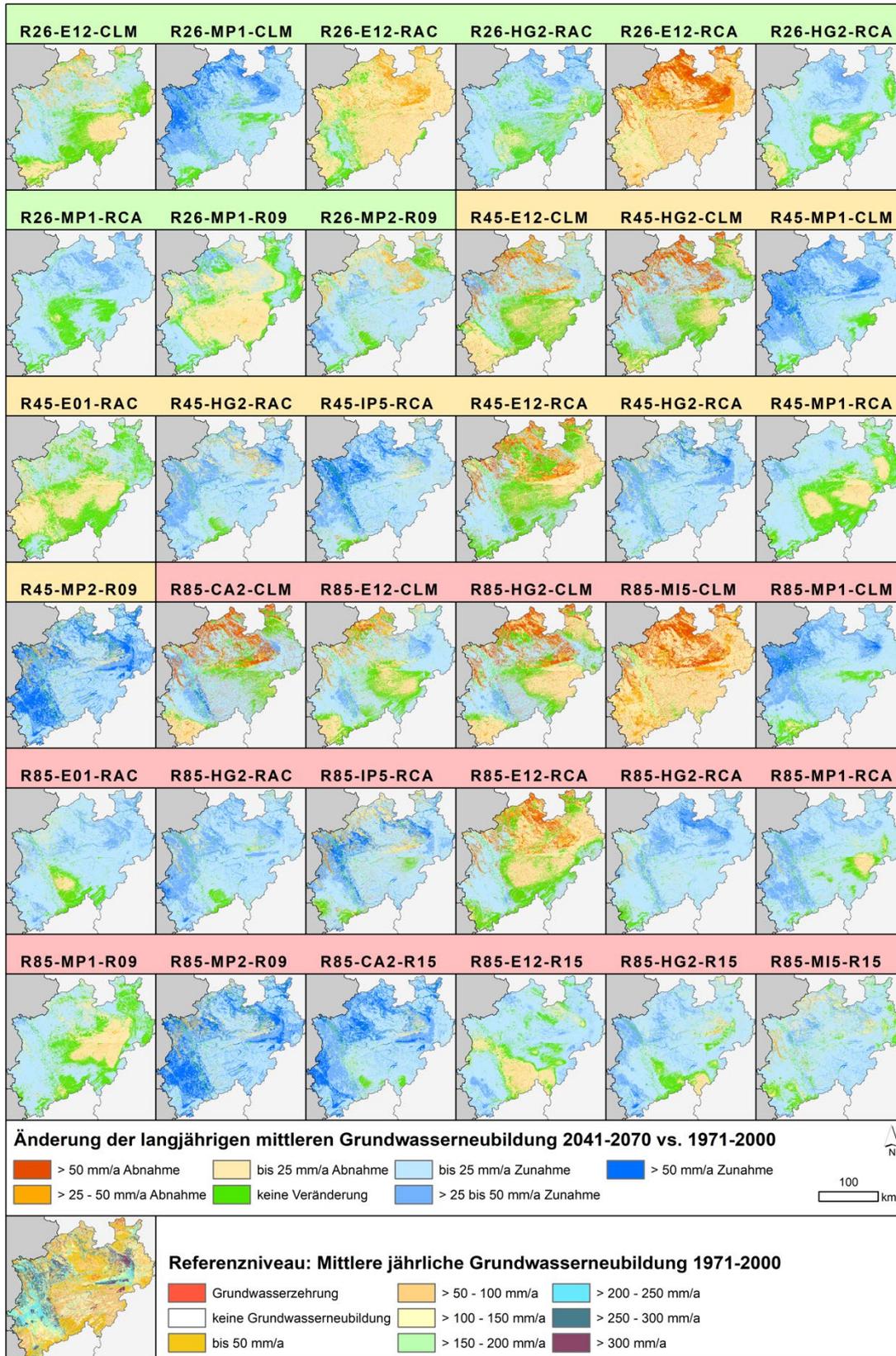


Abbildung 13: Räumlich verteilte Änderungssignale der projizierten Grundwasserneubildung (2041 – 2070 vs. 1971 – 2000). Unterste Zeile: Das Referenzniveau der Grundwasserneubildung in NRW simuliert auf Basis beobachteter Klimadaten. Das RCP2.6-Teilensemble („Klimaschutz-Szenario“) ist grün hinterlegt, das RCP4.5-Teilensemble („Stabilisierungs-Szenario“) ist gelb hinterlegt und das RCP8.5-Teilensemble („Weiter-wie-bisher-Szenario“) ist rot hinterlegt.

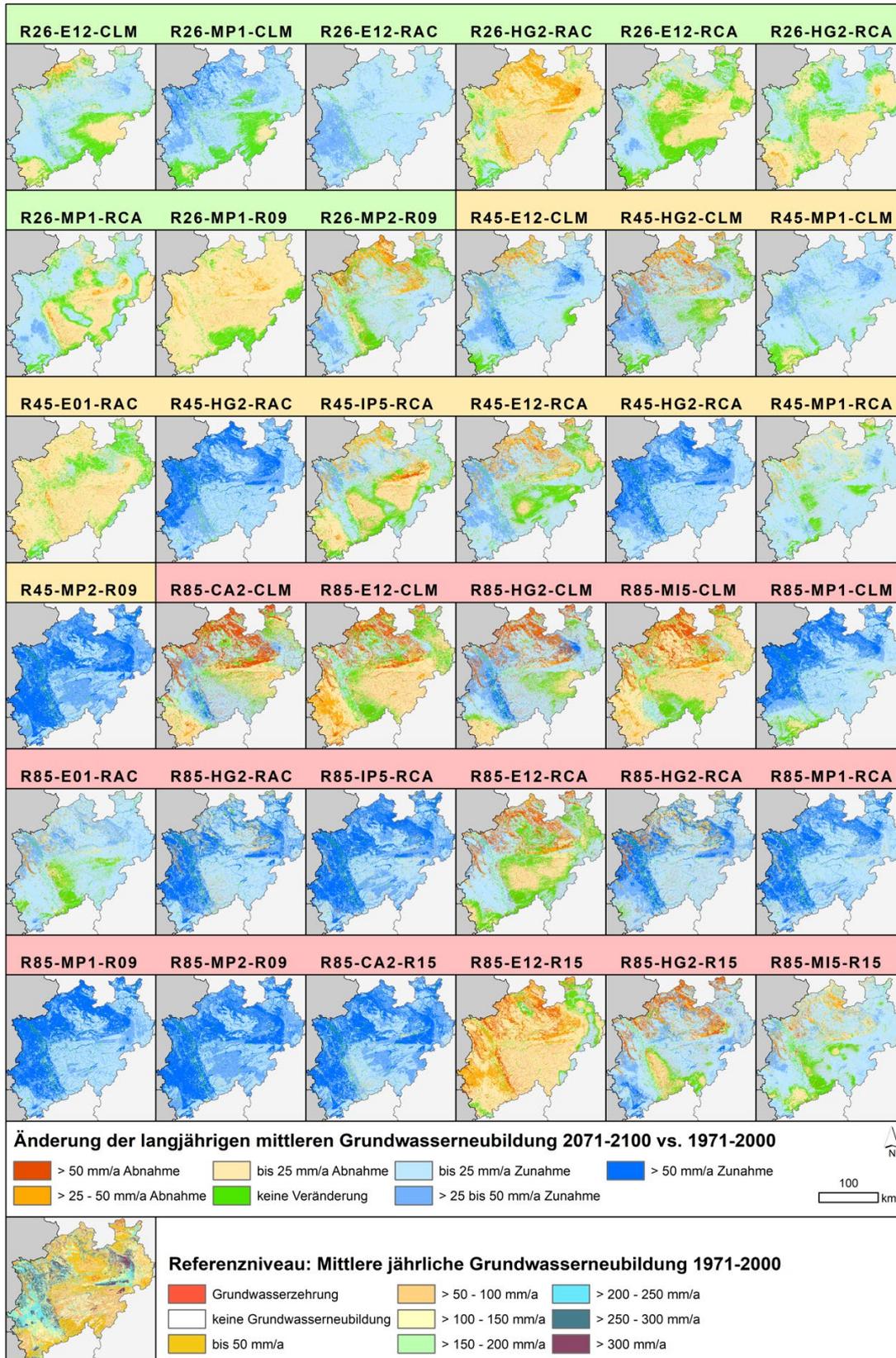


Abbildung 14: Räumlich verteilte Änderungssignale der projizierten Grundwasserneubildung (2071 – 2100 vs. 1971 – 2000). Unterste Zeile: Das Referenzniveau der Grundwasserneubildung in NRW simuliert auf Basis beobachteter Klimadaten. Das RCP2.6-Teilensemble („Klimaschutz-Szenario“) ist grün hinterlegt, das RCP4.5-Teilensemble („Stabilisierungs-Szenario“) ist gelb hinterlegt und das RCP8.5-Teilensemble („Weiter-wie-bisher-Szenario“) ist rot hinterlegt.

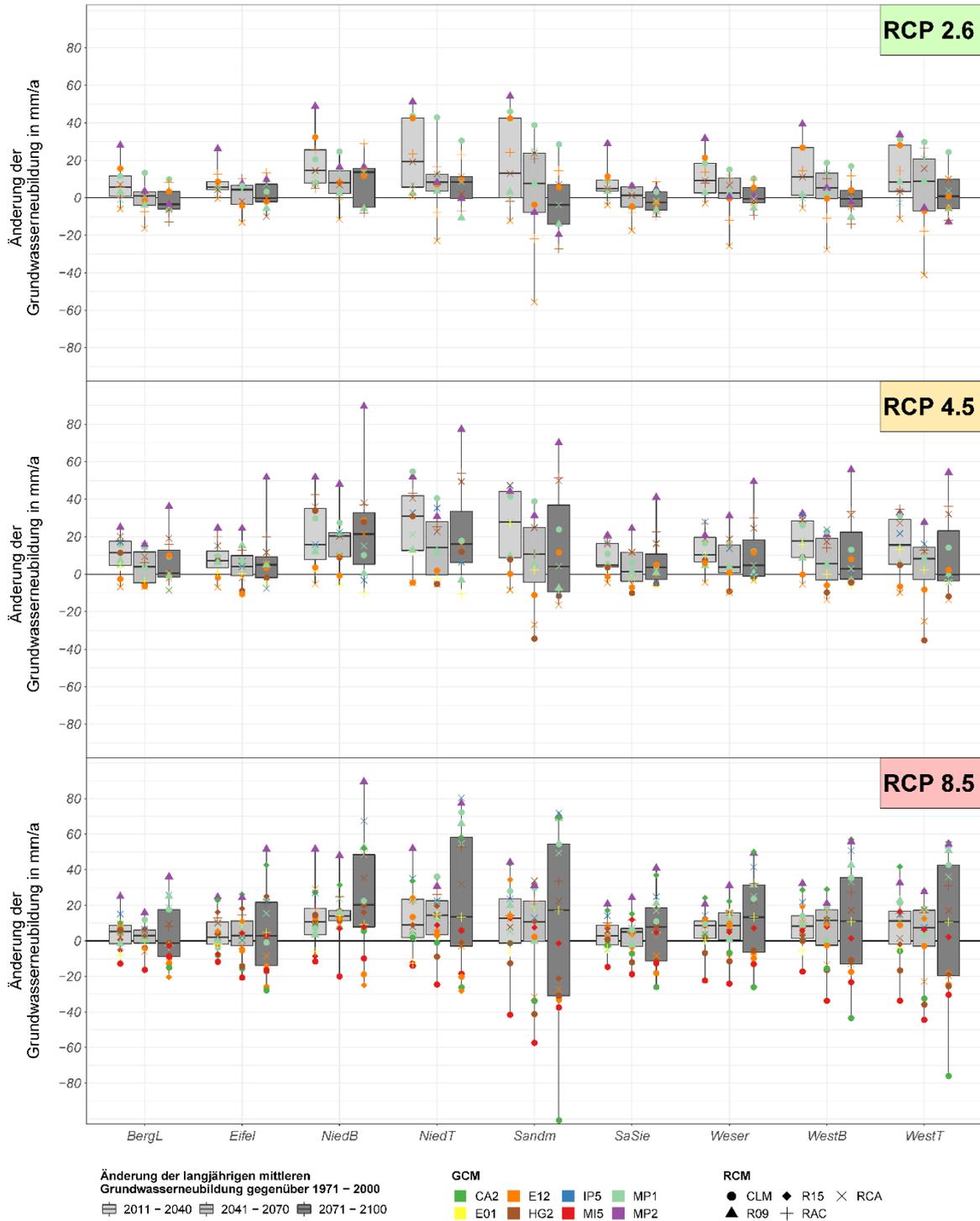


Abbildung 15: Boxplot der Änderungssignale der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung in den drei RCP-Teilensembles und den drei zukünftigen 30-Jahre-Perioden in den exemplarischen hydrogeologischen Großlandschaften (Benennung wie in Abbildung 4). Fette Linien in den Boxen kennzeichnen die Mediane, die Boxen begrenzen den Interquartilsabstand, d. h. 50 % der Werte. Das RCP2.6-Teilensemble („Klimaschutz-Szenario“) ist grün hinterlegt, das RCP4.5-Teilensemble („Stabilisierungs-Szenario“) ist gelb hinterlegt und das RCP8.5-Teilensemble („Weiter-wie-bisher-Szenario“) ist rot hinterlegt.

3.3 Trends in den projizierten Zeitreihen der Grundwasserneubildung – Steckbriefe für die hydrogeologischen Großlandschaften NRW's

Aus den Ensembleprojektionen resultieren eine Vielzahl rasterbasierter Zeitreihen der jährlichen Grundwasserneubildung, die im Rahmen der Studie für die in Abbildung 4 dargestellten hydrogeologischen Großlandschaften aggregiert wurden. Diese resultierenden Zeitreihen wurden hinsichtlich einer signifikanten Veränderung der Verteilung der Grundwasserneubildung (Änderungssignale) in den 30-Jahre-Perioden 2011 – 2040, 2041 – 2070 und 2071 – 2100 gegenüber der projizierten historischen Referenzperiode 1971 – 2000 mit Hilfe des in Kapitel 2.3 eingeführten U-Tests untersucht. Für alle Projektionen, Großlandschaften und 30-Jahre-Perioden stehen damit Aussagen zur Verfügung, ob ein signifikanter Trend hin zu einem veränderten Grundwasserneubildungs-Regime auf einem veränderten Niveau (höher oder niedriger) nachgewiesen werden konnte (Erläuterungen zur Interpretation siehe Kapitel 2.3). Die Ergebnisse wurden in Form sogenannter Steckbriefe automatisiert aufgearbeitet. Diese Steckbriefe sind als Begleitmaterial zum LANUV-Fachbericht 110 Teil IX unter folgender Adresse verfügbar:

https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30110j_begleitdokument.pdf

Die Steckbriefe für die Projektionen R85-CA2-CLM und R85-MP1-CLM sind exemplarisch in Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt und werden an dieser Stelle näher erläutert. Beide Projektionen gehören zum RCP8.5-Teilensemble („Weiter-wie-bisher-Szenario“) und wurden auch schon als Beispiele in Kapitel 2.3 besprochen. In der ersten Zeile enthalten die Steckbriefe die Zeitreihen der jährlichen Grundwasserneubildung. Die langjährigen Mittelwerte der betrachteten 30-Jahre-Perioden sind farblich unterschiedlich als gestrichelte Linien dargestellt. Außerdem wurde in Rot ein gleitender Mittelwert dargestellt, dieser illustriert die mittelfristigen Schwankungen in den Zeitreihen. In der zweiten Zeile folgen für die jeweilige hydrogeologische Großlandschaft Kartendarstellungen der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung in den 30-Jahre-Perioden. Die dritte Zeile beinhaltet die zugehörigen Änderungssignale sowie ganz links die Jahressummen der Grundwasserneubildung in Form von Dauerlinien. Diese Dauerlinien ergeben sich, wenn die Jahressummen der Grundwasserneubildung ihrer Größe nach sortiert und nummeriert werden (Rang). Aus ihnen lässt sich beispielsweise leicht ablesen, in wie vielen Jahren ein bestimmtes Niveau der Grundwasserneubildung über- oder unterschritten wird. Ein Vergleich dieser Dauerlinien vermittelt einen ersten schnellen Eindruck, inwieweit sich die Verteilungen zwischen den 30-Jahre-Perioden unterscheiden. Beispielsweise wird eine Veränderung der Anzahl der Jahre mit unterdurchschnittlicher Grundwasserneubildung leicht sichtbar. In der vierten Zeile folgen letztendlich farblich codierte Darstellungen der aggregierten Änderungssignale in den hydrogeologischen Großlandschaften NRW's, wenn durch den U-Test eine signifikante Änderung in der Zeitreihe (erste Zeile) nachgewiesen wurde (in Anlehnung an die Klimasignalkarten vorgeschlagen von Pfeifer et al., 2015). Grau bedeutet an dieser Stelle, dass für die entsprechende Großlandschaft in dieser Projektion keine signifikante Änderung vorliegt.

Für das Sauer- und Siegerland resultiert in der Projektion R85-CA2-CLM (Abbildung 16) eine signifikante Abnahme der jährlichen Grundwasserneubildung nur für die Periode 2071 – 2100. Die Dauerlinie der Periode findet sich vollständig unter der (projizierten) Dauerlinie der historischen Referenzperiode. Bemerkenswert ist, dass die Dauerlinie im Mittelteil vergleichsweise

flach verläuft (sie ist eher s-förmig), dass demnach in vielen Jahren geringere Schwankungen um den langjährigen Mittelwert auftreten, als dies in der Vergangenheit der Fall war. Die Dauerlinie der Periode 2041 – 2070 (eher linear) zeigt eine deutlich größere Bandbreite an Jahren mit sehr hoher und sehr geringer Grundwasserneubildung an. Für die Projektion R85-MP1-CLM (Abbildung 17) resultiert im Sauer- und Siegerland keine signifikante Änderung der Grundwasserneubildung, obwohl ein leichter Anstieg in der Zeitreihe und auch im Vergleich der Dauerlinien sichtbar ist. Derartige Änderungen sind in den Nachbargebieten stärker ausgeprägt und dort dementsprechend signifikant.

Projizierte Grundwasserneubildung in den Großlandschaften Nordrhein-Westfalens

Sauer- und Siegerland

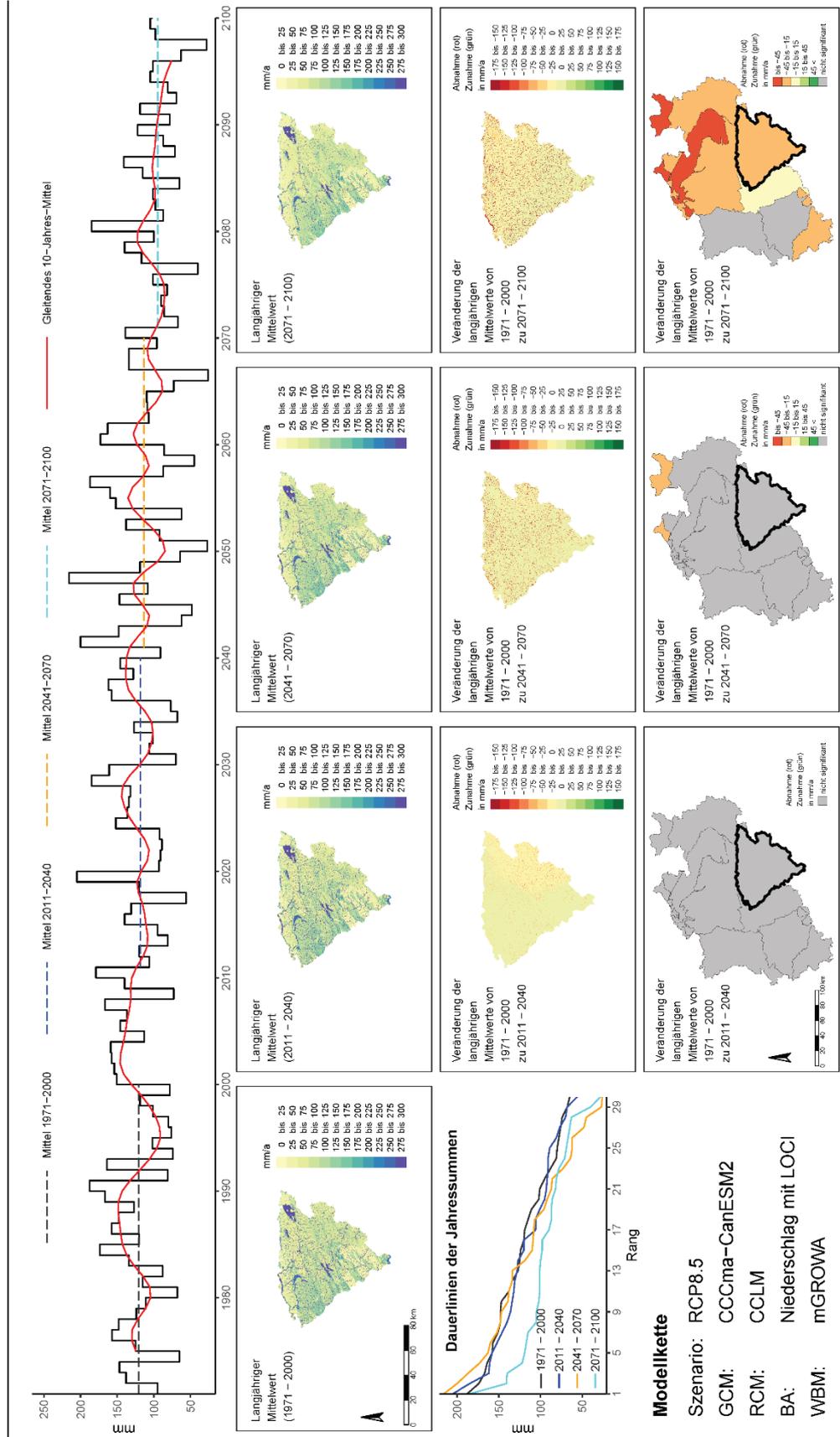


Abbildung 16: Mit R85-CA2-CLM projizierte Grundwasserneubildung im Sauer- und Siegerland.

**Projizierte Grundwasserneubildung
in den Großlandschaften
Nordrhein-Westfalens**

Sauer- und Siegerland

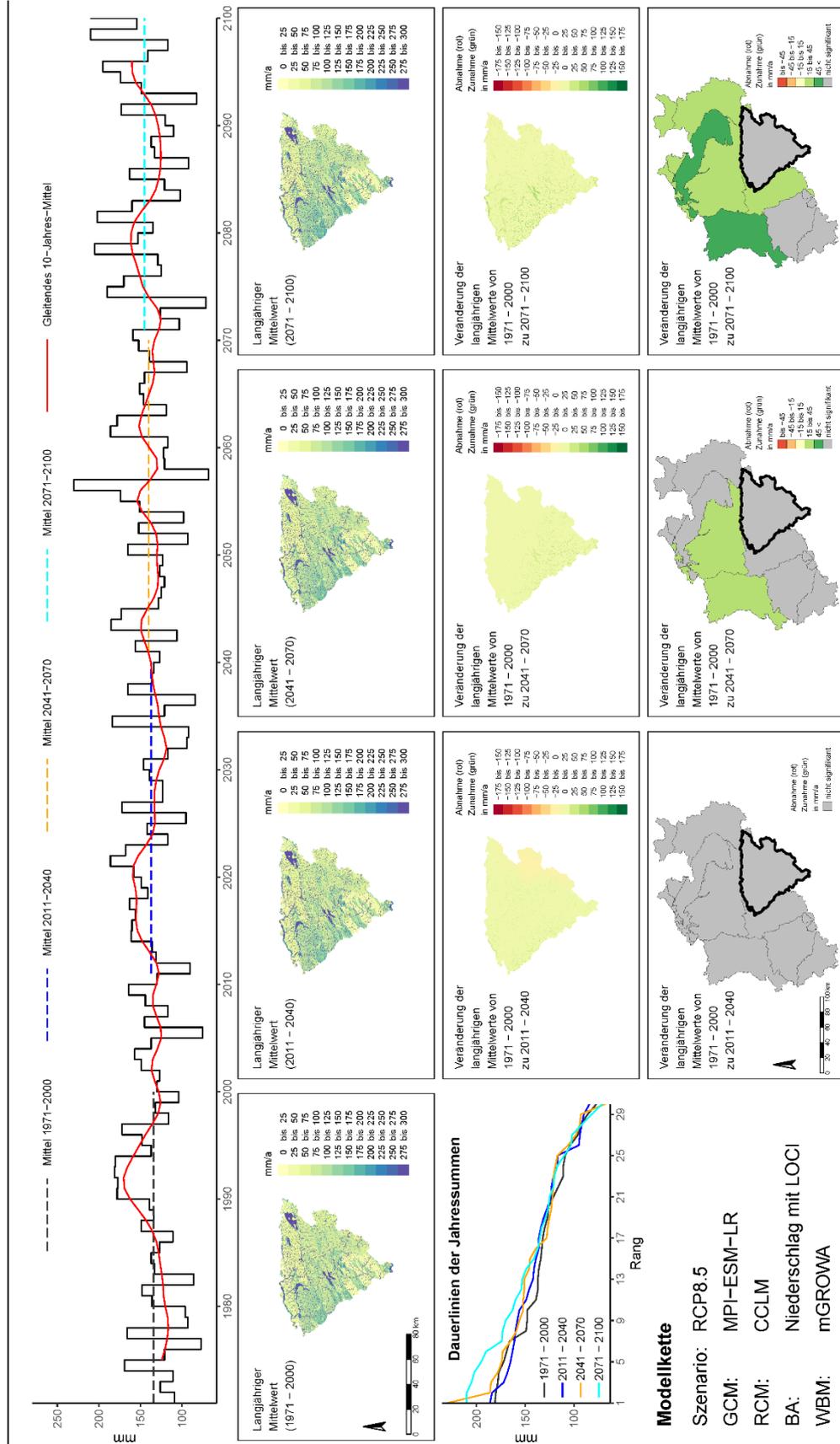


Abbildung 17: Mit R85-MP1-CLM projizierte Grundwasserneubildung im Sauer- und Siegerland.

3.4 Regional differenzierte Bewertung der Robustheit der Änderungssignale der Grundwasserneubildung

Im Hinblick auf mögliche Schlussfolgerungen für ein zukünftiges Grundwassermanagement ist von zentraler Bedeutung, ob durch das Ensemble insgesamt ein robustes Änderungssignal oder eher ein gleichbleibendes Niveau der Grundwasserneubildung projiziert wird. In Anlehnung an den von Pfeifer et al. (2015) vorgeschlagenen Test auf Robustheit von Ensembleprojektionen mit Hilfe von zwei Kriterien (Erläuterungen in Kapitel 2.3) werden in diesem Kapitel die Änderungen der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung aus der Ensemble-Perspektive dargestellt. Die von den RCP-Teilensembles projizierten Änderungssignale werden als robust angesehen, wenn jeweils mindestens 66 % der Ensemblemitglieder eine Zu- oder Abnahme der 30-jährigen Mittelwerte der Grundwasserneubildung für eine zukünftige Periode gegenüber der historischen Referenzperiode projizieren (Test auf Übereinstimmung) und wenn jeweils mindestens 66 % der Ensemblemitglieder eine signifikante Änderung in der Verteilung der Jahreswerte aufweisen (Test auf Signifikanz mit U-Test).

Zur besseren Übersicht sind für die RCP-Teilensembles die geordneten Änderungssignale für ganz NRW sowie die Indikationen des U-Tests in Abbildung 18 (RCP2.6 „Klimaschutz-Szenario“), Abbildung 19 (RCP4.5 „Stabilisierungs-Szenario“) und Abbildung 20 (RCP8.5 „Weiterwie-bisher-Szenario“) dargestellt. Signifikante Zunahmen der Grundwasserneubildung erscheinen darin grün, signifikante Abnahmen rot und nicht signifikante Veränderungen grau. Es können prinzipiell auch größere Änderungssignale einzelner Projektionen als nicht signifikant eingestuft werden, wenn die Verteilung der Jahreswerte (Ränge) im Vergleich zur Referenzperiode relativ unverändert bleibt, jedoch einzelne Extremjahre den Mittelwert stärker verschieben (z.B. R26-E12-CLM in Abbildung 18 links). Durch Auszählen der Änderungssignale der Grundwasserneubildung lässt sich erkennen, dass keines der RCP-Teilensembles für keine der Perioden eine robuste Zu- oder Abnahme projiziert. In vielen Fällen wird das 66 %-Kriterium der Übereinstimmung nicht erreicht. Zusätzlich sind die Änderungen in der Verteilung nicht in einer ausreichend großen Zahl der Projektionen signifikant. Für die Jahressummen der Grundwasserneubildung in NRW werden erst ab mittleren Zu- oder Abnahmen von ca. 20 mm/a statistisch signifikante Veränderungen indiziert. Dieser für NRW charakteristische Wert ist abhängig vom tatsächlichen Niveau der Grundwasserneubildung und kann demnach auf der regionalen Skala stärker variieren. Aus statistischer Perspektive kann für gesamt NRW die Schlussfolgerung gezogen werden, dass das Ensemble keine robuste Veränderung projiziert und deshalb langfristig (am Ende des 21. Jahrhunderts) eher eine Grundwasserneubildung auf dem historischen Niveau stattfinden wird.

Die Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse des Robustheitstests mit zwei Kriterien räumlich höher aufgelöst für die hydrogeologischen Großlandschaften (Abbildung 4). Auch für diese kann kein robustes Änderungssignal der Grundwasserneubildung nachgewiesen werden, auch wenn in einigen Großlandschaften Tendenzen in Richtung „robust“ sichtbar werden. Deutlich wird an dieser Stelle nochmal, dass die Ausprägungen der Änderungssignale kleinregional stärker variieren. Die genauen Ursachen dafür zu identifizieren, ist nur durch aufwendige Detailstudien machbar.

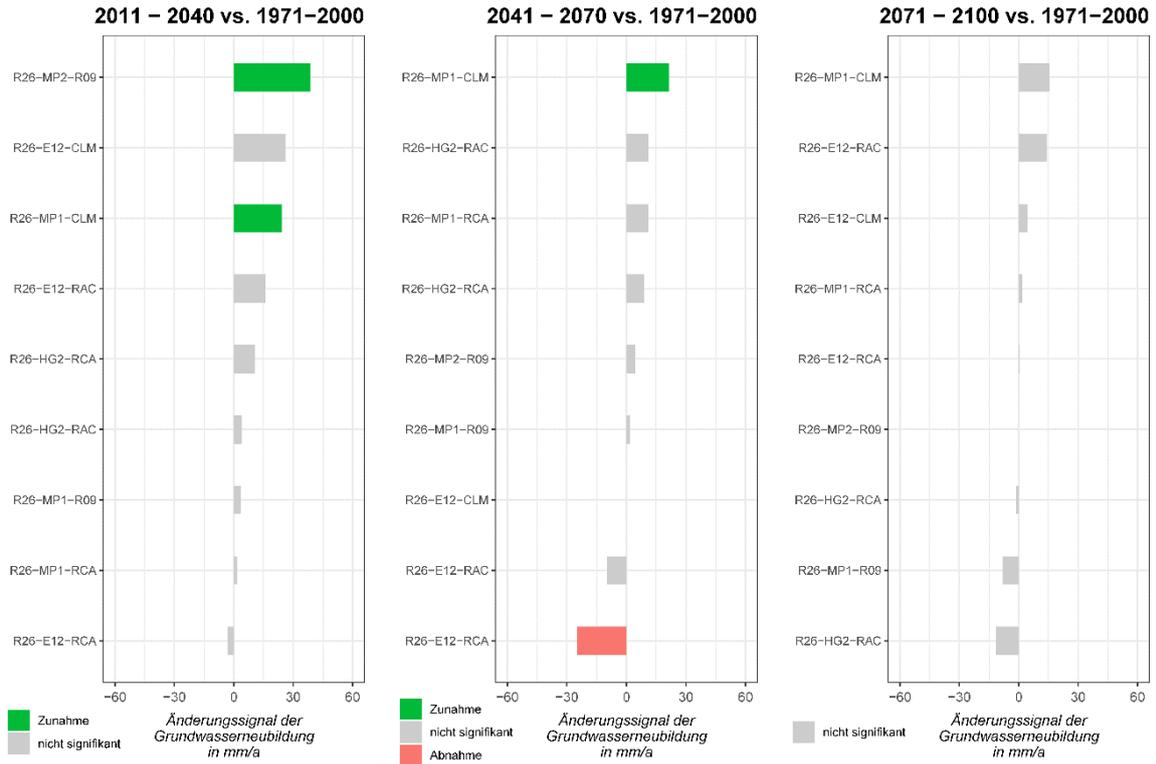


Abbildung 18: Geordnete Änderungssignale der Grundwasserneubildung in ganz NRW im RCP2.6-Teilensemble („Klimaschutz-Szenario“) mit Indikationen des U-Tests.

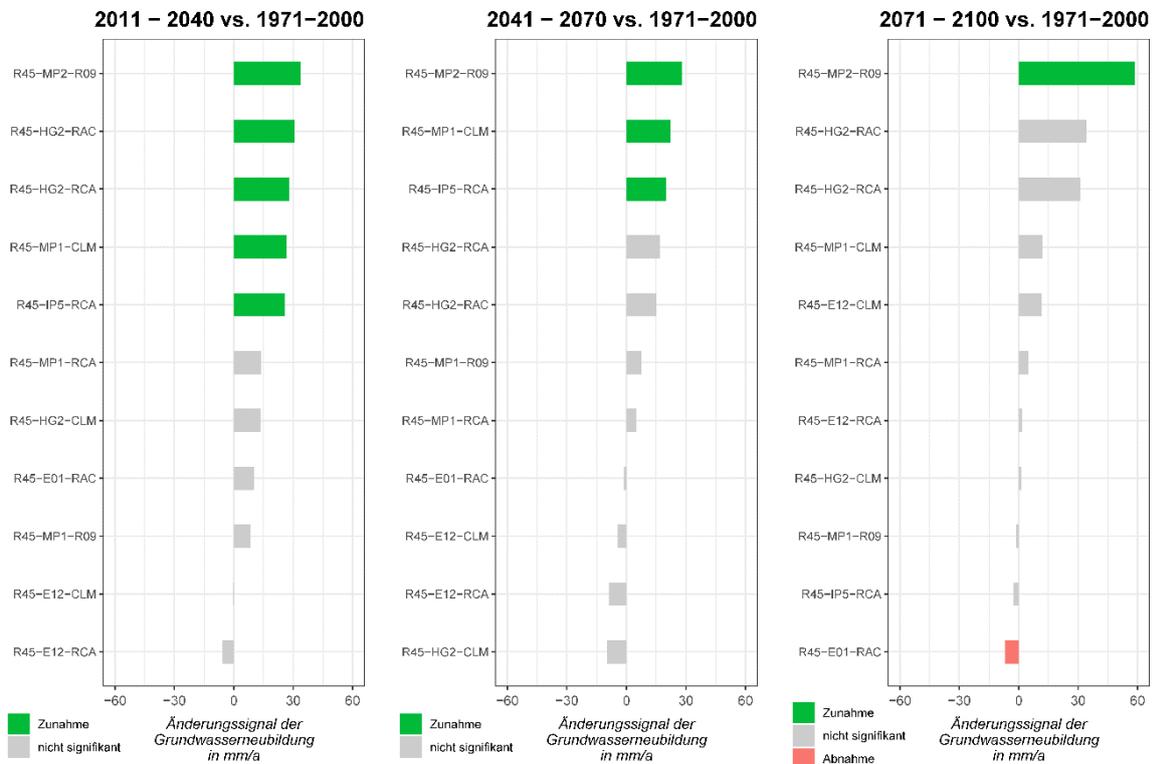


Abbildung 19: Geordnete Änderungssignale der Grundwasserneubildung in ganz NRW im RCP4.5-Teilensemble („Stabilisierungs-Szenario“) mit Indikationen des U-Tests.

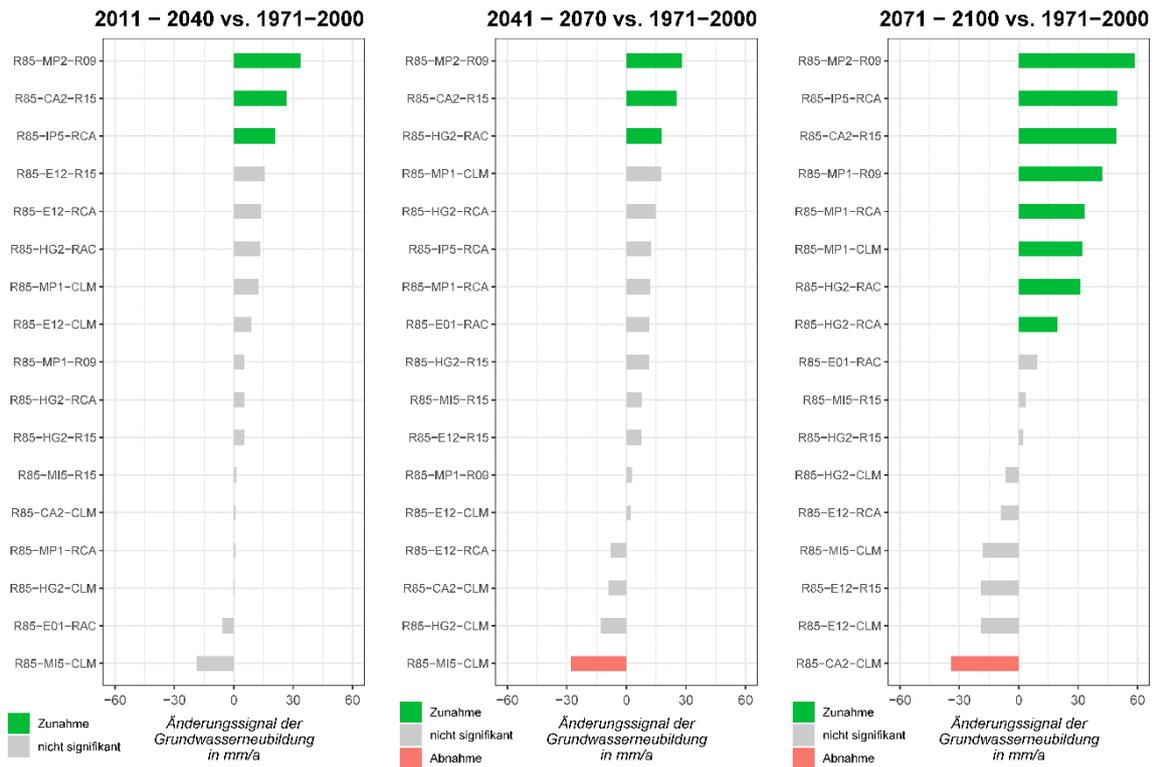


Abbildung 20: Geordnete Änderungssignale der Grundwasserneubildung in ganz NRW im RCP8.5-Teilensemble („Weiter-wie-bisher-Szenario“) mit Indikationen des U-Tests.

Periode	RCP	BergL			Eifel			NiedB			NiedT			Sandm			SaSie			Weser			WestB			WestT		
2011-2040	RCP26	78	22	22	89	11	22	100	0	22	100	0	33	67	33	22	78	22	11	78	22	22	78	22	33	78	22	22
	RCP45	82	18	36	82	18	27	91	9	36	82	18	55	91	9	36	82	18	36	91	9	36	82	18	36	82	18	27
	RCP85	71	29	12	53	47	18	82	18	18	82	18	18	71	29	12	71	29	18	88	12	12	82	18	18	71	29	12
2041-2070	RCP26	56	44	22	56	44	11	78	22	11	78	22	11	56	44	33	56	44	11	67	33	11	67	33	11	56	44	44
	RCP45	55	45	27	73	27	18	82	18	27	73	27	36	73	27	9	55	45	9	82	18	18	64	36	27	73	27	36
	RCP85	71	29	6	71	29	35	94	6	18	82	18	29	71	29	12	65	35	18	76	24	24	71	29	29	71	29	29
2071-2100	RCP26	33	67	0	44	56	0	67	33	11	67	33	0	44	56	0	33	67	0	44	56	0	44	56	0	56	44	11
	RCP45	64	36	9	64	36	9	82	18	9	82	18	18	55	45	18	64	36	18	64	36	27	55	45	9	45	55	9
	RCP85	47	53	47	59	41	65	82	18	47	65	35	47	53	47	47	65	35	47	65	35	53	65	35	47	59	41	47

Abbildung 21: Ergebnisse des Robustheitstests mit zwei Kriterien in den hydrogeologischen Großlandschaften (Abbildung 4). Ist das Kriterium erfüllt, sind die Zellen grün gefärbt, bei Nichterfüllung sind sie rot. Die ersten beiden Zellen enthalten jeweils die Prozentzahlen der Ensemblemitglieder mit Zu- bzw. Abnahme der Grundwasserneubildung. Die dritte Zelle enthält die Prozentzahl der signifikanten Änderungen. Drei grüne Zellen würden ein robustes Änderungssignal indizieren.

Die bis hierher dargelegten Ergebnisse bedürfen abschließend einer überregionalen Einordnung. Jacob et al. (2014) zeigen europaweit die projizierte Änderung der Jahresniederschläge des EURO-CORDEX Ensembles für die RCP 4.5 („Stabilisierungs-Szenario“) und 8.5 („Weiter-wie-bisher-Szenario“). Sie beschreiben eine Übergangszone, die auch westliche Teile der Bundesrepublik Deutschland umfasst, in der die projizierten Änderungssignale des Niederschlags von einer Abnahme (Süd- und Südwesteuropa) in eine Zunahme (Nord- und Nordosteuropa) wechseln. Im Bereich dieser Übergangszone werden keine robusten Änderungssignale des Jahresniederschlags projiziert, oder die Zu- bzw. Abnahmen sind weniger stark ausgeprägt. Pfeifer et al. (2015) haben die Robustheit der mit dem EURO-CORDEX Ensemble

projizierten Änderung der Winterniederschläge deutschlandweit auf Ebene der Landkreise untersucht. Aus der Bilanzperspektive wirken sich höhere Winterniederschläge positiv auf die Grundwasserneubildung aus, diese Wirkung kann jedoch durch ein höheres Niveau der potentiellen Evapotranspiration im Herbst und Winter sowie durch höhere Bodenfeuchtedefizite im Herbst teilweise oder auch vollständig aufgehoben werden (Herrmann et al., 2017). Für viele, aber nicht alle Landkreise NRW's, haben Pfeifer et al. (2015) eine robuste Zunahme der Winterniederschläge ermittelt. Dies spiegelt sich jedoch nicht in einer durch das Ensemble als robust projizierten Zunahme der Grundwasserneubildung wider. Vielmehr wird die Zunahme der Winterniederschläge eventuell knapp ausreichen, um andere eher negativ wirkende klimatische Einflüsse auf die Grundwasserneubildung und damit auf den Grundwasserhaushalt in regional unterschiedlichem Maße zu kompensieren. Letztendlich lässt sich feststellen, NRW befindet sich wahrscheinlich in einer Übergangszone, in der eine robuste Zunahme der Winterniederschläge die Änderung von negativ auf die Grundwasserbilanz wirkenden Klimagrößen kompensieren kann, jedoch noch nicht als robuste Zunahme der Grundwasserneubildung wirksam wird.

3.5 Analyse zur „Grundwasserdürre“

Die vorliegenden Ensembleprojektionen mit der Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA können auf vielfältige Art und Weise weiter im Detail ausgewertet werden, was jedoch im Rahmen dieser Studie nicht umfänglich geplant war. Aus diesem Grund soll hier nur eine weitere kurze Analyse exemplarisch gezeigt und diskutiert werden. Als Voraussetzung muss dazu eine präzise Frage- oder Zielstellung formuliert werden: Es ist das Ziel dieser Analyse aufzuzeigen, ob mit dem Ensemble ähnlich ausgeprägte Phasen unterdurchschnittlicher Grundwasserneubildung projiziert wurden, wie sie seit 2010 in NRW beobachtet wird. Der Begriff „Grundwasserdürre“ wird an dieser Stelle synonym für eine längere Phase genutzt, in der sich ein Bilanzdefizit der Grundwasserneubildung zum langjährigen Mittelwert entwickelt. Die Analyse zur gegenwärtigen Entwicklung wird dann im Kapitel 4 vorgestellt.

Die Abbildung 22 zeigt Auszählergebnisse zur projizierten Grundwasserneubildung. Derartige deskriptive Statistiken können durch Programm-gestütztes Auszählen (z.B. durch R-Skripte) einfach nachträglich aus den Ergebnisrastern der Ensembleprojektionen gewonnen werden. Das Diagramm zeigt auf der Abszisse die Anzahl der aufeinanderfolgenden Trockenjahre mit einer Grundwasserneubildung unterhalb des jeweiligen Referenzniveaus (die vorherige 30-Jahre-Periode), die insgesamt durch das RCP8.5-Teilensemble („Weiter-wie-bisher-Szenario“) projiziert wurden. Auf der Ordinate aufgetragen ist die zugehörige Anzahl der Ensemblemitglieder, die eine solche Anzahl aufeinanderfolgender Trockenjahre projiziert. Farblich codiert sind die 30-Jahre-Perioden dargestellt.

Deutlich sichtbar resultieren in einer großen Anzahl Projektionen Abfolgen von bis zu vier Trockenjahren unterhalb eines Referenzniveaus, wie sie auch für die beobachtete Vergangenheit am Ende des 20. Jahrhunderts bekannt sind. An diese, aus der natürlichen Klimavariabilität resultierenden Schwankungen (vgl. dann auch Kapitel 4, Abbildung 23), muss Grundwassermanagement generell adaptiert sein. Durch einige Mitglieder des Teilensembles wurden jedoch auch längere Phase mit einer Dauer von bis zu 10 Jahren mit unterdurchschnittlicher Grundwasserneubildung projiziert. Dies bedeutet, dass auch Situationen wie in der Dekade

2011 bis 2020 als potentielle Entwicklungspfade abgebildet sind. Angaben zum genauen Zeitpunkt oder zu einer Wahrscheinlichkeit des Eintretens können an dieser Stelle jedoch prinzipiell nicht gemacht werden. Ein visueller Vergleich der in den Steckbriefen (Kapitel 3.3) dargestellten projizierten Zeitreihen der jährlichen Grundwasserneubildung mit denen aus der Simulation für die beobachtete Vergangenheit (Kapitel 4) offenbart, dass Phasen analog zur gegenwärtigen „Grundwasserdürre“ mit einer monotonen Abwärtstendenz auch in allen zukünftigen Perioden auftreten können.

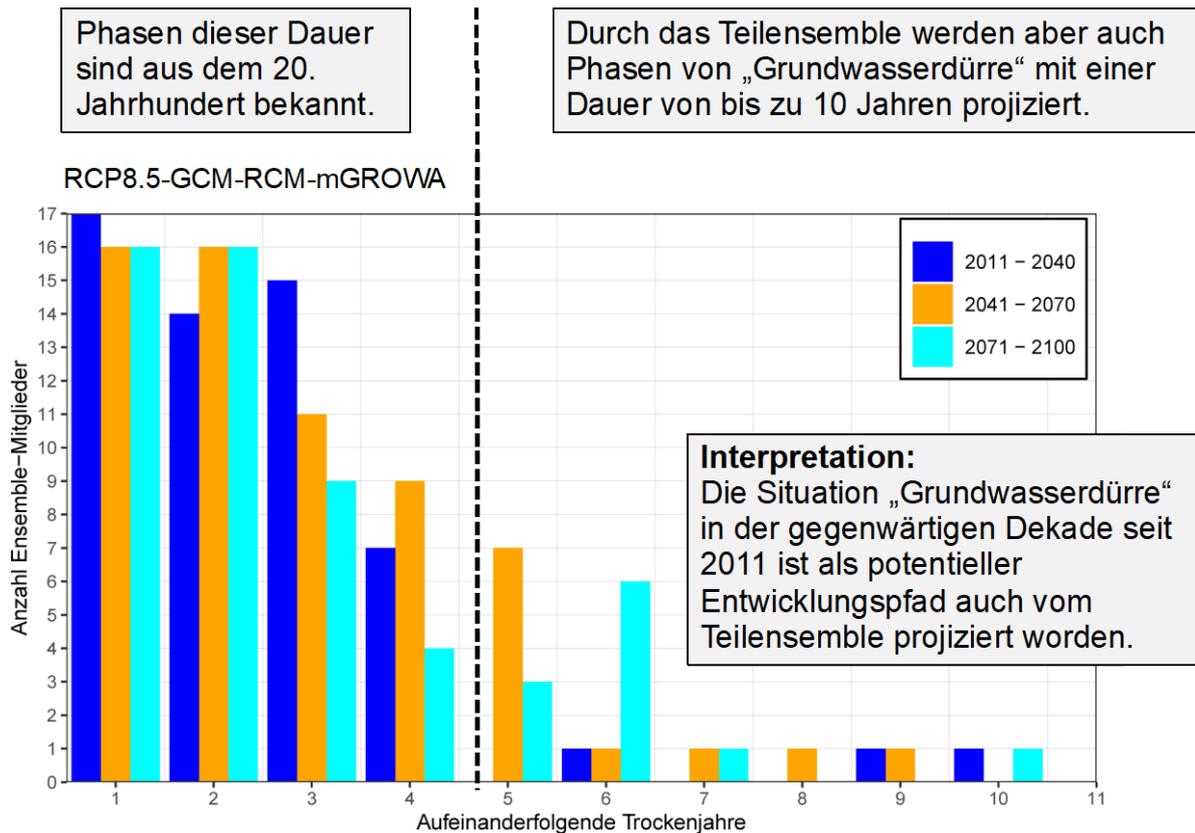


Abbildung 22: Auszählergebnisse zur projizierten Grundwasserneubildung im RCP8.5-Teilensemble.

4 Trendanalyse für die beobachtete Vergangenheit 1961 bis 2020

Hinter der räumlichen Verteilung der Grundwasserneubildung in Abbildung 1, die auf Basis beobachteter Klimadaten mit mGROWA simuliert und in Herrmann et al. (2021; LANUV-Fachbericht 110, Teil IIa) ausführlich dokumentiert wurde, stehen die in Abbildung 23 dargestellten über ganz NRW aggregierten zeitlichen Muster. Diese Simulation wurde kürzlich bis zum Ende des Wasserhaushaltsjahres 2020 verlängert und deckt nun die 60 Jahre von 1961 bis 2020 vollständig ab. Damit steht auch für die beobachtete Vergangenheit eine ausreichend lange Zeitreihe für Trendanalysen zur Verfügung.

Die in Abbildung 23 dargestellte Veränderung der langjährigen Mittelwerte der 20-Jahre-Perioden 1961 – 1980, 1981 – 2000 und 2001 – 2020 liegt auf einem für die Grundwasserbewirtschaftung durchaus relevanten Niveau (128 mm/a, 151 mm/a, 109 mm/a). Diese 20-Jahre-Perioden dienen zur Illustration der interdekadischen Variabilität. Sie entsprechen keinem 30-jährigen Referenzzeitraum der als Basis für wasserwirtschaftliche Planung dient. Bemerkenswert ist ein etwa im Jahr 2000 einsetzender sukzessiver Rückgang, sowie ein Niveau, welches ab 2008 unter dem langjährigen Mittelwert der Periode 1981 – 2000 verbleibt. Ein durch die Dynamik der Sickerwasserbewegung gesteuerter Jahresgang ist in Abbildung 23 (unten) ebenfalls erkennbar, d.h. Grundwasserneubildung findet hauptsächlich im Winterhalbjahr statt. In sehr regenreichen Sommerhalbjahren kann jedoch eine Grundwasserneubildung auch über mehrere Sommermonate auf einem eher für Wintermonate typischen Niveau stattfinden. Eine Entwicklung in ähnlicher Ausprägung lässt sich auch in den Zeitreihendarstellungen für die hydrogeologischen Großlandschaften erkennen (Abbildung 24 bis Abbildung 32). Hinsichtlich der Niveaus und Amplituden der Grundwasserneubildung unterscheiden sich die Großlandschaften teils deutlich, die zeitlichen Muster, d.h. die interannuelle Variabilität und langjährige Trends, sind jedoch weitgehend synchron ausgeprägt.

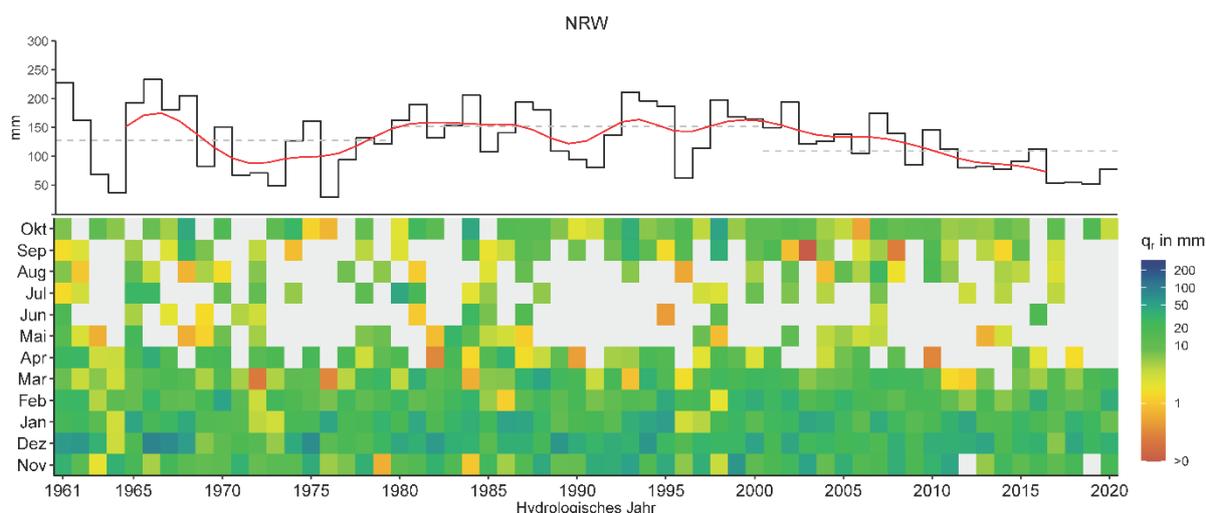


Abbildung 23: Zeitreihendarstellung der Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen. Der obere Teil zeigt die Summe in den hydrologischen Jahren (November bis Oktober) in Form eines Stufendiagrammes. Zusätzlich ist in Rot die Tiefpass-gefilterte Zeitreihe dargestellt, d.h. es werden dadurch die mittelfristigen Schwankungen hervorgehoben und längerfristige Trends deutlicher sichtbar. Für die Berechnung wurde ein Gauß-Filter auf eine Periode von jeweils 10 Jahren angewendet. In Grau gestrichelt sind außerdem die langjährigen Mittelwerte der

20-Jahre-Perioden 1961-1980, 1981-2010 und 2001-2020 dargestellt. In der zweiten (unteren) Komponente der Zeitreihendarstellung sind für die einzelnen hydrologischen Jahre die Monatssummen farblich kodiert dargestellt. Monate ohne positive Netto-Grundwasserneubildung sind hellgrau dargestellt.

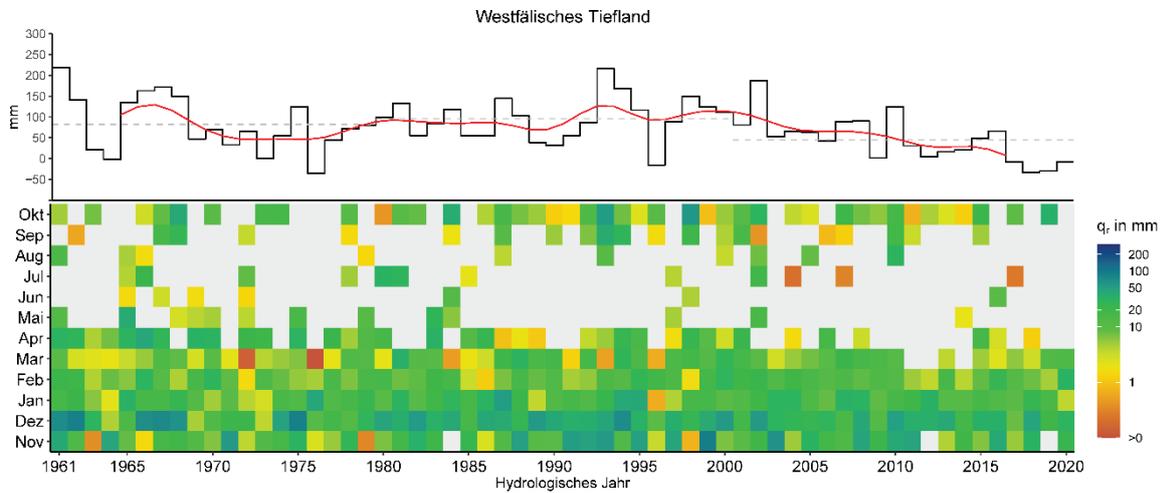


Abbildung 24: Zeitreihendarstellung der Grundwasserneubildung im Westfälischen Tiefland. Erläuterung zur Darstellung siehe Abbildung 23. Lage der hydrogeologischen Großlandschaft in Abbildung 4.

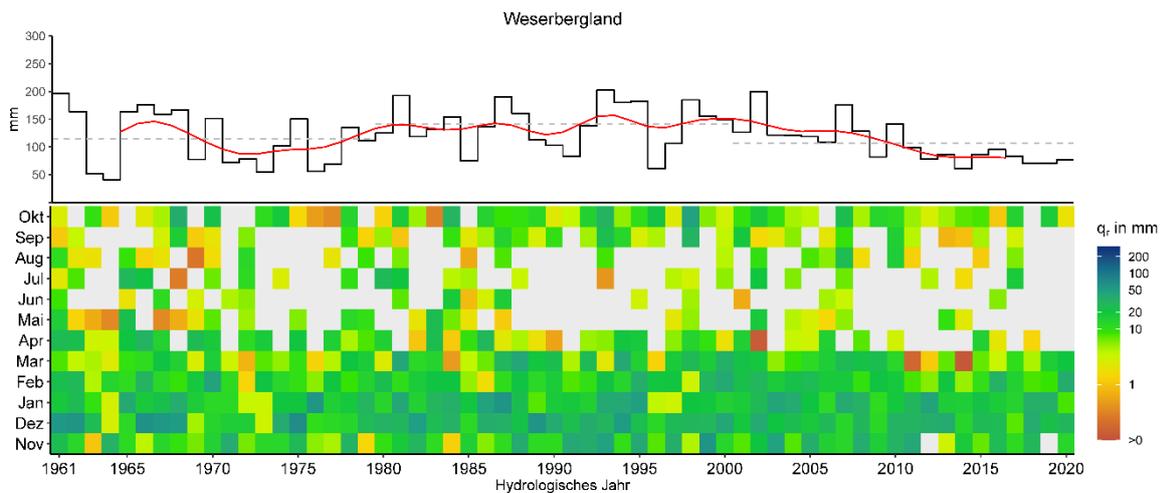


Abbildung 25: Zeitreihendarstellung der Grundwasserneubildung im Weserbergland. Erläuterung zur Darstellung siehe Abbildung 23. Lage der hydrogeologischen Großlandschaft in Abbildung 4.

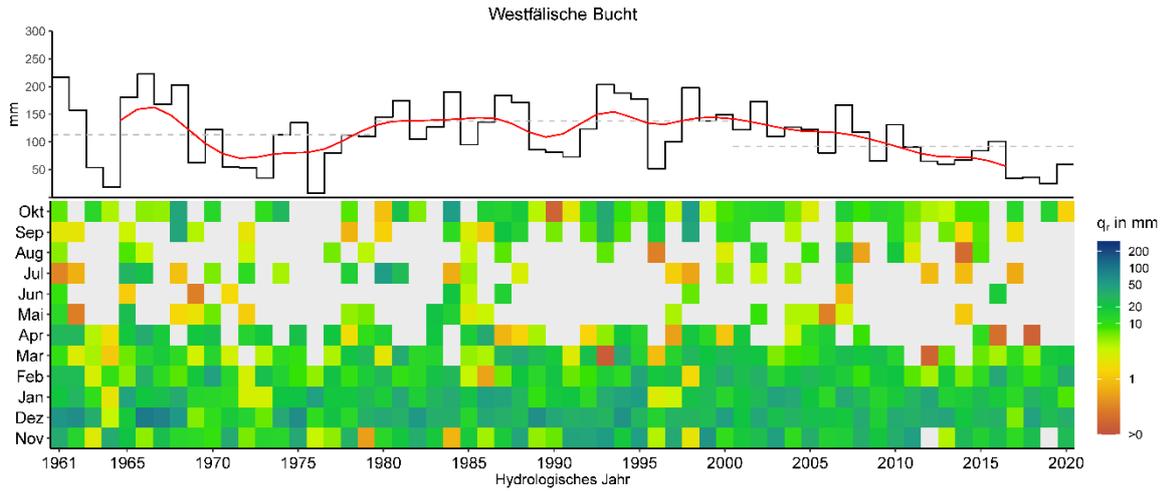


Abbildung 26: Zeitreihendarstellung der Grundwasserneubildung in der Westfälischen Bucht. Erläuterung zur Darstellung siehe Abbildung 23. Lage der hydrogeologischen Großlandschaft in Abbildung 4.

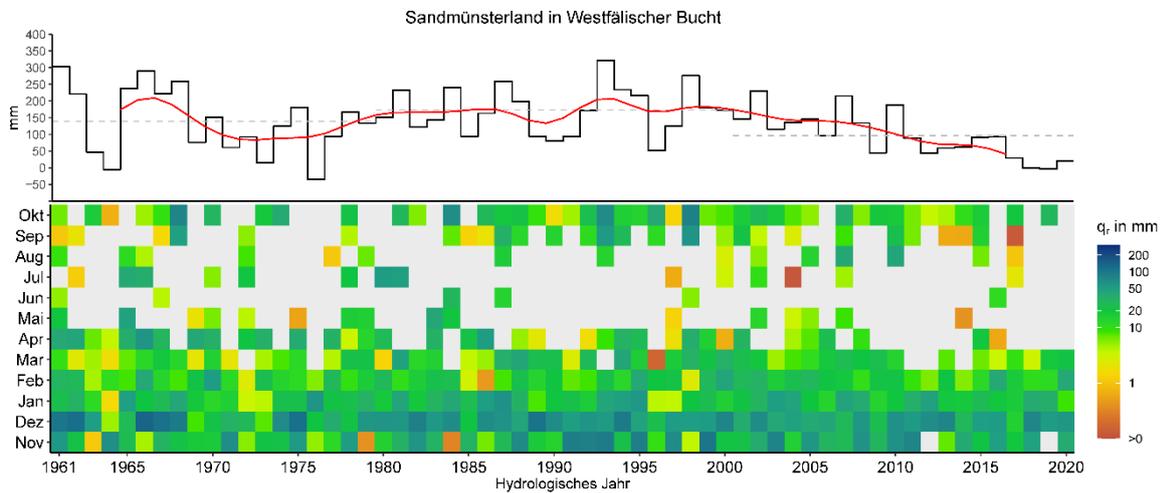


Abbildung 27: Zeitreihendarstellung der Grundwasserneubildung im Sandmünsterland in der Westfälischen Bucht. Erläuterung zur Darstellung siehe Abbildung 23. Lage der hydrogeologischen Großlandschaft in Abbildung 4.

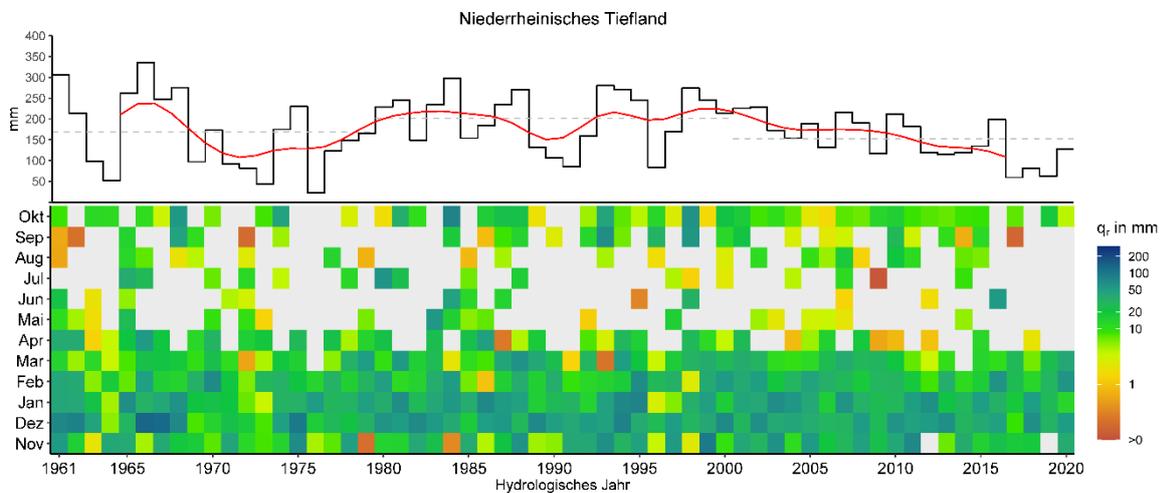


Abbildung 28: Zeitreihendarstellung der Grundwasserneubildung im Niederrheinisches Tiefland. Erläuterung zur Darstellung siehe Abbildung 23. Lage der hydrogeologischen Großlandschaft in Abbildung 4.

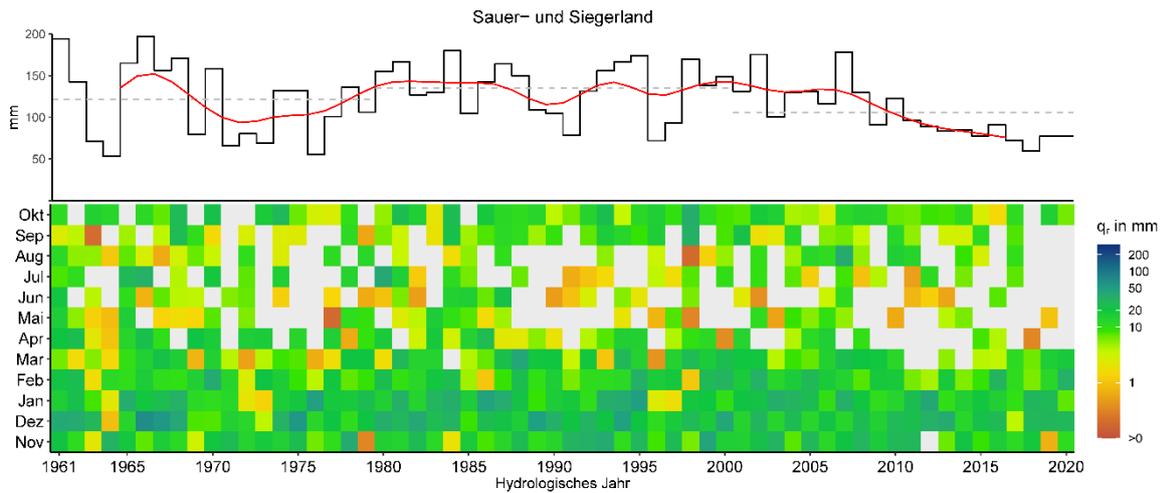


Abbildung 29: Zeitreihendarstellung der Grundwasserneubildung im Sauer- und Siegerland. Erläuterung zur Darstellung siehe Abbildung 23. Lage der hydrogeologischen Großlandschaft in Abbildung 4.

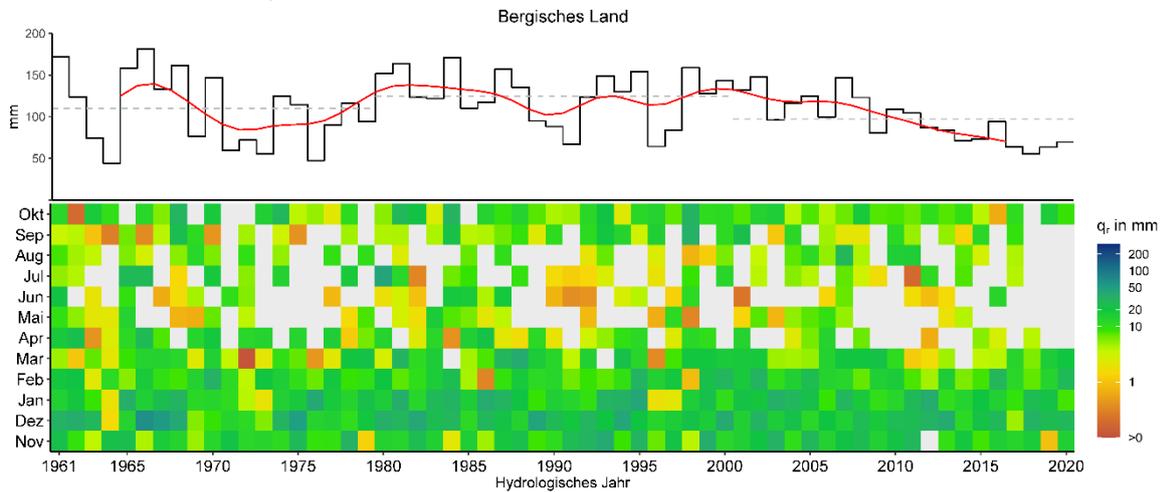


Abbildung 30: Zeitreihendarstellung der Grundwasserneubildung im Bergischen Land. Erläuterung zur Darstellung siehe Abbildung 23. Lage der hydrogeologischen Großlandschaft in Abbildung 4.

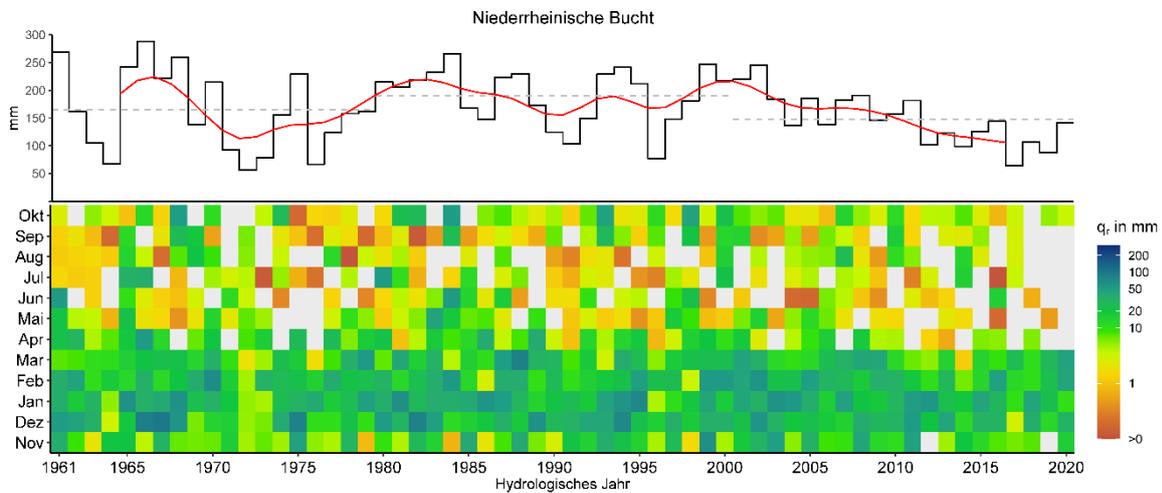


Abbildung 31: Zeitreihendarstellung der Grundwasserneubildung in der Niederrheinischen Bucht. Erläuterung zur Darstellung siehe Abbildung 23. Lage der hydrogeologischen Großlandschaft in Abbildung 4.

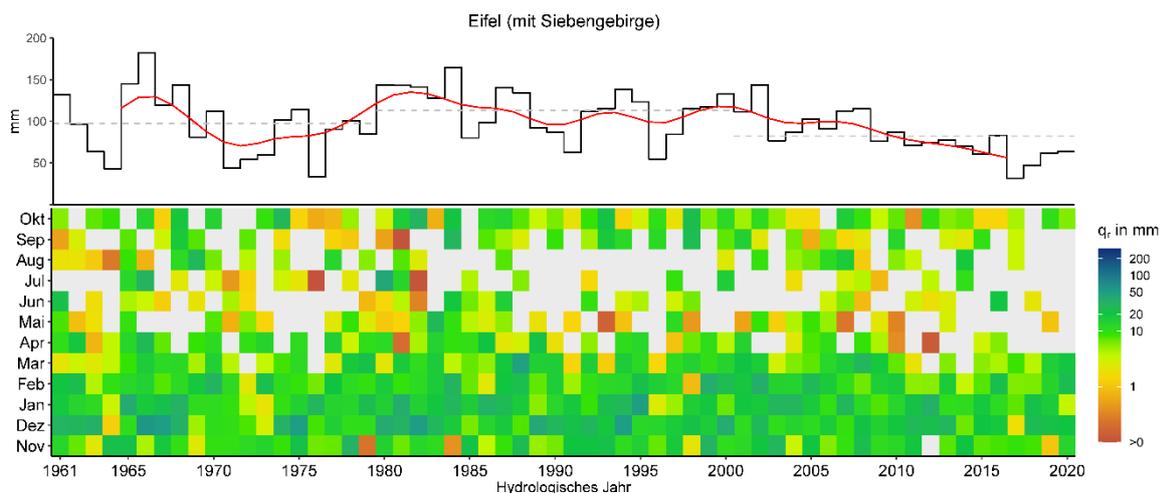


Abbildung 32: Zeitreihendarstellung der Grundwasserneubildung in der Eifel (mit Siebengebirge). Erläuterung zur Darstellung siehe Abbildung 23. Lage der hydrogeologischen Großlandschaft in Abbildung 4.

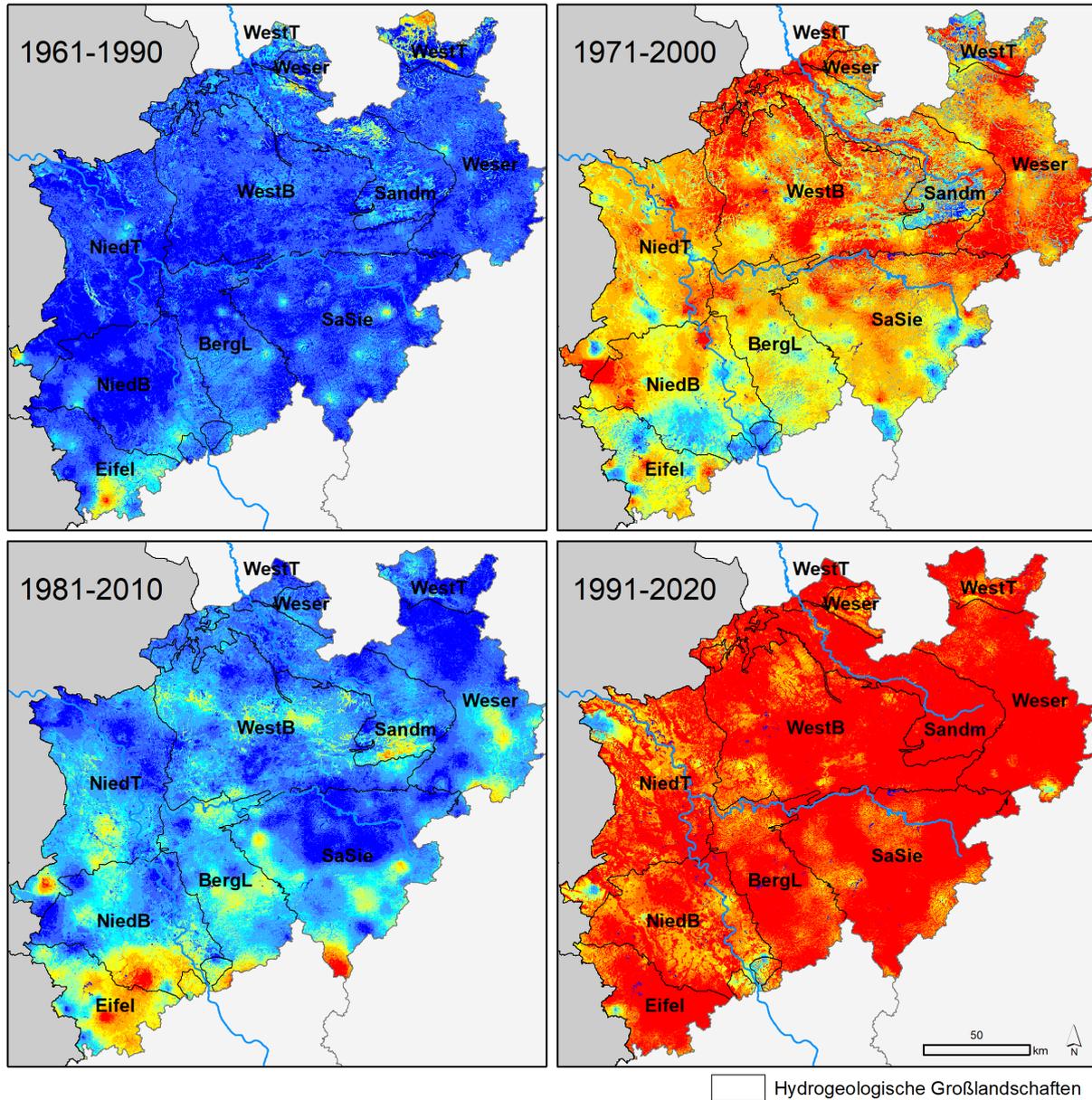
Mit Hilfe des Mann-Kendall-Trendtests (Methodik in Kapitel 2.3) kann das Vorhandensein monotoner Trends in den Zeitreihen der Grundwasserneubildung untersucht werden. Die Abbildung 33 zeigt für NRW die Ergebnisse eines Mann-Kendall-Trendtests, der rasterbasiert für die Zeitreihen der jährlichen Grundwasserneubildung durchgeführt wurde. Dargestellt sind die berechneten Wahrscheinlichkeiten für die Alternativhypothese. Ein monotoner Trend wird ab einer Wahrscheinlichkeit von 0,85 (grün-gelb bis rot) als signifikant angesehen (Signifikanzniveau 0,15). Je größer die Werte, desto sicherer ist diese Aussage.

Für die 30 Jahre von 1961 bis 1990 (Abbildung 33) lässt sich fast landesweit kein monotoner Trend nachweisen. Für die 30 Jahre von 1971 bis 2000 resultiert ein signifikanter monotoner Aufwärtstrend in einigen Regionen NRW's. Beispielsweise nimmt die Grundwasserneubildung im Weserbergland leicht aber kontinuierlich zu. In der Niederrheinischen Bucht lässt sich hingegen kein flächendeckender monotoner Aufwärtstrend nachweisen. Für die 30 Jahre von 1981 bis 2010 existiert kein signifikanter monotoner Trend der Grundwasserneubildung in den meisten Hydrogeologischen Großlandschaften. Ab 1991 lassen sich jedoch fast landesweit monotone Abnahmen der Grundwasserneubildung nachweisen, wobei der Hauptteil der Abnahme ab 2001 stattfand. Dies wird auch in einer vergleichenden Betrachtung mit den Zeitreihendarstellungen für die hydrogeologischen Großlandschaften (Abbildung 23 bis Abbildung 32) deutlich. Für die Eifel (mit Siebengebirge) (Abbildung 32) ist bereits ein monotoner Abwärtstrend auch visuell ab den 1980-iger Jahren erkennbar.

Die Abbildung 33 zeigt jedoch auch kleinere Bereiche, in denen keine signifikanten Trends in den Zeitreihen der Grundwasserneubildung nachgewiesen wird (Wahrscheinlichkeiten für die Alternativhypothese kleiner als 0,85), obwohl für das Umfeld ein Trend existiert. Dafür kommen mehrere Gründe in Betracht. Einerseits reagieren nicht alle Standorte aufgrund ihrer sehr spezifischen Charakteristika (Bodenwasserspeicher, Vegetation, Grundwassereinfluss, hydraulische Durchlässigkeit, etc.) in gleichem Maße auf Veränderungen in den zeitlichen Mustern des Niederschlags und der potentiellen Evapotranspiration. Eine räumlich hochaufgelöste Betrachtung bringt beispielsweise in einigen Regionen landnutzungsabhängige lokale Kontraste in den Wahrscheinlichkeiten für die Alternativhypothese hervor. Andererseits hat sich auch die

Zusammensetzung der Messnetze des Deutschen Wetterdienstes über die vergangenen Dekaden verändert. Dementsprechend basieren die interpolierten räumlichen Muster von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration nicht über die gesamte Zeitspanne auf einem unveränderten lückenlosen Kollektiv an Beobachtungen. Insbesondere der lokalen Hoch- und Tiefpunkte (rot und blau) in der Eifel (mit Siebengebirge) und im Sauer- und Siegerland könnten sich derart begründen lassen. Aufgrund der diskutierten sich überlagernden Einflüsse ist es jedoch mit beträchtlichem Analyseaufwand verbunden, die genauen Ursachen für diese nur lokal bestehenden Unsicherheiten zu identifizieren.

Zusammenfassend lässt sich für die Grundwasserneubildung feststellen, dass mit dem Mann-Kendall-Trendtest für alle größeren Gebietseinheiten NRW's für die vergangenen drei Dekaden von 1991 bis 2020 ein signifikant monoton abnehmender Trend nachgewiesen ist. Inwiefern sich dieser Trend in den kommenden Jahren fortsetzt, kann angesichts der Projektionen (Kapitel 3) nicht prognostiziert werden. Vor dem Hintergrund eines höheren Niveaus der Grundwasserneubildung während der 30-Jahre-Perioden die heute als Referenz für grundwasserwirtschaftliche Planung dienen, kann mittlerweile für die Zeit ab 2011 von einer ausgeprägten Phase mit einem Bilanzdefizit der Grundwasserneubildung zum langjährigen Mittelwert gesprochen werden.



Wahrscheinlichkeit eines monotonen Trends in der Zeitreihe der jährlichen Grundwasserneubildung (Alternativhypothese im Mann-Kendall-Test)

 <= 0.2	 > 0.5 - 0.7	 > 0.8 - 0.85	 > 0.9 - 0.95	 > 0.98 - 0.99
 > 0.2 - 0.5	 > 0.7 - 0.8	 > 0.85 - 0.9	 > 0.95 - 0.98	 > 0.99

Abbildung 33: Wahrscheinlichkeit eines monotonen Trends in der Zeitreihe der jährlichen Grundwasserneubildung (Alternativhypothese im Mann-Kendall-Test) für 1961 – 1990, 1971 – 2000, 1981 – 2010 und 1991 – 2020. Bezeichnung der hydrogeologischen Großlandschaften in Abbildung 4.

5 Zusammenfassung

In den beiden vergangenen Dekaden hat in NRW eine Grundwasserneubildung stattgefunden, die auf einem Niveau deutlich unterhalb des langjährigen Mittelwertes der für wasserwirtschaftliche Planungen zugrunde gelegten 30-Jahre-Periode 1981 – 2010 (bzw. 1971 – 2000) lag. Zusätzlich zeichnet sich bei der bis 2020 beobachteten Grundwasserneubildung ein abnehmender Trend ab (Details in Kapitel 4). Als Ursachen dafür gelten einerseits die Schwankungen in den raumzeitlichen Niederschlags- und Temperaturmustern, die aus einer natürlichen Klimavariabilität resultieren, und andererseits auch Veränderungen in diesen Mustern, die durch den anthropogenen Klimawandel bedingt sind. In der vorliegenden Studie wurde untersucht, welche Auswirkungen aufgrund des anthropogenen Klimawandels für die Entwicklung der Grundwasserneubildung in NRW für die Zukunft aus heutiger Sicht zu erwarten sind.

Der vorliegende Teilbericht umfasst eine qualitative und quantitative Analyse der aufgrund des anthropogenen Klimawandels möglich erscheinenden Veränderungen der Grundwasserneubildung in NRW. Dazu wurden Projektionen mit einem Multi-Modell-Ensemble bis zum Jahr 2100 (Details in Kapitel 2.1) sowie statistische Auswertungen der projizierten Änderungssignale der Grundwasserneubildung durchgeführt. Dieses Multi-Modell-Ensemble besteht aus Klimaprojektionen aus dem Verbundprojekt Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De) und dem in NRW auf Landesebene etablierten Wasserhaushaltsmodell mGROWA. Als Ergebnis sind die Trends der projizierten Zeitreihen der Grundwasserneubildung in den hydrogeologischen Großlandschaften NRW's dargestellt. Als Begleitmaterial zu diesem Teilbericht sind Steckbriefe verfügbar, die detaillierte Information zu den projizierten Zeitreihen der Grundwasserneubildung in den hydrogeologischen Großlandschaften liefern (ein Link findet sich in Kapitel 3.3). Besonders wird im Kapitel 3 auf die Bewertung des Rest-Bias der projizierten Grundwasserneubildung (Kapitel 3.1) und auf die Analyse der Robustheit der resultierenden Änderungssignale der Grundwasserneubildung aus der Ensemble-Perspektive eingegangen (Kapitel 3.4).

Um eine breite Datenbasis für Analysen der möglicherweise zukünftig in NRW stattfindenden Grundwasserneubildung zu schaffen, wurden Projektionen mit Hilfe eines Multi-Modell-Ensembles durchgeführt (s.o.). Dieses Ensemble besteht aus insgesamt 37 Mitgliedern der Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA und liefert Projektionen der Grundwasserneubildung für die Zeit von 1971 bis 2100. Das Ensemble ist in drei Teilensembles gegliedert, in denen jeweils die RCP-Szenarien RCP2.6 („Klimaschutz-Szenario“), RCP4.5 („Stabilisierungs-Szenario“) und RCP8.5 („Weiter-wie-bisher-Szenario“) als Randbedingung für die zukünftigen Entwicklung der globalen Strahlungsbilanz und damit der Erderwärmung dienen (Details in Kapitel 2.1.1). Die im Ensemble beteiligten globalen und regionalen Klimamodelle (GCM, RCM) sind ebenfalls in Kapitel 2.1.1 erläutert. Der Bias des projizierten Niederschlags wurde mit dem LOCI-Verfahren korrigiert (Details in Kapitel 2.1.2). Unter einem Bias versteht man die Abweichung einer simulierten Größe zu einem Vergleichsniveau, beispielsweise die tendenzielle Über- oder Unterschätzung von Beobachtungen. Der regionale Wasserhaushalt in NRW wird in der Modellkette durch das Wasserhaushaltsmodell mGROWA abgebildet (Details in Kapitel 2.1.3). Als Ergebnisse resultieren in drei Teilensembles („Klimaschutz-Szenario“, „Stabilisierungs-Szenario“, „Weiter-wie-bisher-Szenario“) gegliederte rasterbasierte Zeitreihen der Grundwasserneubildung. Aus diesen Projektionen wurden Änderungssignale für die 30-Jahre-Perioden 2011 – 2040, 2041 – 2070 und 2071 – 2100 gegenüber der projizierten historischen Referenzperiode 1971 – 2000 abgeleitet und detailliert analysiert.

Des Weiteren wurde eine ausführliche Bewertung der Güte der Ensembleprojektionen vorgenommen (Kapitel 3.1). Die für die historische Referenzperiode 1971 – 2000 projizierten Grundwasserneubildungshöhen weisen in den einzelnen Projektionen im Vergleich zur Referenzsimulation (auf Basis beobachteter Klimadaten durchgeführt) einen räumlich unterschiedlich ausgeprägten sogenannten Rest-Bias auf, d.h. die Referenzsimulation wird trotz der Bias-Korrektur des Niederschlags noch um kleinere Beträge über- oder unterschätzt. Mit Hilfe der rasterbasiert berechneten statistischen Kennzahlen PBIAS, NSE und RMSE sowie mit Hilfe sogenannter Taylor-Diagramme konnte dieser Rest-Bias umfangreich analysiert werden (Details zur Methodik in Kapitel 2.2). Dabei wurden einerseits die Güte der Abbildung der zeitlichen Muster und Mittelwerte der historischen Projektionen im Vergleich zur Referenzsimulation sowie die Güte der Abbildung der räumlichen Muster der langjährigen Mittelwerte bewertet. Hinsichtlich der prozentualen Über- und Unterschätzung des beobachteten Referenzniveaus resultiert eine gute Modellperformance, d.h. tendenziell kann der Rest-Bias der projizierten Grundwasserneubildung als relativ gering eingestuft werden. Es ist jedoch auffällig, dass ein größerer Teil der Projektionen zu einer leichten Überschätzung der Grundwasserneubildung neigt. Die Kenntnis und vorliegende Dokumentation des Rest-Bias der projizierten Grundwasserneubildung trägt methodisch gesehen zur Reduzierung eines Teils der Unsicherheiten bei, die weiterhin mit Ensembleprojektionen verbunden sind. In der Praxis sollte aufgrund des existierenden Rest-Bias weniger der Blick auf die berechneten absoluten Werte der projizierten Grundwasserneubildung gerichtet werden. Vielmehr sollten, um ein zukünftiges Niveau der zu erwartenden Grundwasserneubildung quantitativ abzuschätzen, die ermittelten Änderungssignale der jeweiligen Projektionen zum historischen beobachteten Referenzniveau (Abbildung 1) addiert werden.

Die Änderungssignale der Grundwasserneubildung in den hydrogeologischen Großlandschaften NRW's (Darstellung in Kapitel 2.1.4) wurden für die drei RCP-Teilensembles individuell ausgewertet (Details in Kapitel 3.2). Für das RCP2.6-Teilensemble („Klimaschutz-Szenario“) kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sich die klimatischen Randbedingungen zum Ende des 21. Jahrhunderts ungünstiger für die Grundwasserneubildung (in Richtung einer Abnahme) entwickeln könnten. Davon wären alle Regionen NRW's in ähnlichem Ausmaß betroffen. Das RCP4.5-Teilensemble („Stabilisierungs-Szenario“) führt zu einer eher stabilen Grundwasserneubildung auf einem leicht erhöhten Niveau. Im RCP8.5-Teilensemble („Weiterwie-bisher-Szenario“), welches die extremste Klimaerwärmung bis 2100 impliziert, streuen die Änderungssignale der Grundwasserneubildung deutlich stärker und auch extreme Entwicklungen resultieren häufiger. Insgesamt ist auch im RCP8.5-Teilensemble keine eindeutig in allen hydrogeologischen Großlandschaften ausgeprägte einheitliche Richtung der Entwicklung zu erkennen. Nahezu alle Mitglieder im RCP8.5-Teilensemble projizieren auch mehrjährige Phasen mit unterdurchschnittlicher Grundwasserneubildung, denen jedoch auch wieder feuchtere Phasen mit einem überdurchschnittlichen Grundwasserneubildungsniveau folgen (Details in Kapitel 3.5). Durch einige Mitglieder wurden jedoch auch längere Phasen mit einer Dauer von bis zu 10 Jahren mit unterdurchschnittlicher Grundwasserneubildung projiziert. Dies bedeutet, dass auch Phasen mit einem größeren Bilanzdefizit der Grundwasserneubildung zum langjährigen Mittelwert, wie in den beobachteten Jahren seit 2010, als potentielle Entwicklungspfade durch das RCP8.5-Teilensemble („Weiterwie-bisher-Szenario“) abgebildet sind.

In mehreren mit dem Multi-Modell-Ensemble projizierten Entwicklungspfaden lassen sich Tendenzen hinsichtlich einer Veränderung der Grundwasserneubildung erkennen (z.B. R85-CA2-CLM). Es gibt jedoch auch Entwicklungspfade, die eher auf ein wenig verändertes Niveau am

Ende des 21. Jahrhunderts hindeuten (z.B. R85-MP1-CLM). Schlussfolgerungen über die Zukunft nur aus einzelnen potentiellen Entwicklungspfaden zu ziehen, ist generell mit großen Unsicherheiten verbunden. Wenn jedoch ein gesamtes Ensemble eine robuste Veränderung projiziert, werden die damit verbundenen Unsicherheiten im Allgemeinen als geringer eingeschätzt. Deshalb wurden im Rahmen dieser Studie die RCP-Teilensembles hinsichtlich robuster Änderungssignale überprüft, d.h. es wurde untersucht, ob bei einer Mehrheit der einzelnen Entwicklungspfade im jeweiligen Teilensemble eine signifikante Veränderung der Grundwasserneubildung resultiert. Die dazu durchgeführten Robustheitstests (Methodik in Kapitel 2.3) liefern derzeit keine statistisch abgesicherte Begründung dafür, dass sich die langjährige mittlere Grundwasserneubildung in NRW systematisch und signifikant bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ändern könnte (Details in Kapitel 3.4). Aus statistischer Perspektive wird deshalb die Schlussfolgerung gezogen, dass in NRW langfristig eine Grundwasserneubildung erwartet werden kann, die sich nicht grundlegend vom Niveau der Periode 1971 – 2000 unterscheidet. Hydro-meteorologisch befindet sich NRW in einer Übergangszone, in der eine robuste Zunahme der Winterniederschläge die Änderung von negativ auf die Grundwasserbilanz wirkenden Klimagrößen (z.B. potentielle Evapotranspiration) kompensieren kann, jedoch noch nicht als robuste Zunahme der Grundwasserneubildung wirksam wird (Diskussion in Kapitel 3.4). Mit aktualisierten Klimaszenarien und weiterentwickelten Klimamodellen werden zukünftig neue Projektionen der Grundwasserneubildung möglich, die dann auch die Ergebnisse des hier präsentierten Robustheitstests ändern und eine Anpassung der damit verbundenen Aussagen notwendig machen können. Ebenso können andere Schlussfolgerungen aus dem Robustheitstest resultieren, wenn mehrere Projektionen zukünftig als nicht verlässlich identifiziert und eingestuft werden. Insofern empfiehlt sich eine kontinuierliche Aktualisierung und Erweiterung des Ensembles gemäß den Empfehlungen des Deutschen Wetterdienstes und weiterer Gremien (IPCC, LAWA-AK, etc.).

Für alle Projektionen, Großlandschaften und 30-Jahre-Perioden stehen umfangreiche Ergebnisse in Form von Steckbriefen zur Verfügung (Details in Kapitel 3.3). Diese können als Informationsbasis zur Auswahl von Projektionen für weiterführende Studien dienen. Beispielsweise können mittlere und extreme Entwicklungspfade des Ensembles im Rahmen weiterführender Betrachtungen (z.B. Best Case/Worst Case-Analysen, räumliche Hotspot-Analysen) für das Klimaanpassungsmanagement sowie als Grundlage zur Abschätzung des zukünftig möglichen Grundwasserangebotes Berücksichtigung finden. Hierbei sollte den Empfehlungen aus dem Verbundprojekt ReKliEs-De (Huebener et al., 2017) gefolgt werden. Das Ensemble und der Median der Änderungssignale zeigen die potentielle Richtung zukünftiger Änderungen an. Nach Huebener et al. (2017) sollen aber nicht die mittleren Änderungen und Trends aus dem Ensemble allein betrachtet werden, sondern es sollen auch die extremeren Entwicklungspfade einbezogen werden, weil für einzelne Entwicklungspfade derzeit keine verlässliche Eintrittswahrscheinlichkeit angegeben werden kann.

Für solche Betrachtungen einzelner Entwicklungspfade in NRW können beispielsweise folgende RCP-GCM-RCM-Kombinationen verwendet werden. Die RCP-GCM-RCM-Kombinationen R26-MP2-R09, R45-MP2-R09 und R85-MP2-R09 Szenarien stehen für Perioden mit einem sehr starken Anstieg der mittleren Grundwasserneubildung bei einer großen Schwankungsbreite der Jahressummen und können daher als extreme Entwicklungspfade für eine mögliche Zunahme der Grundwasserneubildung Verwendung finden. Dagegen liegen die Änderungssignale der Kombinationen R26-HG2-RCA, R45-MP1-RCA oder R85-E01-RAC in vielen Großlandschaften nahe am Median der jeweiligen Ensembleteile und können daher als

Entwicklungspfade im „mittleren Bereich“ berücksichtigt werden. R26-E12-RCA, R85-CA2-CLM und R85-MI5-CLM bilden Perioden mit stärkerer „Grundwasserdürre“ ab, in denen die Grundwasserneubildung über eine Dekade hinweg sehr deutlich unter den langjährigen Mittelwert fällt und auch monoton abnehmende Trends sichtbar sind. Diese Kombinationen können daher als Szenarien für Perioden mit einer unterdurchschnittlichen bzw. abnehmenden Grundwasserneubildung genutzt werden. Die Steckbriefe (Kapitel 3.3) sowie die Abbildungen in den Kapiteln 3.2 und 3.4 unterstützen bei der Auswahl der für spezielle Studien in Frage kommenden Entwicklungspfade.

Mit Hilfe des Mann–Kendall-Trendtests (Methodik in Kapitel 2.3) lässt sich für alle hydrogeologischen Großlandschaften NRW's für die drei vergangenen (beobachteten) Dekaden 1991 bis 2020 ein signifikanter monoton abnehmender Trend in den jährlichen Grundwasserneubildungshöhen nachweisen (Details in Kapitel 4). Inwiefern sich dieser Trend in den kommenden Jahren fortsetzt, kann derzeit noch nicht prognostiziert werden. Feststellen lässt sich jedoch, dass die aktuell im Zeitraum 2003 bis 2020 beobachtete längere Phase einer unterdurchschnittlichen Grundwasserneubildung („Grundwasserdürre“) durch das RCP8.5-Teilensemble („Weiter-wie-bisher-Szenario“) als potentieller Entwicklungspfad für die Periode 2011 – 2040 projiziert wird. Allerdings kann dabei über die genauen Zeitpunkte (Anfangs- und Endjahr) keine Aussage getroffen werden, da Klimaprojektionen generell nicht zeitpunktgenau sind, sondern lediglich eine Eintrittsmöglichkeit aufzeigen. Insofern könnten Anpassungen bei der Bemessung der (erlaubten) Grundwasserentnahmen in naher Zukunft notwendig werden. Auch sollte ein zukünftiges Grundwassermanagement flexibel und resilient für eventuell länger und häufiger werdende Phasen gestaltet werden, in denen sich ein größeres Bilanzdefizit der Grundwasserneubildung gegenüber dem langjährigen Mittelwert entwickelt.

Im Fokus dieser Studie stand die Analyse der zukünftigen Grundwasserneubildung, da diese eine besonders wichtige Größe zur Berechnung der Grundwasserbilanz bei der Bewertung des mengenmäßigen Grundwasserzustands und zur Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen in NRW darstellt. Als Eingangsgröße zur Ermittlung des Grundwasserdargebots wird die mittlere Grundwasserneubildungshöhe aus dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA indirekt auch zur Bemessung von Wasserrechten herangezogen. Die NRW-weiten Ergebnisse des Multi-Modell-Ensembles sind nicht nur als Datenbasis für weiterführende Studien mit Bezug zur Grundwasserbewirtschaftung verfügbar. Es liegen zum Beispiel auch Projektionen der Sickerwasserhöhe und der urbanen Direktabflusshöhe vor, die bei Bedarf näher dargestellt sowie statistisch ausgewertet werden können.

6 Kurzzusammenfassung

Mithilfe von Modellberechnungen und statistischen Auswertungen wurde im Rahmen dieser Studie eine qualitative und quantitative Bewertung der aufgrund des anthropogenen Klimawandels möglich erscheinenden Veränderung der Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen vorgenommen. Dazu wurden Projektionen mit einem Multi-Modell-Ensemble bis zum Jahr 2100 sowie statistische Analysen der projizierten Veränderung der Grundwasserneubildung durchgeführt. Das Multi-Modell-Ensemble besteht aus den im Verbundprojekt ReKlIEs-De bereitgestellten Klimaprojektionen und dem in Nordrhein-Westfalen auf Landesebene etablierten Wasserhaushaltsmodell mGROWA. Insgesamt wurden 37 potentielle Entwicklungspfade für eine zukünftige Grundwasserneubildung untersucht. Diesen Entwicklungspfaden liegen die drei Szenarien „Klimaschutz-Szenario“, „Stabilisierungs-Szenario“ und „Weiter-wie-bisher-Szenario“ hinsichtlich der Entwicklung der globalen Erwärmung zugrunde. Die nach diesen drei Klimaszenarien gegliederten Ensembleteile wurden hinsichtlich robuster Veränderungen überprüft, d.h. es wurde untersucht, ob bei einer Mehrheit der einzelnen Entwicklungspfade im jeweiligen Klimaszenario eine signifikante Veränderung der Grundwasserneubildung resultiert. Explizit wurde dazu die projizierte Grundwasserneubildung mit der Periode 1971 – 2000 verglichen.

Aus diesen Zeitreihen geht hervor, dass zukünftig auch mehrere außergewöhnliche Jahre in Folge mit einer Grundwasserneubildung unterhalb des 30-Jahre-Mittelwertes vorkommen können, so wie es in den vergangenen Jahren im Zeitraum 2003 bis 2020 tatsächlich in Nordrhein-Westfalen der Fall war. Auch deshalb sollte ein zukünftiges Grundwassermanagement flexibel und resilient für eventuell länger und häufiger werdende Phasen gestaltet werden, in denen sich ein größeres Bilanzdefizit aufgrund niedrigerer Grundwasserneubildung bei gleichzeitig höherem Wasserbedarf gegenüber dem bisher verwendeten, auf Basis historischer Daten abgeleiteten langjährigen Planungswert entwickelt. Die vorliegenden Robustheitstests liefern allerdings keine statistisch abgesicherten Belege dafür, dass sich die langjährige mittlere Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen systematisch und signifikant bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ändern wird. Statistisch gesehen kann deshalb die Schlussfolgerung gezogen werden, dass in Nordrhein-Westfalen auch zukünftig eine langjährige mittlere Grundwasserneubildung erwartet werden kann, die sich nicht grundlegend vom Niveau der Periode 1971 – 2000 unterscheidet. Mit aktualisierten Klimaszenarien und weiterentwickelten Klimamodellen sind aber neue Projektionen der Grundwasserneubildung möglich, die dann auch die Ergebnisse der hier durchgeführten Robustheitstests ändern und eine Anpassung der damit verbundenen Aussagen notwendig machen können. Insofern empfiehlt sich eine kontinuierliche Aktualisierung und Erweiterung des Ensembles gemäß den Empfehlungen des Deutschen Wetterdienstes und weiterer Gremien (IPCC, LAWA-AK, etc.).

Für die untersuchten Entwicklungspfade sind Steckbriefe verfügbar, die detaillierte Information zu den projizierten Zeitreihen der Grundwasserneubildung liefern. Die in den Steckbriefen dargestellten Entwicklungspfade können beispielsweise für Best Case/Worst Case-Analysen in wasserwirtschaftlichen Planungen, als Grundlage zur Abschätzung der möglichen Bandbreite des zukünftigen Grundwasserdargebotes oder auch zur Identifikation räumlicher Hotspots Verwendung finden. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass abgesehen von den Klima-Eingangsdaten alle anderen Faktoren (z.B. Flächenversiegelung) auf dem aktuellen Niveau konstant gehalten wurden, so dass lediglich der Einfluss der Klimaentwicklung auf die Grundwasserneubildung analysiert wurde.

7 Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG_HYDROGEOLOGIE: Regionale Hydrogeologie von Deutschland - Die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung. 456; Geol. Jb., Hannover (2016)
- BLOOMFIELD, J.P., ALLEN, D.J., GRIFFITHS, K.J.: Examining geological controls on baseflow index (BFI) using regression analysis: An illustration from the Thames Basin, UK. *Journal of Hydrology* 373, 164-176 (2009)
- BOGENA, H., KUNKEL, R., SCHÖBEL, T., SCHREY, H.P., WENDLAND, F.: Distributed modeling of groundwater recharge at the macroscale. *Ecological Modelling* 187, 15-26 (2005)
- DKRZ (o.J.) ESGF Node at DKRZ. <https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz/> Zugegriffen: im Jahr 2018
- DWD, 2017. Klimavorhersagen und Klimaprojektionen. www.dwd.de/klimavorhersagenundprojektionen.
- DWD (o.J.) Informationen zu den verfügbaren regionalen Klimaprojektionen. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/liste-klimaprojektionen.html?nn=541460 Zugegriffen: 03.12.2019
- EHRET, U., ZEHE, E., WULFMEYER, V., WARRACH-SAGI, K., LIEBERT, J.: Should we apply bias correction to global and regional climate model data? *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 3391-3404 (2012)
- ENGEL, N., MÜLLER, U., SCHÄFER, W.: BOWAB - Ein Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell. *GeoBerichte - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie* 20, 85-98 (2012)
- GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., YAPO, O.P.: Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydraulic Engineering* 4, 135-143 (1999)
- HABERLANDT, U., KLÖCKING, B., KRYSANOVA, V., BECKER, A.: Regionalisation of the base flow index from dynamically simulated flow components - a case study in the Elbe River Basin. *Journal of Hydrology* 248, 35-53 (2001)
- HATTERMANN, F., HUANG, S., KOCH, H.: Climate change impacts on hydrology and water resources. *Meteorologische Zeitschrift* 24, 201-211 (2015)
- HERRMANN, F., CHEN, S., HEIDT, L., ELBRACHT, J., ENGEL, N., KUNKEL, R., MÜLLER, U., RÖHM, H., VEREECKEN, H., WENDLAND, F.: Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Modell mGROWA. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 57, 206-224 (2013)
- HERRMANN, F., CHEN, S., KUNKEL, R., WENDLAND, F., 2014. Auswirkungen von Klimaänderungen auf das nachhaltig bewirtschaftbare Grundwasserdargebot und den Bodenwasserhaushalt in Nordrhein-Westfalen. Forschungszentrum Jülich GmbH, https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/auswirkungen_klimaaenderungen_auf_grundwasserdargebot_und_bodenwasserhaushalt_nrw.pdf.

- HERRMANN, F., HÜBSCH, L., ELBRACHT, J., ENGEL, N., KELLER, L., KUNKEL, R., MÜLLER, U., RÖHM, H., VEREECKEN, H., WENDLAND, F.: Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 61, 245-261 (2017)
- HERRMANN, F., KELLER, L., KUNKEL, R., VEREECKEN, H., WENDLAND, F.: 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 (2015)
- HERRMANN, F., WENDLAND, F., 2021. Modellierung des Wasserhaushalts in Nordrhein-Westfalen mit mGROWA. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30110b.pdf.
- HERRMANN, F., WENDLAND, F., WOLTERS, T., BERGMANN, S., EISELE, M.: Projektionen der Grundwasserneubildung unter dem Einfluss des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen. *Gewässerschutz - Wasser - Abwasser* 251, 13 (2020)
- HIMMELSBACH, T., NEUKUM, C.: Prognosen in der Hydrogeologie – Kristallkugel oder fundierte Wissenschaft? *Grundwasser* 23, 207-208 (2018)
- HOLMAN, I.P., ALLEN, D.M., CUTHBERT, M.O., GODERNIAUX, P.: Towards best practice for assessing the impacts of climate change on groundwater. *Hydrogeology Journal* 20, 1-4 (2012)
- HUANG, S., HATTERMANN, F.F., KRYSANOVA, V., BRONSTERT, A.: Projections of climate change impacts on river flood conditions in Germany by combining three different RCMs with a regional eco-hydrological model. *Climatic Change* 116, 631-663 (2013)
- HUANG, S., KRYSANOVA, V., ÖSTERLE, H., HATTERMANN, F.F.: Simulation of spatiotemporal dynamics of water fluxes in Germany under climate change. *Hydrological Processes* 24, 3289-3306 (2010)
- HÜBENER, H., BÜLOW, K., FOOKEN, C., FRÜH, B., HOFFMANN, P., HÖPP, S., KEULER, K., MENZ, C., MOHR, V., RADTKE, K., RAMTHUN, H., SPEKAT, A., STEGER, C., TOUSSAINT, F., WARRACH-SAGI, K., WOLDT, M., 2017a. ReKliEs-De Ergebnisbericht. <http://reklies.hlnug.de/fileadmin/tmpl/reklies/dokumente/ReKliEs-De-Ergebnisbericht.pdf>.
- HÜBENER, H., SPEKAT, A., BÜLOW, K., FRÜH, B., KEULER, K., MENZ, C., RADTKE, K., RAMTHUN, H., RATHMANN, T., STEGER, C., TOUSSAINT, F., WARRACH-SAGI, K., 2017b. ReKliEs-De Nutzerhandbuch. <http://reklies.hlnug.de/fileadmin/tmpl/reklies/dokumente/ReKliEs-De-Nutzerhandbuch.pdf>.
- HUEBENER, H., HOFFMANN, P., KEULER, K., PFEIFER, S., RAMTHUN, H., SPEKAT, A., STEGER, C., WARRACH-SAGI, K.: Deriving user-informed climate information from climate model ensemble results. *Advances in Science and Research* 14, 261-269 (2017)
- 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.: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14, 563-578 (2014)
- KENDALL, M.G.: A New Measure of Rank Correlation. *Biometrika* 30, 81-93 (1938)
- Knoche, R., Keuler, K.: Dynamische Regionalisierung. *promet* 99, 29-40 (2017)
- KOTLARSKI, S., KEULER, K., CHRISTENSEN, O.B., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GOBIET, A., GOERGEN, K., JACOB, D., LÜTHI, D., VAN MEIJGAARD, E., NIKULIN, G., SCHÄR, C., TEICHMANN, C., VAUTARD, R., WARRACH-SAGI, K., WULFMEYER, V.: Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development* 7, 1297-1333 (2014)
- LANUV (o.J.) Klimaatlas NRW. <https://www.klimaatlas.nrw.de/Klimaprojektionen-Artikel> Zugriffen: 12.09.2020
- MANN, H.B.: Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica* 13, (1945)
- MANN, H.B., WHITNEY, D.R.: On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *Annals of Mathematical Statistics* 18, 50-60 (1947)
- MARKE, T., MAUSER, W., PFEIFFER, A., ZÄNGL, G.: A pragmatic approach for the downscaling and bias correction of regional climate simulations: evaluation in hydrological modeling. *Geoscientific Model Development* 4, 759-770 (2011)
- MAUGET, S.A.: Multidecadal Regime Shifts in U.S. Streamflow, Precipitation, and Temperature at the End of the Twentieth Century. *Journal of Climate* 16, 3905-3916 (2003)
- MENZEL, L., THIEKEN, A.H., SCHWANDT, D., BÜRGER, G.: Impact of Climate Change on the Regional Hydrology - Scenario-Based Modelling Studies in the German Rhine Catchment. *Natural Hazards* 38, 45-61 (2006)
- MERZ, B., MAURER, T., KAISER, K.: Wie gut können wir vergangene und zukünftige Veränderungen des Wasserhaushalts quantifizieren? *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 56, 244-256 (2012)
- MILLY, P.C., BETANCOURT, J., FALKENMARK, M., HIRSCH, R.M., KUNDZEWICZ, Z.W., LETTENMAIER, D.P., STOUFFER, R.J.: Climate change. Stationarity is dead: whither water management? *Science* 319, 573-4 (2008)
- MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., LIEW, M.W.V., BINGNER, R.L., HARMEL, R.D., VEITH, T.L.: Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* 50, 885-900 (2007)
- 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.: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747-756 (2010)

- NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V.: River flow forecasting through conceptual models: Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282-290 (1970)
- PFEIFER, S., BÜLOW, K., GOBIET, A., HÄNSLER, A., MUDELSEE, M., OTTO, J., RECHID, D., TEICHMANN, C., JACOB, D.: Robustness of Ensemble Climate Projections Analyzed with Climate Signal Maps: Seasonal and Extreme Precipitation for Germany. *Atmosphere* 6, 677-698 (2015)
- RAUTHE, M., STEINER, H., RIEDIGER, U., MAZURKIEWICZ, A., GRATZKI, A.: A Central European precipitation climatology Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift* 22, 235-256 (2013)
- SACHS, L., HEDDERICH, J.: *Angewandte Statistik - Methodensammlung mit R*; Springer Berlin Heidelberg (2009)
- SCHEIHING, K.W.: Klimawandel in Niedersachsen und mögliche Folgen für die Grundwasserbewirtschaftung: ein Review. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung* 63, 85-97 (2019)
- SCHMIDLI, J., FREI, C., VIDALE, P.L.: Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology* 26, 679-689 (2006)
- SØRLAND, S.L., SCHÄR, C., LÜTHI, D., KJELLSTRÖM, E.: Bias patterns and climate change signals in GCM-RCM model chains. *Environmental Research Letters* 13, (2018)
- TAYLOR, K.E.: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 106, 7183-7192 (2001)
- TETZLAFF, B., 2021. Ausweisung potenziell dräniertes Flächen unter landwirtschaftlicher Nutzung in Nordrhein-Westfalen. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30110c.pdf.
- WILCOXON, F.: Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin* 1, 80–83 (1945)
- WILLKOFER, F., SCHMID, F.-J., KOMISCHKE, H., KORCK, J., BRAUN, M., LUDWIG, R.: The impact of bias correcting regional climate model results on hydrological indicators for Bavarian catchments. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 19, 25-41 (2018)

Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de