WRM
AG Wasserversorgung
Rhein-Main

BGS UMWELT
Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH

Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt
- Abschlussbericht -

Projekt 5789
Oktober 2021

Tel (0 61 51) 94 56-0 • Fax (0 61 51) 94 56 80
www.bgsumwelt.de • info@bgsumwelt.de
An der Eschollmühle 28 • D-64297 Darmstadt

Herausgeber

Arbeitsgemeinschaft Wasserversorgung Rhein-Main (WRM)
Taunusstraße 100, 64521 Groß-Gerau
www.ag-wrm.de

Bearbeitung

BGS UMWELT
An der Eschollmühle 28, 64297 Darmstadt

in Zusammenarbeit mit dem

WRM-Arbeitskreis „Fachgutachten“

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise 7
2 Preprocessing der Klimaprojektionsdaten 9
2.1 Projekt-Ensemble 9
2.2 Bias-Korrektur 14
2.3 Regionalisierung 16
3 Methodik der Modellrechnungen zur Grundwasserneubildung und zum Grundwasserhaushalt 19
3.1 Grundwasserneubildung aus Niederschlag 19
3.1.1 Grundlagen 19
3.1.2 Abgebildete Prozesse und Eigenschaften 20
3.1.3 Niederschlag und potentielle Verdunstung 21
3.1.4 Böden und Wasserbewegung in der ungesättigten Zone 22
3.1.5 Landnutzung 23
3.1.6 Grundwasserflurabstand – kapillarer Aufstieg 23
3.1.7 Tatsächliche Verdunstung 23
3.1.8 Landwirtschaftliche Bewässerung 24
3.2 Regionaler Grundwasserhaushalt 25
3.2.1 Grundwassermodell Hessisches Ried 25
3.2.2 Grundwassermodell Hessischer Untermain 28
4 Grundwasserneubildung 30
4.1 Hessisches Ried 30
4.1.1 Beobachtungszeitraum 30
4.1.2 Projektionen 31
4.2 Untermain 33
4.2.1 Beobachtungszeitraum 33
4.2.2 Projektionen 34
4.3 Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg 36
4.3.1 Beobachtungszeitraum 36
4.3.2 Projektionen 37
5 Grundwasserstände 39
5.1 Hessisches Ried 39
5.2 Hessischer Untermain 40
5.3 Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg 41
6 Zusammenfassung und Einordnung der Berechnungsergebnisse 45
6.1 Auswahl der Klimaprojektionen 45
6.2 Grundwasserneubildung im Klimawandel 46
6.3 Nass- und Trockenperioden, Entwicklung des Dargebots 48
6.4 Einordnung der Dargebotsentwicklung 49

6.5 Landwirtschaftliche Bewässerung 50
6.6 Bewertung des Kenntnisstandes 51
7 Kurzfassung 52
8 Literaturverzeichnis 56

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Matrix der Modellketten, Globalmodelle in Zeilen, Regionalmodelle in Spalten 11
Abb. 2: Mittlere Änderung der Jahresmittel der Niederschläge (oben) und der potentiellen Verdunstung (unten) der betrachteten Projektionen der Zeiträume 2070-2099 zu 1971-2000, Mitglieder des Projekt-Ensembles jeweils dunkel gekennzeichnet, exemplarisch für Elementarfläche 5 „Südliches Ried“. Nicht verwendete WETTREG-Läufe wurden der Übersichtlichkeit halber ausgeblendet. 12
Abb. 3: Mittlere Änderung der Jahresniederschläge (oben) und der potentiellen Verdunstung (unten) des der zur Verfügung stehenden Projektionen des EURO-CORDEX- und des Projekt-Ensembles, exemplarisch für Elementarfläche 5 „Südliches Ried“ 13
Abb. 4: Biaskorrektur: mittlerer Jahresverlauf der Tagessummen des Niederschlags für verschiedene Zeiträume – Tag des Jahres auf der x-Achse, Beobachtungsdaten (blau), Rohdaten (rot) und biaskorrigierte Daten (grün), exemplarisch für eine EUR11-Zelle im südlichen Hessischen Ried, HadGEM2_rsp85_RCA4 15
Abb. 5: Biaskorrektur: mittlerer Jahresverlauf der Tagessummen der potentiellen Verdunstung für verschiedene Zeiträume – Tag des Jahres auf der x-Achse, Beobachtungsdaten (blau), Rohdaten (rot) und biaskorrigierte Daten (grün), exemplarisch für eine EUR11-Zelle im südlichen Hessischen Ried, HadGEM2_rsp85_RCA4 16
Abb. 6: Statistisches Downscaling 17
Abb. 7: Prozesse des Bodenwasserhaushaltes 21
Abb. 8: Gewässerstrukturen und Brunnen im Grundwassermodell Hessisches Ried 27
Abb. 9: Modellstrukturen des Grundwassermodells Hessischer Untermain 29
Abb. 10: Berechnete jährliche Grundwasserneubildung 1971-2020, Hessisches Ried 31
Abb. 11: Mittlere Grundwasserneubildung in den Vergleichszeiträumen, Hessisches Ried 32
Abb. 12: Mittlere Landwirtschaftliche Bewässerung in den Vergleichzeiträumen, Hessisches Ried 33

Abb. 13: Berechnete jährliche Grundwasserneubildung 1971-2020, Hessischer Untermain 34
Abb. 14: Mittlere Grundwasserneubildung in den Vergleichszeiträumen, Hessischer Untermain 35
Abb. 15: Berechnete jährliche Grundwasserneubildung 1971-2020, Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg 36
Abb. 16: Mittlere Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1971-2020 Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg 37
Abb. 17: Mittlere Grundwasserneubildung in den Vergleichszeiträumen, Wetterau und Westlicher und Unterer Vogelsberg 37
Abb. 18: Monatliche Grundwasserneubildung und Grundwasserstandsganglinie ohne Fördereinfluss (IMF012) 43
Abb. 19: Monatliche Grundwasserneubildung und Grundwasserstandsganglinie ohne Fördereinfluss (RMT131) 44

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Projekt-Ensemble 10

Anlagenverzeichnis

Anlage 1-1 Mittlere Grundwasserflurabstände Hessisches Ried
Anlage 1-2 Mittlere Grundwasserflurabstände Hessischer Untermain
Anlage 2 Mittlere Grundwasserneubildung im Bezugszeitraum (1971-2000), in naher Zukunft (2021-2050) und ferner Zukunft (2070-2099) mit Differenzen - Hessisches Ried
Anlage 3 Jährliche Grundwasserneubildung 1971-2100 - Hessisches Ried
Anlage 4 Mittlere Grundwasserneubildung im Bezugszeitraum (1971-2000), in naher Zukunft (2021-2050) und ferner Zukunft (2070-2099) mit Differenzen - Hessischer Untermain
Anlage 5 Jährliche Grundwasserneubildung 1971-2100 - Hessischer Untermain
Anlage 6 Mittlere Grundwasserneubildung im Bezugszeitraum (1971-2000), in naher Zukunft (2021-2050) und ferner Zukunft (2070-2099) mit Differenzen - Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg

Anlage 7 Jährliche Grundwasserneubildung 1971-2100 - Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg
Anlage 8 Grundwasserstandsänderung gegenüber Bezugszeitraum - Hessisches Ried
Anlage 9 Grundwasserstandsganglinien 1971-2100 - Hessisches Ried
Anlage 10 Grundwasserstandsänderung gegenüber Bezugszeitraum - Hessischer Untermain
Anlage 11 Grundwasserstandsganglinien 1971-2100 - Hessischer Untermain Ried

Anhang

Anhang 1: Dokumentation Bodenwasserhaushaltsmodell Westlicher Unterer Vogelsberg

1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Die zukünftige klimatische Entwicklung und deren Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung stellen eine maßgebliche Randbedingung für die zukünftige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen und damit auch für die die Sicherstellung der Wasserversorgung in der Rhein-Main-Region dar. Im Rahmen einer Untersuchung einer geeigneten Auswahl verfügbarer Klimaprojektionen (Ensemblebetrachtung) sollen die aus wasserwirtschaftlicher Sicht mit hoher Wahrscheinlichkeit abzuleitenden mittel- bis langfristigen Veränderungen aufgezeigt und notwendige Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel abgeleitet werden.

Im Jahr 2006 hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung die Fördermaßnahme „klimazwei - Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ begonnen. Eines der geförderten Verbundprojekte hat sich in Südhessen mit „Anpassungsstrategien an Klimatrends und Extremwasser und Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement“ (AnKliG) befasst. Auf Grundlage des globalen Klimamodells ECHAM5 wurden unterschiedliche Ansätze der Regionalisierung von den Projektbeteiligten, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Hessenwasser GmbH und BGS Umweltplanung GmbH (BGS UMWELT), systematisch für das Emissionsszenario A1B untersucht und die Wirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserbewirtschaftung abgeschätzt.

Als Diskussionsbasis und Bewertungsgrundlage sah es die Arbeitsgemeinschaft Wasserversorgung Rhein-Main (WRM), auch vor dem Hintergrund des Trockenjahres 2018, als erforderlich an, eine Aktualisierung des Kenntnisstandes zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt vorzunehmen. Mit der entsprechenden Fachbearbeitung hatte die WRM Anfang 2019 die BGS UMWELT beauftragt.

In Phase 1 des Vorhabens „Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt“ wurden systematisch die Ergebnisse regionaler Klimamodellierungen hinsichtlich ihrer Eignung für die Bearbeitung von Fragestellungen zur regionalen Grundwasserbewirtschaftung zusammengestellt, analysiert und bewertet. Nach wie vor stellen insbesondere die Prozesse bei der Niederschlagsbildung eine Herausforderung in der Klimamodellierung dar, die bei der Modellerstellung nicht allgemeingültig gelöst ist. Weiterhin wurde die Bedeutung des regionalen Klimamodells innerhalb der Modellkette bei der Betrachtung wasserwirtschaftlicher Fragestellungen herausgearbeitet. Daher ist der Ensemble-Ansatz mit der Betrachtung mehrerer Modellketten für eine valide Berücksichtigung der Klimaentwicklung bei Fragestellungen zur Grundwasserbewirtschaftung unverändert gültig. Als Ergebnis der Phase 1 wurden Klimaprojektionen identifiziert, die eine charakteristische Bandbreite bei Niederschlag und potentieller Verdunstung in Folge des Klimawandels in der Grundwasserbewirtschaftung abdecken. An für die Gewinnungsgebiete charakteristischen Situationen (Elementarflächen) wurde lokal in Bodenhaushaltsberechnungen ermittelt, dass die Klimaprojektionen in Abhängigkeit insbesondere von Landnutzung und Bodenaufbau ein deutliches Klimaänderungssignal bezüglich der Grundwasserneubildung zeigen.

In Phase 2 wurde das Klimaänderungssignal im Grundwasserhaushalt exemplarisch in den Flächen der großen Gewinnungsgebiete für die Wasserversorgung des Rhein-Main-Ballungsraumes

Hessisches Ried, Westlicher Unterer Vogelsberg und Hessischer Untermain (Hanau-Seligenstädter Senke) ausgewertet, um insbesondere die Veränderung im Grundwasserdargebot als Folge des Klimawandels zu ermitteln.

Zur Abschätzung der klimabedingten Änderungen im Grundwasserdargebot und weiterer Größen der Grundwasserbewirtschaftung wurde der Ensemble-Ansatz beibehalten. Das in Phase 1 identifizierte Projektensemble wurde bei einer Projektion an die aktuelle Entwicklung bei der regionalen Klimamodellierung angepasst, indem eine der beiden ursprünglich ausgewählten WETTREG-Projektion durch das Nachfolgemodell EPISODES (ebenfalls statistischer Ansatz) ersetzt wurde.

Das mögliche Maß der Klimawirkungen (Klimaänderungssignal) wurde mit den systematisch ausgewählten Klimaprojektionen erfasst, die mit Bezug auf die Grundwasserbewirtschaftung die zukünftige charakteristische Bandbreite bei den antreibenden Größen Niederschlag und Verdunstung bis 2100 abbilden.

Die Änderungen in der flächenhaften Grundwasserneubildung als maßgebliche Größe des Grundwasserdargebots wurden für die einzelnen Klimaprojektionen in Bodenwasserhaushaltsberechnungen für die o.g. drei Gewinnungsgebiete ermittelt. Die Wirkungen im Grundwasserhaushalt wurden im Hessischen Ried und im Hessischen Untermain in Simulationen mit vorhandenen instationären Grundwassermodellrechnungen quantifiziert. Wegen der komplexen hydrogeologischen Verhältnisse im Vogelsberg wurden die Bodenhaushaltsrechnungen am Fallbeispiel des Wasserwerks Inheiden mit Beobachtungsdaten zu Grundwasserständen im Einzugsgebiet und Fördermengen korreliert, um das Klimaänderungssignal im Grundwasserhaushalt abzuschätzen.

Aus den Ergebnissen für die drei ausgewählten Untersuchungsgebiete wurden Einschätzungen für die Entwicklung in anderen relevanten Gewinnungsbereichen der WRM Mitgliedsunternehmen abgeleitet.

Hieraus lassen sich wichtige und belastbare Erkenntnisse auch in Bezug auf die zukünftige Wasserversorgung des Rhein-Main-Ballungsraumes gewinnen, die maßgeblich von der Grundwasserneubildung und dem nutzbaren Grundwasserdargebot abhängt.

2 Preprocessing der Klimaprojektionsdaten

2.1 Projekt-Ensemble

Systematische Modellfehler, die Bandbreite der Treibhausgasemissionen sowie die natürliche Klimavariabilität führen zu einer großen Bandbreite projizierter möglicher Änderungen des Klimas. Zur Abschätzung der hieraus folgenden Unsicherheiten, ist die Betrachtung von Projektions-Ensembles in der Impact-Forschung heute wissenschaftlicher Standard.

Ein Projekt-Ensemble setzt sich im Idealfall aus mehreren Projektionen möglichst vieler verschiedener Global-Regionalmodellkombinationen (Modellketten) zusammen. Andererseits wird die Größe des Projekt-Ensembles oftmals auch durch den Rechenaufwand des verwendeten Impactmodells bzw. durch die vorhandenen Rechnerkapazitäten beschränkt. Ziel bei der Zusammenstellung des Projekt Ensembles ist somit die möglichst vollständige Abbildung der Bandbreite aller verfügbaren Klimaprojektionen bei gleichzeitiger Minimierung der Ensemblegröße.

Die aufgrund der standardisierten, zentralen Speicherung in den EURO-CORDEX-Datenknoten (CORDEX = Coordinated Downscaling Experiment for Europe) vereinfachte Verfügbarkeit von Projektionsdaten ermöglicht ein effizienteres, skript-basiertes Processing und erleichtert die ensemble-basierte Bearbeitung von Fragestellungen der Impact-Forschung damit erheblich.

Im Vorhinein von der Analyse ausgeschlossen wurden Projektionen, bei denen aufgrund fehlender meteorologischer Parameter eine Berechnung der potentiellen Evapotranspiration nicht möglich war. Außerdem wurde zum Großteil den Empfehlungen von DWD und ReKliEs-DE zum Ausschluss von problematischen Modellen und fehlerhaften Projektionen gefolgt.

Die Zusammenstellung des Projekt-Ensembles erfolgte dann systematisch anhand folgender Kriterien:

- Berücksichtigung möglichst vieler verschiedener Global- und Regionalmodelle
- Berücksichtigung sowohl statistischer, als auch dynamisch-numerischer Regionalmodelle
- Betrachtung mehrerer RCP-Szenarien
- Weitgehende Abbildung der gesamten Bandbreite des Änderungssignals (Jahressummen, saisonal) des Niederschlags und der potentiellen Verdunstung der vorliegenden Projektionen des EURO-CORDEX
- Auswahl von Projektionen, denen eine markante Dynamik in der mehrjährigen klimatischen Wasserbilanz zu eigen ist, um Extremphasen zu erfassen

Zur Unterstützung bei der Auswahl wurden zunächst statistische Analysen der vorliegenden Projektionen hinsichtlich der Stärke des Klimasignals der Parameter Niederschlag und potentieller Verdunstung durchgeführt. Die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration (nach Penman-Monteith) erfolgte hierbei nach ATV-DVWK-M 504/DWA-M 504-1.

Für die Auswirkung meteorologischer Extreme auf den Grundwasserhaushalt sind weniger die statistischen Maxima und Minima selbst, als vielmehr das zeitliche Andauern von Hoch- und Tiefphasen von Bedeutung. Wasserwirtschaftliche Trocken- bzw. Nassphasen lassen sich in der

Dynamik in der Ganglinie der mehrjährigen klimatischen Wasserbilanz erkennen. Um dem letzten oben genannten Kriterium gerecht zu werden, wurden daher Ganglinien-Grafiken der Parameter Niederschlag, potentieller Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz visuell beurteilt.

Aus 124 zur Verfügung stehenden Projektionen - darunter je 10 Realisierungen von 7 mit WETTREG regionalisierten Simulationen und 37 EPISODES-Zeitreihen - wurde ein Projekt-Ensemble aus 6 Projektionen zusammengestellt (vgl. Abb. 1 und Tab. 1).

Tab. 1: Projekt-Ensemble

Nr	Projektion	Globalmodell	RCP-Szenario	Regionalmodell
1	MIROC-MIROC5_rcp85_r1i1p1_CEC-WETTREG2013_v1-r6	MIROC-MIROC5	RCP 8.5	WETTREG2013
2	MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp26_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1a	MPI-M-MPI-ESM-LR	RCP 2.6	RCA4
3	MOHC-HadGEM2-ES_rcp85_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1	MOHC-HadGEM2-ES	RCP 8.5	RCA4
4	CCCma-CanESM2_rcp85_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1	CCCma-CanESM2	RCP 8.5	CCLM4-8-17
5	ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r12i1p1_KNMI-RACMO22E_v1	ICHEC-EC-EARTH	RCP 8.5	RACMO22E
6	ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r12i1p1_DWD-EPISODES2018_v1-r1	ICHEC-EC-EARTH	RCP 8.5	EPISODES2018

Das Ensemble umfasst demnach:

- 5 verschiedene Globalmodelle
- 5 verschiedene Regionalmodelle, davon 2 statistische, 3 dynamische
- 2 Projektionen statistischer, 4 Projektionen dynamischer Regionalmodelle
- 5 Projektionen RCP 8.5, 1 Projektion RCP 2.6
- 2 Projektionen desselben globalen Antriebs unter Verwendung je eines statistischen und eines dynamischen Regionalmodells

Geeignete Projektionen des moderaten RCP 4.5-Szenarios standen zum Zeitpunkt der Ensemble-Erstellung nicht zur Verfügung. RCP2.6 entspricht dabei einem Szenario mit deutlichen Anstrengungen beim Klimaschutz, die auch Anstrengungen im Bereich negativer Emissionen einschließen; RCP8.5 entspricht einem „Weiter-so-wie-bisher“-Szenario (sog. Baseline); RCP4.5 beschreibt moderate Entwicklungen, deren Klimawirkungen in ihrer Bandbreite durch die beiden vorgenannten Szenarien erfasst werden.

Anhand von Abb. 2 lässt sich erkennen, dass das Projekt-Ensemble die Bandbreite der untersuchten Projektionen hinsichtlich der Änderungssignale der Variablen Jahressumme des Niederschlags und der potentiellen Verdunstung gut abbildet. Ein vergleichbares Ergebnis zeigt sich bei der Auswertung der mittleren saisonalen Veränderungen

GCM / RCM	RCP	STARS3 (3)	WETTREG13 (4)	EPISODES (5)	CCLM	REMO (6)	WRF (7)	RCA4	RACMO	HIRHAM5 (4)
EC-EARTH	RCP 2.6									
HadGEM2-ES	RCP 2.6									
MPI-ESM-LR	RCP 2.6									
CanESM2	RCP 8.5									
CNRM-CM5 (1)	RCP 8.5									
EC-EARTH	RCP 8.5									
HadGEM2-ES	RCP 8.5									
IPSL-CM5A-MR (2)	RCP 8.5									
MIROC5	RCP 8.5									
MPI-ESM-LR	RCP 8.5									
NCC-NorESM1-M	RCP 8.5									

untersuchte Projektionen | nicht untersuchte Projektionen | Projekt-Ensemble | Ausschluss aufgrund von Fehlern / Problemen | Ausschluss aufgrund fehlender Parameter / unvollst. Daten

Globalmodelle

EC-EARTH	Europäisches Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage
CanESM2	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques
HadGEM2-ES	UK Met Office Hadley Centre
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace
MIROC5	Universität Tokio und Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie
NCC-NorESM1-M	Norwegian Climate Centre

Regionalmodelle

CCLM	COSMO-CLM: CLM-Community, Klimaprojektionen durch DWD und BTU Cottbus-Senftenberg
EPISODES2018	Deutscher Wetterdienst
HIRHAM5	Danish Meteorological Institute
RACMO	Royal Netherlands Meteorological Institute
RCA4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre
REMO2015	Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Klimaprojektionen durch Climate Service Center GERICS
STARS3	PIK-Potsdam (empirisch-statistisch)
WETTREG2013	CEC-Potsdam, Projektionen durch PIK-Potsdam (empirisch-statistisch)
WRF	University Corporation for Atmospheric Research, Klimaprojektionen durch Universität Hohenheim

(1) CNRM-CM5 wurde aufgrund inkonsistenter Boden- und Atmosphärendaten als Antrieb für dynamische Modelle zurückgezogen

(2) Simulation IPSL-CM5A-MR - WRF wurde wegen eines Fehlers in den Antriebsdaten zurückgezogen

(3) PIK-STARS3 ist für im Vergleich zur Gegenwart stark veränderte Klimazustände nicht geeignet und sollte daher mit RCP8.5 für Zeiträume ab etwa 2060 nicht verwendet werden

(4) Bei den Regionalmodellsimulationen CEC-WETTREG2013 und PIK-STARS3 waren bei der Übertragung der Parameter Sonnenscheindauer und Luftdruck auf das EURO-CORDEX-Gitter Probleme aufgetreten. Set Januar 2020 liegen Korrekturen vor. Die Daten wurden nach Prüfung übernommen und die betroffenen Datensätze neu berechnet.

(5) 37 EPISODES2018-Läufe dreier RCP-Szenarien standen ab Mitte 2020 auf dem EURO-CORDEX zur Verfügung. Zu diesem Zeitpunkt war der Auswahlprozess für das Projekt-Ensemble bereits abgeschlossen. Zur Erweiterung des Regionalmodellspektrums wurde nach Prüfung der Auswirkungen auf die Ensemble-Bandbreite die WETTREG-Projektion ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r12i1p1_CEC-WETTREG2013_v1-r7 durch die EPISODES-Regionalisierung desselben Globalmodell-Laufs ersetzt. Die Daten wurden vorab direkt vom DWD übermittelt. In der Grafik sind nicht alle verfügbaren EPISODES-Modellketten aufgeführt (vgl.https://www.dwd.de/DE/leistungen/episodes/episodes.html?nn=350544)

(6) Die Simulationsergebnisse des Regionalmodells REMO sind nach Hinweisen des Klimaprojektionsaudit Bayern hinsichtlich des Jahresverlaufs der Niederschläge für die Verwendung in Wasserhaushaltsmodellen problematisch („Nachfolge-Workshop des Verbundprojekts ReKliEs-De" am 13.02.2019)

(7) Parameter für ETP-Berechnung unvollständig (Ausnahnme IPSL-CM5A-MR), Strahlungsdaten der Simulationen MPI-ESM-LR, HadGEM2-ES und EC-EARTH wurden zudem im April 2019 zurückgezogen

(8) Simulationen des HIRHAM5-Regionalmodells enthalten keine zeitliche Änderung der Treibhausgaskonzentrationen und wurden zurückgezogen

Im Februar 2019 am ESGF-DATA.DKRZ.DE-Knoten vorliegende EURO-CORDEX/ReKliEs-Projektionen, zuzüglich EPISODES; Ausschlüsse wurden bis Stand April 2020 aktualisiert

Abb. 1: Matrix der Modellketten, Globalmodelle in Zeilen, Regionalmodelle in Spalten

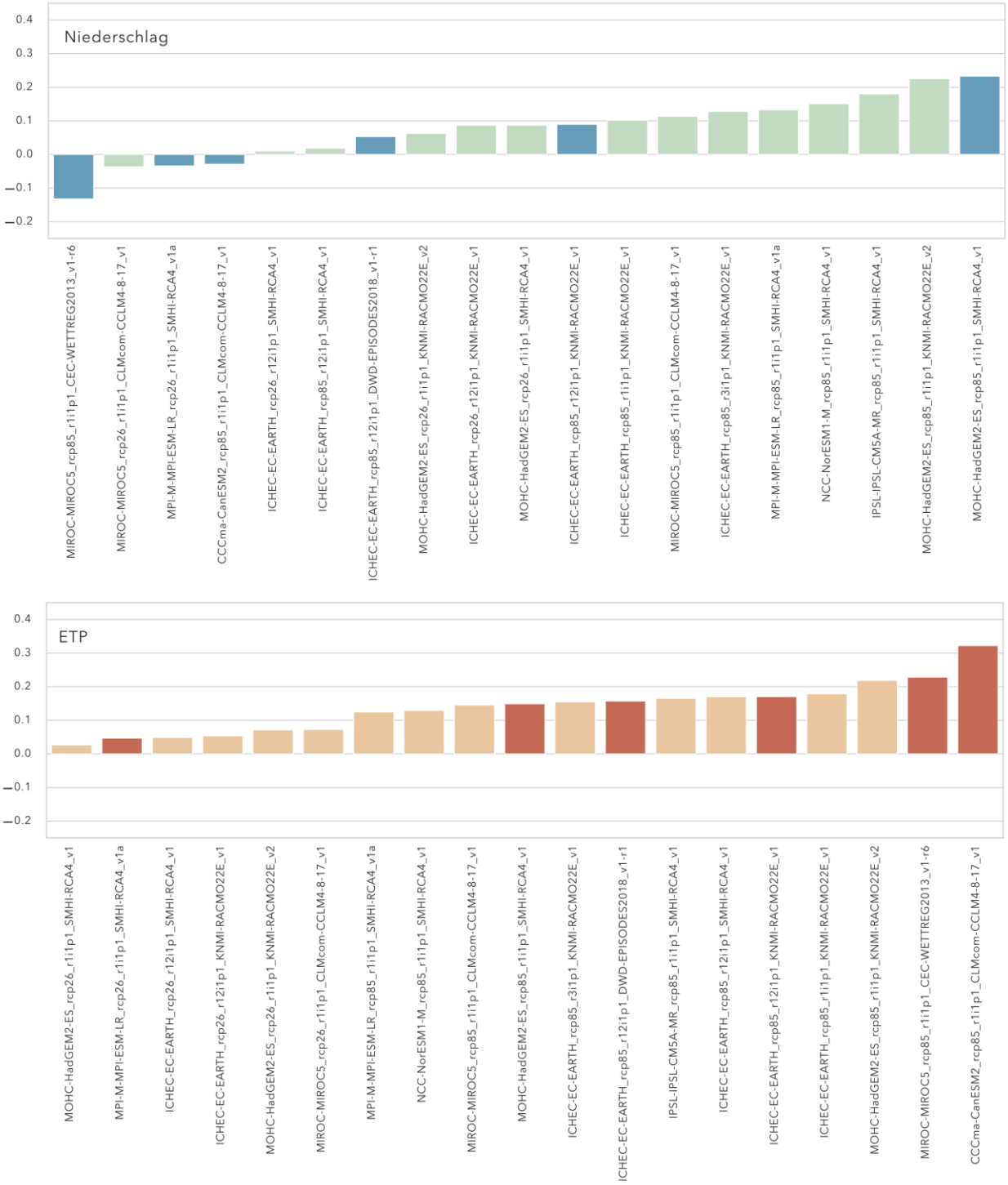

Abb. 2: Mittlere Änderung der Jahresmittel der Niederschläge (oben) und der potentiellen Verdunstung (unten) der betrachteten Projektionen der Zeiträume 2070-2099 zu 1971-2000, Mitglieder des Projekt-Ensembles jeweils dunkel gekennzeichnet, exemplarisch für Elementarfläche 5 „Südliches Ried“. Nicht verwendete WETTREG-Läufe wurden der Übersichtlichkeit halber ausgeblendet.

Abb. 3 zeigt die Änderungssignale der Variablen Jahresniederschlag und potentielle Verdunstung der untersuchten Projektionen des EURO-CORDEX und der ausgewählten Simulationen des Projekt-Ensembles.

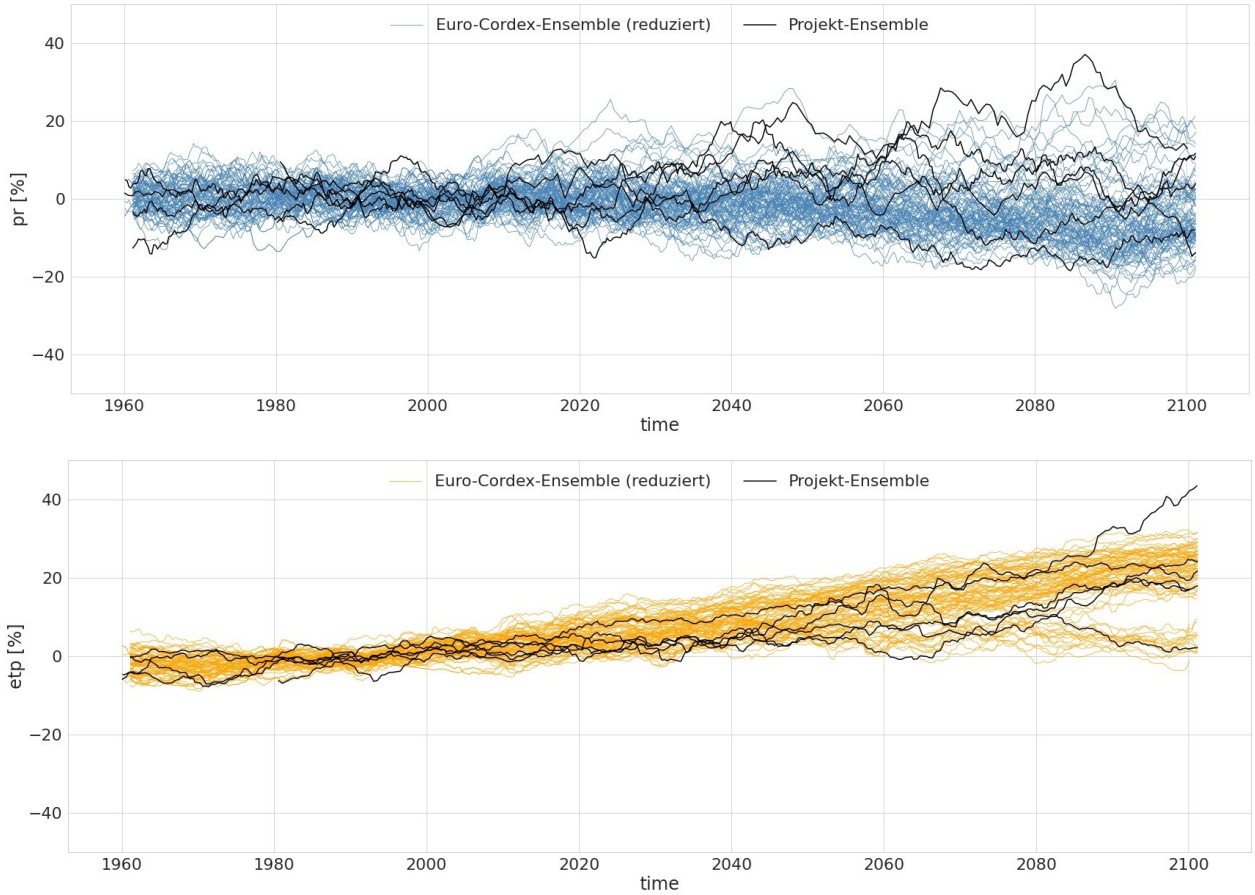

Abb. 3: Mittlere Änderung der Jahresniederschläge (oben) und der potentiellen Verdunstung (unten) der zur Verfügung stehenden Projektionen des EURO-CORDEX- und des Projekt-Ensembles, exemplarisch für Elementarfläche 5 „Südliches Ried“

Die WETTREG-Projektionen der Niederschläge zeichnen sich ab etwa 2030 als fallende, deutlich abgegrenzte Linienschar geringerer Bandbreite ab. Bei den dynamischen Projektionen ist dagegen eine größere Streuung, und keine klare Tendenz zu erkennen. Insgesamt zeigt sich eine große Varianz in der Niederschlagsentwicklung, das RCP-Szenario scheint hierbei jedoch kein wesentlicher Faktor zu sein.

Bei der Potenziellen Verdunstung zeigt sich ab etwa 2050 dagegen eine Trennung der Entwicklung in einen oberen RCP 8.5- und einen unteren RCP 2.6-Zweig. Alle Projektionen bilden damit die Korrelation der Verdunstung mit der Temperatur ab.

Insgesamt zeigen auch diese Darstellungen, dass das Projekt-Ensemble die gesamte durch das EURO-CORDEX-Ensemble gegebene Bandbreite gut abbildet.

2.2 Bias-Korrektur

Dynamische Klimamodelle sind Abbildungen der physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse und Wechselwirkungen der Komponenten des Klimasystems. Aufgrund der Komplexität des Systems und des näherungsweisen Charakters der Abbildungen enthalten die Ergebnisdatensätze dynamischer Klimamodelle systematische Fehler. Wirkmodelle zur Untersuchung der Folgen des Klimawandels - wie beispielsweise Bodenwasserhaushaltsmodelle - arbeiten überwiegend mit absoluten meteorologischen Eingabedaten. Vor der Verwendung der Ergebnis-Datensätze dynamischer Klimamodelle müssen diese systeminhärenten Fehler, der Bias, mittels geeigneter Verfahren korrigiert werden.

Hierbei werden zu den Ergebnisdaten Beobachtungsdaten als Bezugspunkt hinzugenommen und durch den Vergleich der Größen im überlappenden Kontrollzeitraum eine Korrekturvorschrift erstellt. Einfache Ansätze basieren auf additiven oder multiplikativen Operationen. Aufwändigere Verfahren nehmen eine Angleichung der kumulativen Dichtefunktionen (quantilsweise Anpassung) von Beobachtungsdaten und Modelldaten im Kontrollzeitraum vor und übertragen diese auf den Projektionszeitraum.

Bei vielen dieser Verfahren wird eine zeitliche Stationarität der Verteilung der meteorologischen Größen und der Modellfehler vorausgesetzt. Dadurch können ungewollt Klimasignale verringert oder verstärkt werden. Durch die getrennte Korrektur verschiedener meteorologischer Parameter können darüber hinaus physikalische Inkonsistenzen der Größen zueinander entstehen.

Um letzteres zu verhindern, wird die potenzielle Verdunstung aus den unkorrigierten, miteinander in korrekter physikalischer Beziehung stehender Projektionsdaten berechnet und erst im Anschluss biaskorrigiert. Niederschlag und die vorwiegend durch die Temperatur beeinflusste Verdunstung sind zu einander nur schwach korreliert und können demnach getrennt der Biaskorrektur unterzogen werden.

Für Erstellung der Eingangsdaten für die Bodenwasserhaushaltsmodelle wurden die Ergebnisdaten der dynamischen Regionalmodelle mit dem Quantile Delta Mapping-Verfahren (QDM) biaskorrgiert. Das QDM-Verfahren wird derzeit auch vom DWD für die Biaskorrektur verwendet.

Auch beim Quantile Delta Mapping wird über den Vergleich der Dichtefunktionen von Modell- und Beobachtungsdaten im Kontrollzeitraum zunächst eine Übertragungsfunktion erstellt, mit deren Hilfe die Modelldaten im Projektionszeitraum quantilsweise in den Wertebereich der Beobachtungsdaten im Kontrollzeitraum transformiert werden. Anschließend wird jedoch - abweichend vom verbreiteten Quantile Mapping - das Klimasignal durch Vergleich der Dichtefunktionen der Modelldaten in Projektions- und Kontrollzeitraum als Faktor ermittelt und den korrigierten Daten aufgeprägt. Diese Anpassung erfolgt hier über den Projektionszeitraum in 30-Jahreszeitscheiben, wobei jeweils die äußeren Dekaden verworfen werden und nur die mittlere Dekade gespeichert wird. So bleibt das Klimasignal über den gesamten Zeitraum erhalten.

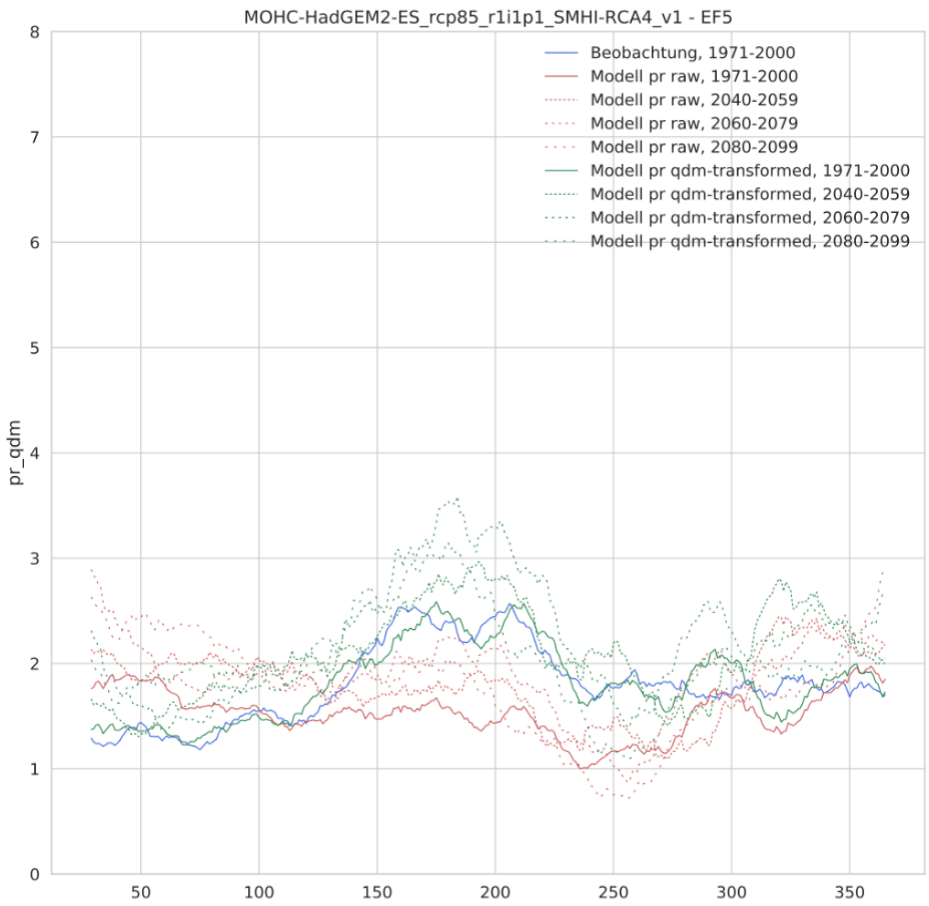

Abb. 4: Biaskorrektur: mittlerer Jahresverlauf der Tagessummen des Niederschlags für verschiedene Zeiträume – Tag des Jahres auf der x-Achse, Beobachtungsdaten (blau), Rohdaten (rot) und biaskorrigierte Daten (grün), exemplarisch für eine EUR11-Zelle im südlichen Hessischen Ried, HadGEM2_rsp85_RCA4

Abb. 4 zeigt anhand des mittleren Jahresverlaufs der Niederschlags-Tagessummen Art und Umfang der Korrektur. Den Beobachtungsdaten des Referenzzeitraums (blau) stehen die untransformierten (rot) und die transformierten Daten (grün) jeweils für verschiedene Bezugszeiträume gegenüber. Die durchgezogenen Linien entsprechen dabei den Verläufen im Referenzzeitraum. Das Korrekturverfahren bewirkt hier eine deutliche Anpassung des Verlaufs der Projektionsdaten an den der Beobachtungsdaten. Die relativen Änderungen des Jahresverlaufs der rohen Projektionsdaten über die verschiedenen Bezugszeiträume in der Zukunft - das Klimasignal – werden mittels QDM-Verfahren erhalten und finden sich so auch in den biaskorrigierten Daten (gepunktete Linien).

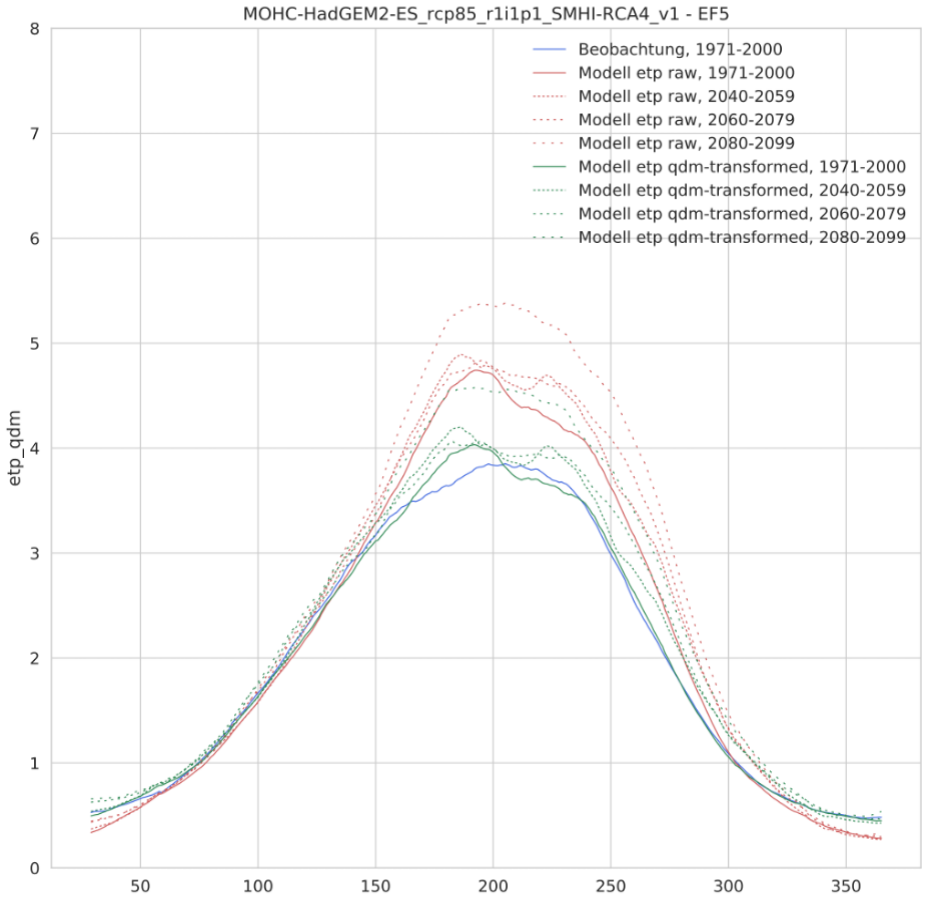

Abb. 5: Biaskorrektur: mittlerer Jahresverlauf der Tagessummen der potentiellen Verdunstung für verschiedene Zeiträume – Tag des Jahres auf der x-Achse, Beobachtungsdaten (blau), Rohdaten (rot) und biaskorrigierte Daten (grün), exemplarisch für eine EUR11-Zelle im südlichen Hessischen Ried, HadGEM2_rsp85_RCA4

In Abb. 5 ist analog die Korrektur der potentiellen Verdunstung dargestellt. Auch hier erkennt man eine Angleichung des Jahresverlaufs der Projektionsrohdaten (rot) an den der Beobachtungdaten (blau, transformiertes Ergebnis grün). Gleichzeitig prägt sich die Charakteristik der Projektionsdaten durch. Dies zeigt sich vor allem auch bei Betrachtung der biaskorrigierten Daten in den verschiedenen Bezugszeiträumen in der Zukunft (gepunktete Linien). Auch das Klimasignal, hier eine deutliche Anhebung des Scheitelpunktes im Sommer, bleibt erhalten.

2.3 Regionalisierung

Für eine regionale Bodenwasserhaushaltsmodellierung zur Bestimmung der Grundwasserneubildung werden die biaskorrigierten, meteorologischen Eingangsdaten Niederschlag und potentielle Verdunstung von der Auflösung des EUR11-Gitters auf das Modellgitter des Bodenwasserhaushaltsmodells verfeinert. Für dieses Downscaling stehen die üblichen Interpolationsverfahren zur Verfügung. Einfache Verfahren lassen jedoch Einflussfaktoren wie Topografie der Erdober-

fläche, Luv- und Lee-Effekte oder geografische Lageposition außer Acht, so dass mit diesen Methoden nur ein grobes Abbild der tatsächlichen Verhältnisse entsteht.

Mittels statistischem Downscaling (vgl. Krähenmann 2019) können dagegen bei der Regionalisierung großskaligen biaskorrigierten Modelldaten in einem Referenzzeitraum beobachtete, feinskalige räumliche Verteilungsmuster aufgeprägt werden. Diese Verteilungsmuster werden mittels Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis, kurz PCA) hochaufgelöster Referenz-Beobachtungsdatensätze ermittelt. Geeignete Vergleichsdatensätze im 1x1 km²-Raster für Niederschlag und Potenzielle Evapotranspiration ab 1991 werden vom DWD bereitgestellt.

Bei der Hauptachsentransformation werden die Eingangsdaten dekorreliert und auf einen Satz von Hauptkomponenten transformiert. Diese Hauptkomponenten stellen Linearkombinationen der Original-Variablen dar, sind voneinander unabhängig und erklären jeweils einen definierten Anteil an der Gesamtvarianz. Eine Reduktion der Dimensionalität erfolgt durch Beschränkung auf die ersten n Hauptkomponenten.

Nach der PCA wird durch Multiple Lineare Regression unter Verwendung der ersten n Kovarianzfelder, sowie Länge, Breite und Geländehöhe eine Beziehung zwischen Modelldaten und berechneten Hauptkomponenten in grober Auflösung hergestellt. Mittels der Regression-Koeffizienten werden in Folge Hintergrundfeld und Residuenfeld berechnet. Der regionalisierte Datensatz ergibt sich letztlich aus der Summe von Hintergrund- und Residuenfeld.

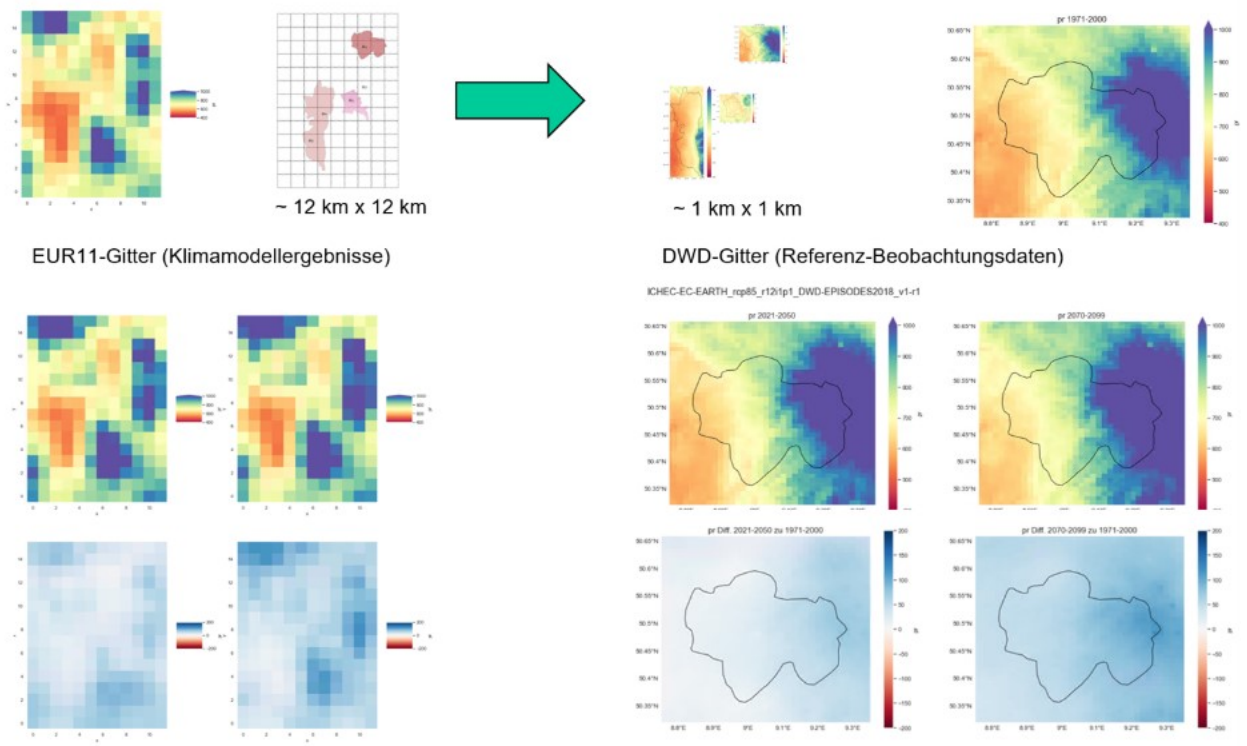

Abb. 6: Statistisches Downscaling

Das statistische Downscaling wurde für alle Läufe des Projekt-Ensembles durchgeführt. Die Auflösung der Daten wurde hierbei von ~ 12 km Rasterzellenbreite auf die Auflösung der Referenzdaten von ~ 1 km verfeinert (vgl. Abb. 6). Abschließend wurden die Ergebnisdatensätze mittels Inverse Distance Weighting (IDW) auf das Modellgitter des Bodenwasserhaushaltsmodells interpoliert (0,5 km) und für den Import aufbereitet.

3 Methodik der Modellrechnungen zur Grundwasserneubildung und zum Grundwasserhaushalt

3.1 Grundwasserneubildung aus Niederschlag

3.1.1 Grundlagen

Im regionalen Grundwasserhaushalt ist die Grundwasserneubildung eine maßgebliche Bilanzgröße. Im Rahmen instationärer Modellrechnungen muss aufgrund der zeitlichen und räumlichen Dynamik des Klima- und Grundwassergeschehens eine möglichst detaillierte Charakterisierung der flächenhaften Grundwasserneubildung erfolgen. Kernpunkt der Betrachtung ist hierbei die ungesättigte Bodenzone, da aus der Wechselbeziehung Boden/Vegetation mit dem übergeordneten Klimageschehen letztlich die effektive Grundwasserneubildung resultiert.

Für die Charakterisierung des regionalen Gebietswasserhaushaltes stellt sich somit die Frage nach der Einflussintensität der einzelnen hydrologischen Prozesse, deren Parametrisierung und deren gegenseitige Abhängigkeit. Es zeigt sich hierbei, dass die Modelltechnik im kleinräumigen Maßstab bei der Darstellung und Simulation komplexer Prozesse des Wasser- und Stofftransportes in einem sehr engen Vertrauensbereich arbeiten kann, was jedoch oftmals mit einer hohen Anzahl von Eingangsparametern verknüpft ist. Grundlegend wurden bei den konzeptionellen Überlegungen folgende Aspekte berücksichtigt:

- Wissenschaftlicher Kenntnisstand der Modelltechnik,
- Verfügbarkeit der modellspezifischen Eingangsparameter,
- Vertrauensbereiche der Ergebnisse bzw. Verifikationsmöglichkeiten,
- Regionalisierungsproblem - Frage nach Relevanz und räumlicher Variabilität einzelner Einflussfaktoren innerhalb eines regionalisierten Maßstabes.

Die Modellierung des Bodenwasserhaushalts erfolgte mit Hilfe der hydrologischen Modellierungs- und Simulationssoftware MIKE SHE von DHI-WASY. Die stationsbezogenen Klimadaten wurden mit der Software WaSiM-ETH der ETH Zürich regionalisiert.

Das angewendeten deterministischen und flächendifferenzierten Bodenwasserhaushaltsmodelle für das Hessische Ried, Hessischer Untermain und Westlicher Unterer Vogelsberg sind modular aufgebaut (s.u.). Die horizontale Diskretisierung der Untersuchungsgebiet abbildenden numerischen Rechenmodells (FD-Methodik MIKE SHE) erfolgte in einem gleichmäßigen quadratischen Raster mit einer Seitenlänge je nach Modellgebiet von 200 bis 250 m. Innerhalb der einzelnen Rasterzellen sind die vorliegenden flächenhaften Daten hinsichtlich des Niederschlags und der pot. Verdunstung, der Landnutzung und des Bodenaufbaus zu homogenisieren. Die räumliche Auflösung des Modells stellt dabei einen Kompromiss zwischen einer möglichst feinen Diskretisierung des Modellgebietes und der damit verbundenen Simulationsdauer dar. Die gewählte Auflösung ist insbesondere hinreichend, die charakteristischen Bodenformen in ihrer räumlichen Verbreitung im Modell abzubilden. Das im Rahmen dieses Vorhabens aufgebaute Bodenwasserhaushaltsmodell westlicher Unterer Vogelsberg ist in Anhang 1 dokumentiert.

Die Berechnungen wurden mit Niederschlags- und Verdunstungsdatensätzen auf Tageswertbasis durchgeführt. Die zeitliche Diskretisierung im Simulationszeitraum erfolgte in Zeitschritten mit einer maximalen Länge von 30 Minuten, wobei diese zu Zeitpunkten mit hohen hydraulischen Gradienten an der Geländeoberfläche (starker Niederschlag, anhaltende landwirtschaftliche Beregnung) von der Simulationssoftware dynamisch auf bis zu 1 Minute verkürzt wurden.

3.1.2 Abgebildete Prozesse und Eigenschaften

Abb. 7 skizziert in einer Übersicht die wichtigsten im Rahmen der Simulation berücksichtigten hydrologischen Prozesse. Neben dem Niederschlag und der potentiellen Verdunstung als Eingangsgrößen werden im Rahmen der Modellrechnungen sowohl alle den Bodenwasserhaushalt betreffenden relevanten Prozesse wie Interzeption, Transpiration, Evaporation, Pflanzenwachstum, Wurzelwasseraufnahme, Versickerung und kapillarer Aufstieg ebenso simuliert wie die künstliche Bewässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen. Wegen der geringen Reliefenergie wird ein längerer lateraler Transport bis in ein Fließgewässer (Oberflächenabfluss) nicht betrachtet.

In der Modellrechnung der ungesättigten Zone wurde die Grundwasserneubildung an der Grundwasseroberfläche ermittelt. Ein Fluss in das Grundwasser wird als positive Grundwasserneubildung und ein Fluss aus dem Grundwasser durch kapillaren Aufstieg als negative Grundwasserneubildung (Grundwasserzehrung) gewertet (hydraulischer Gradient im geschlossenen Kapillarsaum = 1).

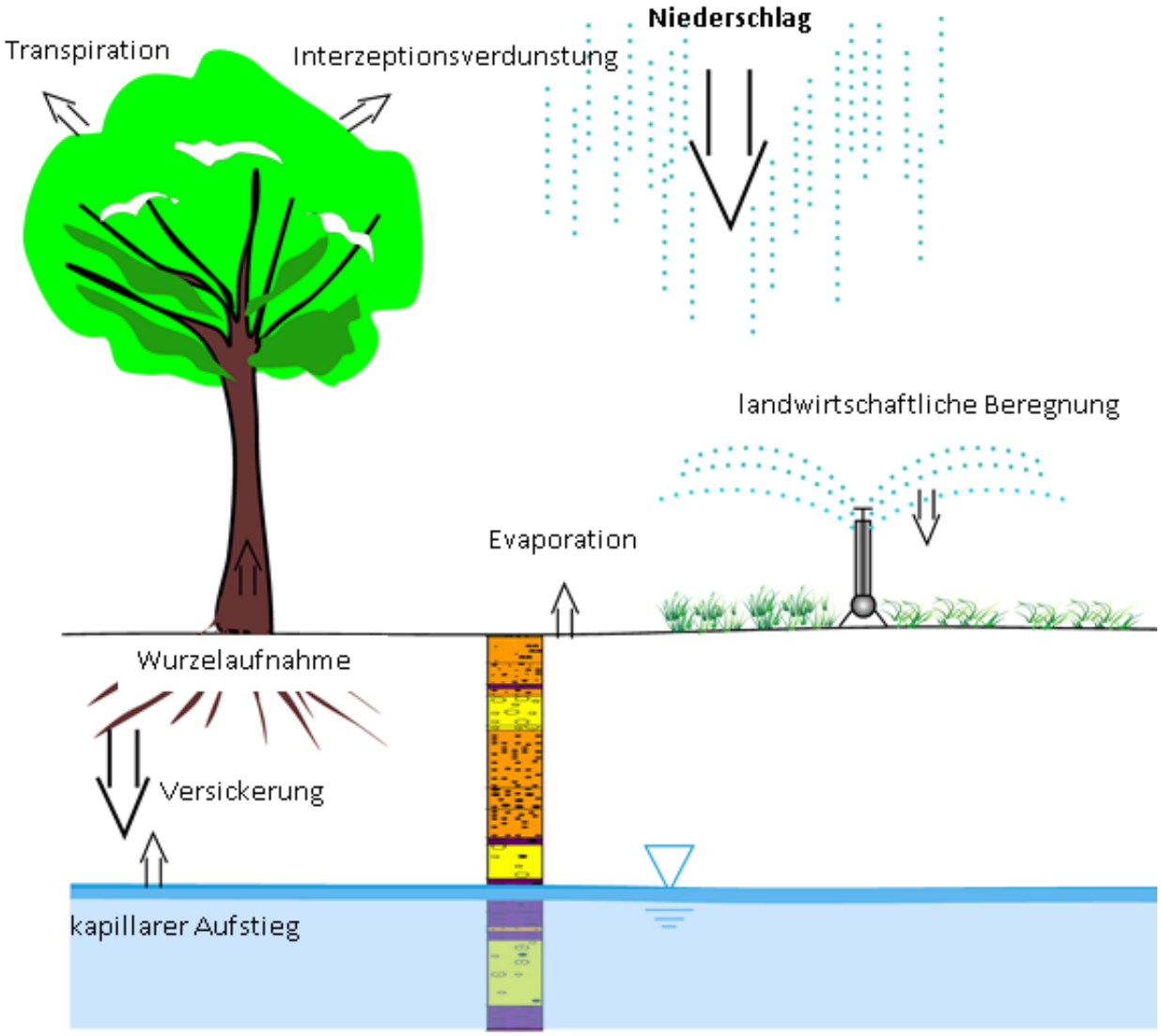

Abb. 7: Prozesse des Bodenwasserhaushaltes

3.1.3 Niederschlag und potentielle Verdunstung

Für die Modellrechnungen wurden die regionalisierten Tageswerte von Niederschlag und potentieller Verdunstung als atmosphärische Randbedingungen in die Bodenwasserhaushaltsmodelle importiert.

Für den Vergleich der Trockenperioden in den 1970er Jahren und ab 2003 im Zeitraums 1970-2020 wurden die stationsbezogenen Beobachtungsdaten zu Niederschlag und potentielle Verdunstung im Untersuchungsgebiet mit Hilfe des Programmpakets WaSiM-ETH regionalisiert. Hierfür wurden die Tageswert-Zeitreihen der Niederschlagsmessstellen aufbereitet und mittels einer Kombination von höhenabhängiger und inverser distanzgewichteter Interpolation (IDW) auf das MIKE-SHE-Modellraster interpoliert.

Für die Grasreferenzverdunstung lagen nach Penman-Monteith bzw. FAO-56 berechnete Werte vor, die direkt auf das Ausgaberaster interpoliert werden konnten. Um in der unregelmäßigen räumlichen Verteilung der Stationen begründete Artefakte zu adressieren, ging das Höhenregressionsverfahren zu 75 %, das IDW-Verfahren zu 25% ins Endergebnis ein.

Die Niederschlagswerte der Niederschlagsmessstellen wurden zunächst korrigiert. Hierfür wurde das in WaSiM-ETH integrierte Modul zur temperatur- und windabhängigen Korrektur nach Sevruk (1986) verwendet. Die Korrektur der Niederschläge erfolgte hier - abhängig von der Lufttemperatur - getrennt nach Regen und Schnee. Als Eingangsdatensätze wurden demnach - neben den Niederschlagsmengen - Windgeschwindigkeit und Lufttemperaturen in 2 m Höhe benötigt. Während die Temperaturen in der benötigten Form vorlagen, mussten die Winddaten zunächst von der jeweiligen Sensorhöhe auf Bezugshöhe 2 m umgerechnet werden. Die Niederschlagskorrektur nach Sevruk führt zu ca. 5-8 % höheren Werten im Vergleich zu unkorrigierten Niederschlagshöhen.

Die Korrektur der Niederschlagsdaten selbst erfolgte in einem Zug mit der Regionalisierung. Im Verlauf dieses Prozesses wurden zunächst die für die Klimastationen vorliegenden Sekundärdaten (Wind und Temperatur) auf die Koordinaten der Niederschlagsstationen interpoliert und die Korrektur der Niederschlagstageswerte durchgeführt. Abschließend wurden die korrigierten Niederschlagsdaten auf das Ausgaberaster interpoliert. Aufgrund des dichten Stationsnetzes und um auch räumlich begrenzten (konvektiven) Niederschlagsereignissen gerecht zu werden, wurde hier eine Gewichtung von 80% IDW zu 20 % Höhenregression gewählt.

3.1.4 Böden und Wasserbewegung in der ungesättigten Zone

Für die Beurteilung des Wasserhaushaltes des Bodens und der tieferen Schichten (ungesättigte Zone) sind die Speicher- und Durchlässigkeitseigenschaften (bodenhydraulische Eigenschaften) maßgebend. Als Arbeitsgrundlage dienten die digitalen Bodenflächendaten (Kartiermaßstab 1:50.000) der BFD-50-Karte und Bohrungen aus dem Modellgebieten. Im südlichsten Teil des Gebiets des Modells Hessisches Ried in Baden-Württemberg wurden die bodenhydraulischen Eigenschaften aus der Bodenkarte 1:25.000 abgeleitet. Im bayerischen Teil des Modells Hessischer Untermain bildete die Übersichtsbodenkarte von Bayern 1:25.000 (ÜBK25) die Datengrundlage zur Beschreibung der bodenhydraulischen Eigenschaften.

Zunächst wurden den einzelnen Böden in den typisierten Bodeneinheiten ihre bodenhydraulischen Kennwerte aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (2005) zugewiesen. In einer Clusteranalyse mit den Kriterien Schichtmächtigkeit, Schichtenfolge, Speichervermögen und Durchlässigkeit wurden Bodenprofilklassen mit unterschiedlichen bodenhydraulischen Eigenschaften identifiziert. Der Aufbau der Schichten in Tiefen größer 2 m wurde aus den Profilen für das Untersuchungsgebiet charakteristischer Bohrungen abgeleitet. Die vertikale Diskretisierung dieser Bodenprofile erfolgte in Schichten mit einer über die Tiefe ansteigenden Mächtigkeit von 1 cm an der Geländeoberfläche bis zu 2 m in der vom Grundwasser gesättigten Bodenzone.

Die ungesättigte Bodenwasserbewegung wird mit dem physikalisch begründeten Richards-Ansatz beschrieben. Die Parametrisierung der ungesättigten hydraulischen Bodeneigenschaften

(Retentionskurve, ungesättigte hydraulische Durchlässigkeit) erfolgte getrennt für jede Bodenart über die Methode von Mualem und van-Genuchten. Die Kennwerte der Lockergesteine basieren auf den Verknüpfungsregeln der Ad-hoc-AG Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der BGR. Die k_f-Werte wurden aus der Tabelle 76 der Bodenkundlichen Kartieranleitung (2005) übernommen. In Einzelfällen wurde die Parametrisierung auf Grund der Ergebnisse aus der Kalibrierung des Grundwassermodells angepasst.

3.1.5 Landnutzung

Die Landnutzung in den Modellgebieten wurde auf Grundlage von multitemporalen Satellitenbildauswertungen abgeleitet. Die räumliche Auflösung beträgt 15 m. Es wurden in Abhängigkeit von der tatsächliche Landnutzung in den Modellgebieten in bis zu 28 Nutzungsklassen unterteilt, um insbesondere die Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen differenziert beschreiben zu können. In den Siedlungsbereichen werden in Abhängigkeit von der Bebauungsdichte bis zu 4 Versiegelungsgrade unterschieden.

Um das Klimaänderungssignal in allen durchgeführten Modellrechnungen deutlich zu machen, wurde die Landnutzung in allen Modellläufen über die gesamten Simulationszeiträume als unverändert angenommen.

3.1.6 Grundwasserflurabstand – kapillarer Aufstieg

Bei Böden wird bei entsprechenden Grundwasserflurabständen der Pflanzenwasserbedarf nicht nur aus dem Bodenwasserspeicher sondern auch durch kapillaren Aufstieg gedeckt. Um den Einfluss des kapillaren Aufstiegs aus dem Grundwasser abzubilden, fanden aktuell mittlere Grundwasserstände als untere Randbedingungen Eingang in den Modellrechnungen in der ungesättigten Zone.

3.1.7 Tatsächliche Verdunstung

Die Verdunstung von bewachsenen Böden wurde in die Prozesse Bodenevaporation, Transpiration und Interzeptionsverdunstung untergliedert. Der Ansatz zur Berechnung der Bodenevaporation berücksichtigte den Bodenwassergehalt und die Vegetation. Lediglich bei vegetationsfreien Böden und optimaler Wasserversorgung der Bodenoberfläche entsprach die Bodenevaporation der potentiellen Verdunstung.

Für jede vegetative Nutzungsklasse wurde das Pflanzenwachstum anhand der saisonalen Entwicklung zeitlich variierend Blattflächenindex, Wurzeltiefe und k_c-Faktor (pflanzenspezifische Korrektur der Grasreferenzverdunstung) vorgegeben. Die Daten wurden aus einschlägigen Datenbanken und Literaturangaben abgeleitet.

Der Interzeptionsspeicher ist eine Funktion des Blattflächenindex. Bei gefülltem Speicher entspricht die Interzeptionsverdunstung der potentiellen Verdunstung. Der Verdunstungsanspruch wird zunächst aus dem Interzeptionsspeicher gedeckt. Die Speicherfüllung erfolgt, indem von

jedem Niederschlag Benetzungsverluste bis zur Speicherfüllung abgezogen werden, die Überschussmenge infiltriert in den Boden (max. bis zur Infiltrationskapazität).

Die Verknüpfung der einzelnen Prozesse zur Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung erfolgte anhand der Methode von Kristensen & Jensen. Anhand der potentiellen Verdunstung wurden zur Laufzeit Interzeption, Interzeptionsverdunstung, Transpiration und Evaporation unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen Entwicklung der jeweiligen kulturspezifischen Daten (Blattflächenindex, k_c-Faktor, Wurzelwachstum und -verteilung) in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Landnutzung und der Bodenfeuchte(-verteilung) in der effektiven Wurzelzone ermittelt.

Die Verdunstung offener Wasserflächen wurde mit der klimatischen Wasserbilanz approximiert.

3.1.8 Landwirtschaftliche Bewässerung

Unter den klimatischen Bedingungen kann der Wasserbedarf ackerbaulicher Kulturen nicht aus Niederschlag und Bodenwasserspeicher gedeckt werden. Bei zahlreichen Kulturen, insbesondere im Gemüsebau ist eine ausreichende Wasserversorgung Grundvoraussetzung, um vermarktungsfähige Produkte erzeugen und hohe und stabile Erträge erwirtschaften zu können. Im Hessischen Ried sind die Ackerflächen nahezu vollständig zur Bewässerung erschlossen (ca. 33.000 ha). Im hessischen Untermaingebiet sind die ackerbaulich genutzten Flächen nur teilweise zur Bewässerung erschlossen. Sie ist im Vergleich zum Hessischen Ried mit ca. 1.500 ha bereits deutlich geringer. Im betrachteten Gebiet des Westlichen Unteren Vogelsbergs spielt die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen für den Grundwasserhaushalt keine nennenswerte Rolle.

Das Bewässerungswasser stammt zum überwiegenden Teil aus dem Grundwasser, das in der Regel direkt „vor Ort“ aus sog. Beregnungsbrunnen (Saugbrunnen) gefördert wird. Zudem fördern im Hessischen Ried mehrere Verbände das Bewässerungswasser aus Tiefbrunnen. Lediglich im Hessischen Ried wird mit aufbereitetem Rheinwasser (Wasserverband Hessisches Ried) das Zusatzwasser für eine Fläche von ca. 5.200 ha in nennenswertem Umfang aus Oberflächengewässer gewonnen.

Im Rahmen der Simulationsrechnungen wurden Gemüse, Kartoffeln und Beta-Rüben (Zuckerrübe) als bewässerungsbedürftig angenommen. Der Wasserbedarf für die Bewässerung dieser Kulturen wurde im Rahmen der Simulationsrechnungen automatisiert entsprechend der Geisenheimer Methode zur Bewässerungssteuerung ermittelt. Die Geisenheimer Methode zur Bewässerungssteuerung wird auch bei der landwirtschaftlichen Beregnungsberatung eingesetzt. Als Steuergröße für die Applikation von Bewässerungswasser wurde die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) herangezogen. Hierbei wurde im Rahmen der Simulationsrechnungen automatisch eine Beregnungsgabe von bis zu 30 mm/Tag auf diejenigen landwirtschaftlich beregneten Flächen angesetzt, deren Bodenfeuchte im durchwurzelten Bereich der ungesättigten Bodenzone auf einen Wert unter 50% nFKWe fiel. Abgeschaltet wurde die Bewässerung automatisch beim Erreichen von 80% nFKWe. Die oberen und unteren Grenzen wurden im Gemüsebau auf 70% nFKWe bzw. 90% nFKWe angehoben.

In der Praxis liegt insbesondere in Trockenjahren die tatsächliche Bewässerungshöhe etwas unter diesem theoretischen Wert, da bei vielen landwirtschaftlichen Betrieben aus arbeitstechnischen Gründen sowie auf Grund der technischen Ausstattung nicht alle Flächen ausreichend und zur geeigneten Zeit mit Zusatzwasser versorgt werden können.

3.2 Regionaler Grundwasserhaushalt

Zur Abschätzung der Auswirkungen der klimabedingten Veränderung der Grundwasserneubildung auf das Grundwasserregime wurden Simulationsrechnungen für das Grundwasser mit den vorhandenen Grundwassermodellen Hessisches Ried und Hessischer Untermain durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Bodenwasserhaushaltsberechnungen wurde die Grundwasserneubildung als Randbedingungen der Grundwassermodellrechnungen übernommen.

Beide Grundwassermodelle berechnen Grundwasserströmungs- und Stofftransportvorgänge und beruhen auf der Finiten Elemente Methode (FEM). Die FEM erlaubt unter anderem das Modellgebiet in Elemente unterschiedlicher Form und Größe zu unterteilen sowie eine Verfeinerung des Netzes in wichtigen Systembereichen bzw. in Bereichen mit ausgeprägt dreidimensionalen Strömungen. Die Grundwassermodelle sind echt dreidimensional, was eine exakte Beschreibung des hydrogeologischen Systems, der Grundwasserströmung, der Wechselwirkungen zwischen Fließgewässer und dem Grundwasser sowie eine tiefendifferenzierte Modellierung von Entnahmen und Infiltrationen erlaubt.

3.2.1 Grundwassermodell Hessisches Ried

Das Modellgebiet im Hessischen Ried erstreckt sich im Wesentlichen Teil über den rechtsrheinischen nördlichen Oberrheingrabens zwischen Neckar und Main. Die großen Fließgewässer Rhein, Main und Neckar bilden auf langen Strecken eine geohydraulische Systemgrenze. Das Grundwasser fließt vom Sprendlinger Horst / Odenwald in Richtung Rhein und Main.

An die Rheinniederung mit rezenter Aue und Altarmen, in der sich vorwiegend Böden unter Grundwassereinfluss entwickelt haben, schließen sich nach Osten hin die höhergelegenen pleistozänen Terrassen des Rheins an. Auf den Terrassensedimenten und den abgelagerten Flugsanden herrschen Parabraunerden vor. Ein weiteres, prägendes Landschaftselement ist der Rheinseitenfluss, der so genannte „Altneckar“ mit seinen Schlingen. Der „Altneckar“ verlief vom südlichen Modellrand bis nach Bensheim entlang der Odenwaldrandverwerfung und querte dann das Ried bis zur Mainmündung. Die heute das Ried querenden Bachsysteme lassen sich in vier, nach ihren Hauptgewässern

- Schwarzbach,
- Modau/Sandbach,
- Lauter/Winkelbach und
- Weschnitz

benannte Systeme gliedern, die alle in den Rhein (teilweise in Altrheinarme) entwässern.

Von den Grabensystemen, die das gesamte Hessische Ried durchziehen, sind als Hauptelemente zu nennen:

- Der Landgraben, der als früherer Hauptentwässerungsgraben - vielfach in den alten Neckarschlingen verlaufend - das gesamte Ried von Südosten nach Nordwesten durchzieht,
- die Grabensysteme bei Bürstadt, Biblis und Rohrheim, Biebesheim und Ginsheim sowie
- das Tiefsystem in Heppenheim.

Den Übergang vom Ried zur Bergstraße bilden die Schwemmfächer der aus dem Odenwald austretenden Bäche sowie Flugsanddecken und -dünen. Im nördlichen Modellraum grenzt die Untermainebene an das Hessische Ried, die wiederum von Terrassensedimenten und Flugsanden bestimmt wird.

Die Wechselwirkungen des Grundwassers mit den Fließgewässern prägen die Grundwasserstände und die zugehörigen Grundwasserflurabstände. Die Bereiche der mächtigen östlichen Terrassensedimente mit einer vergleichsweise geringen Fließgewässerdichte weisen demzufolge hohe Grundwasserflurabstände auf, während die übrigen Gebiete meist von geringen Grundwasserflurabstände geprägt sind (**Anlage 1-1**).

Abb. 8 zeigt das Finite-Elemente-Netz und die detaillierte Berücksichtigung der Oberflächengewässer sowie die zahlreichen einbezogenen Brunnen und Infiltrationsanlagen. Insgesamt sind ca. 900 Brunnen und ca. 60 Infiltrationsorgane modelltechnisch umgesetzt worden.

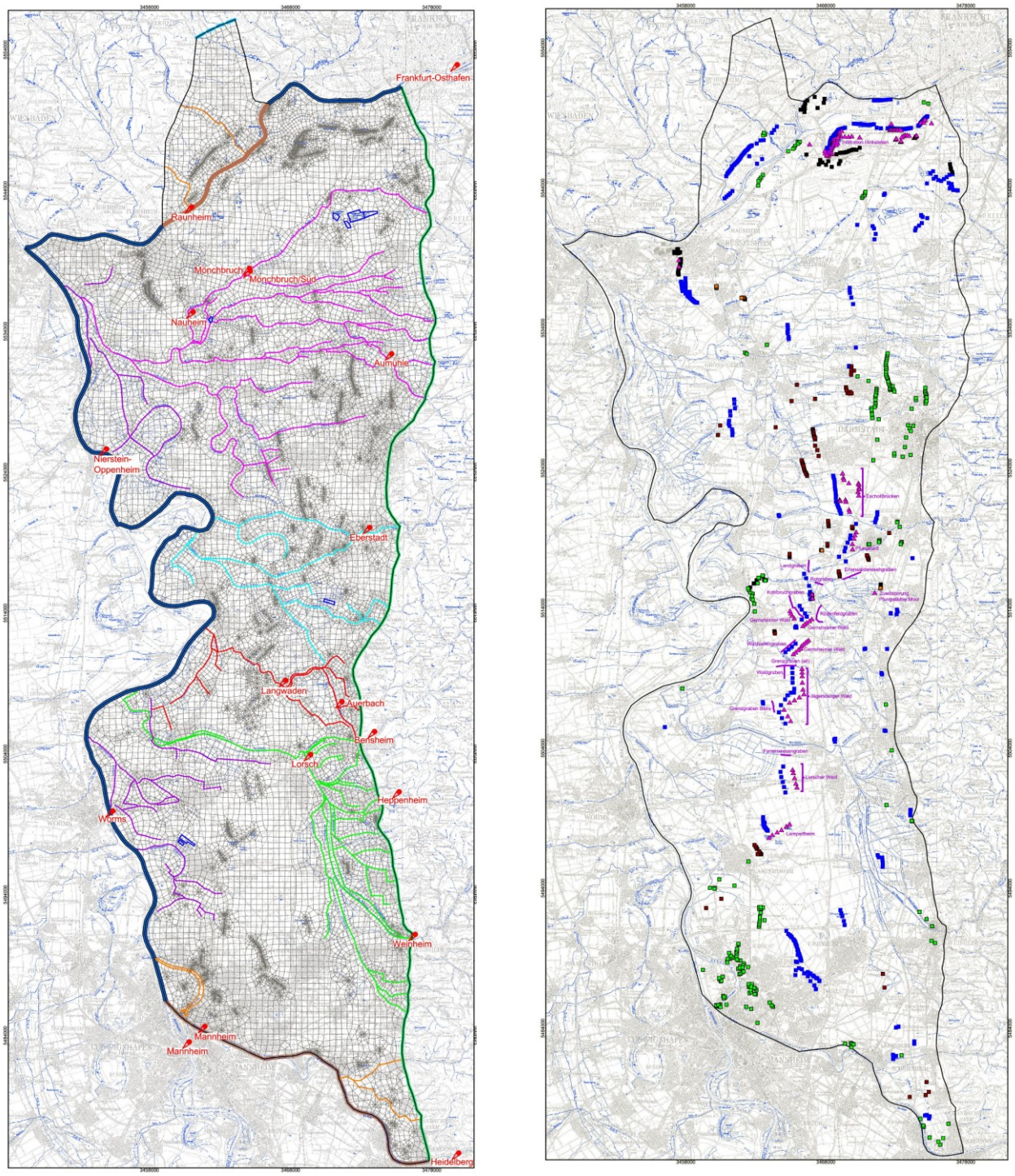

Abb. 8: Gewässerstrukturen und Brunnen im Grundwassermodell Hessisches Ried

3.2.2 Grundwassermodell Hessischer Untermain

Das Modellgebiet zum Hessischen Untermain befindet sich in der tektonischen Einheit des Hanauer Beckens (östliche Untermainebene), welches im Osten durch den Spessart, im Süden durch den Odenwald und im Westen durch den Sprendlinger Horst (Abgrenzung vom Oberrheingraben) eingegrenzt wird. Das Modell umfasst ausschließlich den Lockergesteinsgrundwasserleiter links des Mains über den wasserwirtschaftlich relevanten Teil des hessischen Untermaingebiets mit angrenzen bayerischen Flächen.

Die Grundwasserströmung ist auf den Main gerichtet.

Die Böden im Modellgebiet bestehen im Oberboden überwiegend aus Flugsanden oder Terrassensedimenten, denen schwache-mittlere Anteile an Schluffen, teilweise – entsprechend der Lage in der Untermainebene – auch Kiese beigemengt sind. Die Differenzierung in verschiedene Bodeneinheiten ergibt sich aus den tieferen Bodenschichten. Hier haben stärker schluffige oder tonige Horizonte in Kombination mit Oberflächen- und Grundwasser die Entwicklung hydromorpher, d.h. vom Wasser geprägter Horizonte, bewirkt.

Gersprenz und Rodau bilden die Hauptfließgewässer im Bilanzraum. Mit Ausnahme der Gersprenzaue und der Mainniederung prägen im Modellgebiet höhere Grundwasserflurabstände den Boden- und Grundwasserhaushalt (**Anlage 1-2**).

Abb. 9 zeigt das Finite-Elemente-Netz und die detaillierte Berücksichtigung der Oberflächengewässer. Insgesamt sind ca. 150 Brunnen modelltechnisch umgesetzt worden.

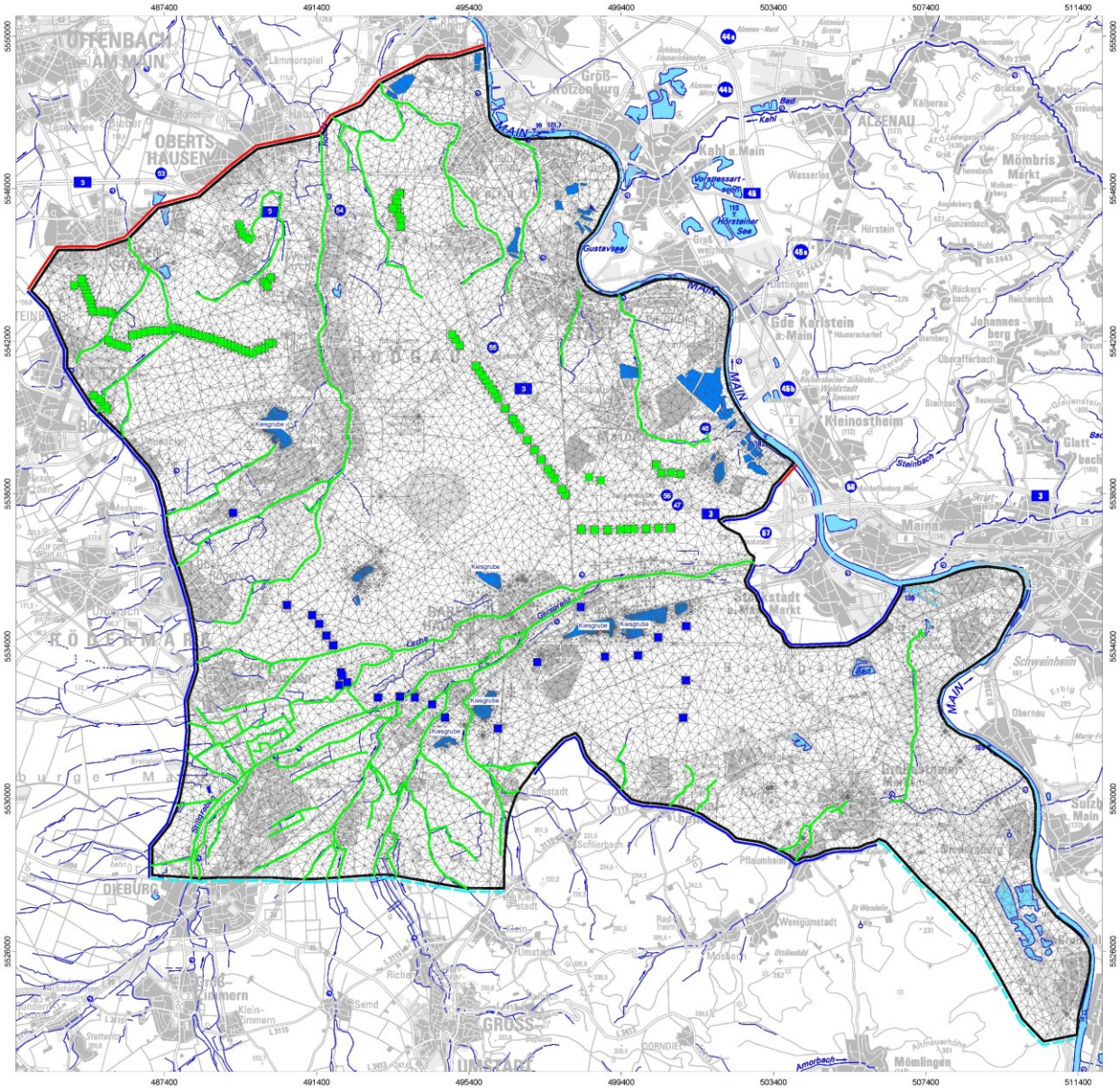

Abb. 9: Modellstrukturen des Grundwassermodells Hessischer Untermain

4 Grundwasserneubildung

Die nachfolgend beschriebenen Bodenwasserhaushalts- und Grundwassermodellrechnungen haben das Ziel, das Klimaänderungssignal auf Grundwasserneubildung sowie Grundwasserstände und -dargebot zu ermittelt. Damit in den Berechnungsergebnissen ausschließlich die Wirkung des Klimawandels, beschrieben durch Niederschlag und potenzieller Verdunstung auf Tageswertbasis aus dem Ensemble der Klimaprojektionen, zum Ausdruck kommt, wurden weitere Einflussgrößen wie Landnutzung, Grundwasserentnahmen usw. über den gesamten Simulationszeitraum von 1971-2100 konstant gehalten. In Ansatz gebracht wurden hier die aktuellen Verhältnisse.

Klima ist im engen Sinn definiert als statistisches Durchschnittswetter, das in einer Region über einen längeren Zeitraum herrscht. Der klassische, von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definierte Zeitraum sind 30 Jahre. Für vergleichende flächenhafte Darstellungen der berechneten Grundwasserneubildungsraten als Folge des Klimawandels wurden deshalb drei Zeiträume ausgewertet. Die Jahre 1971-2000 bilden den Bezugszeitraum, die Jahre 2021-2050 beschreiben die nahe Zukunft und die Jahre 2070-2099 die ferne Zukunft.

Zur Einordnung der Ergebnisse aus den Bodenwasserhaushaltsberechnungen auf der Grundlage von Klimaprojektionen wurden Modellrechnungen durchgeführt, bei der die den Bodenwasserhaushalt antreibenden Größen Niederschlag und Verdunstung aus meteorologischen Beobachtungsdaten entwickelt wurden. Die Vorgehensweise bei der Regionalisierung der Stationsdaten ist in Kap. 3.1 beschrieben. Schwerpunkt der Auswertung ist der Vergleich der aktuellen Phase unterdurchschnittlicher Grundwasserneubildung, die unstrittig bereits dem Klimawandel unterliegt, mit der Trockenperiode 1971-1976, die in weitaus geringerem Maße vom Klimawandel beeinflusst war. Hierdurch war es auf der Basis von Beobachtungsdaten möglich einzuordnen, inwieweit ausschließlich das Klima (beobachteter Witterungsverlauf) die Grundwasserneubildung verändert. Da die Nassperioden in den 1980er Jahren und 1999-2003 zeitlich enger zusammenliegen, sind diese für die Fragestellung weniger geeignet.

4.1 Hessisches Ried

4.1.1 Beobachtungszeitraum

Abb. 10 zeigt die Jahressumme des Gebietsmittels der Grundwasserneubildung als Säulen und in Ganglinienform die mehrjährigen gleitenden Gebietsmittel der Grundwasserneubildung. Im Hessischen Ried traten die drei Jahre mit der geringsten jährlichen Grundwasserneubildung und das niedrigste 3-jährige gleitende Mittel in der Trockenperiode der 1970er Jahre auf. Bildet man eine Rangfolge der Einzeljahre mit der geringsten Grundwasserneubildung, so war das Jahr 1973 mit einem Gebietsmittel von 48 mm/a das Jahr mit der geringsten Grundwasserneubildung. Es folgen die Jahre 1971 und 1976 mit einem Gebietsmittel von jeweils 56 mm/a. Auch nach der Nassperiode 1999-2003 traten Einzeljahre mit (über)durchschnittlicher Grundwasserneubildung auf (z.B. 2010).

Erst ab dem 7-jährigen gleitenden Mittel ist die gemittelte Grundwasserneubildung für die aktuelle Trockenphase niedriger als für den Vergleichszeitraum in den 1970er Jahren. Die Jahre 1965 bis 1970 waren Feuchtjahre mit durchgängig überdurchschnittlicher Grundwasserneubildung. Sie sind damit nicht relevant für die mehrjährige gleitende Mittelwertbildung.

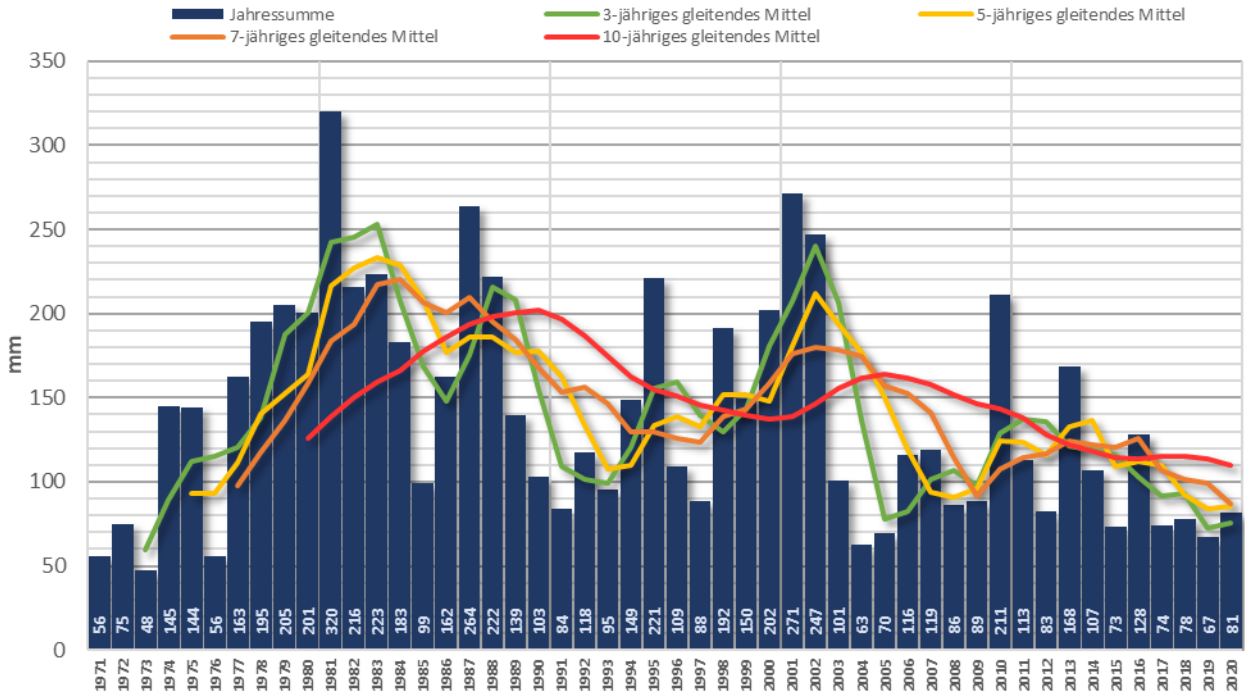

Abb. 10: Berechnete jährliche Grundwasserneubildung 1971-2020, Hessisches Ried

4.1.2 Projektionen

Eine Einordnung der zukünftigen mittleren Entwicklung bei der Grundwasserneubildung für das Projektensemble vermittelt Abb. 11. Sie zeigt die Gebietsmittel der Grundwasserneubildung für die Gesamtsimulationszeitspanne von 1971-2099, den Bezugszeitraum 1971-2000, die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2070-2099) sowie die Differenzen von naher und ferner Zukunft zum Bezugszeitraum. In der nahen Zukunft weist lediglich die Projektion der Modellkette MIROC5_rcp85_WETTREG2013 einen Rückgang von 39 mm/a aus, der allerdings mit rund 25 % gegenüber dem Bezugszeitraum recht deutlich ausfällt. Alle übrigen Projektionen weisen entweder eine stabile Grundwasserneubildung (CanESM2_rcp85_CCLM, EC-EARTH_rcp85_EPISODES2018) oder eine ansteigende mittlere Grundwasserneubildung (v.a. HadGEM2_rcp85_RCA4 mit einem Anstieg von knapp 40 % gegenüber dem Bezugszeitraum) aus.

Die Bandbreite der Änderung nimmt dann in der fernen Zukunft weiter zu. Die Projektion MIROC5_rcp85_WETTREG2013 bildet unverändert gegenüber der nahen Zukunft den trockenen Rand ab. Die mittlere Grundwasserneubildung reduziert sich um 72 mm/a (ca. 45 %) gegenüber dem Bezugszeitraum. Die Projektion CanESM2_rcp85_CCLM führt zu einem Rückgang der Grundwasserneubildung um 31 mm/a (knapp 25 %) gegenüber dem Bezugszeitraum. Die

Projektionen EC-EARTH_rcp85_EPISODES2018 und MPI-ESM_rcp26_RCA4 weisen eine stabile Grundwasserneubildung aus, während HadGEM2_rcp85_RCA4 unverändert mit einer Zunahme von 68 mm/a (etwas mehr als 50 % gegenüber dem Bezugszeitraum) den nassen Rand in der Bandbreite des Projektensembles bildet.

	1971-2099	1971-2000	2021-2050	2070-2099	DIIF II-I	DIFF III-I
EC-EARTH_rcp85_EPISODES2018	107	101	113	113	+12	+12
EC-EARTH_rcp85_RACMOE	130	113	143	138	+30	+25
MIROC5_rcp85_WETTREG2013	121	159	120	87	-39	-72
CanESM2_rcp85_CCLM	126	131	133	100	+2	-31
HadGEM2_rcp85_RCA4	166	121	167	189	+46	+68
MPI-ESM_rcp26_RCA4	118	110	132	114	+22	+4

Abb. 11: Mittlere Grundwasserneubildung in den Vergleichszeiträumen, Hessisches Ried

Bei der Analyse der Verteilung der mittleren Grundwasserneubildung für die drei Auswertezeiträume im Modellgebiet (**Anlage 2**) fallen unterschiedlich stark ausgeprägte gebietsspezifische Merkmale auf. Markant ist die Tendenz im zentralen nördlichen Modellgebiet zu einem Rückgang der Grundwasserneubildung auch bei im Gebietsmittel ansteigenden Neubildungsraten. Das Gebiet Mönchbruch und Umgebung ist geprägt durch geringe Grundwasserflurabstände, die oftmals als Wald genutzt werden. Die an den Temperaturanstieg gekoppelten höheren potenziellen Verdunstungsraten können durch die Transpiration verbunden mit einem kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser auch tatsächlich realisiert werden. In ähnlicher Form gilt dies auch für die Altneckarschlingen. Im Bereich der Rheinaue gelingt dies weitgehend durch das große Speichervermögen der Auensedimente.

Die übrigen Gebiete im Oberrheingraben profitieren stärker von einem ansteigenden Niederschlagsniveau (Ausnahme Projektion MIROC5_rcp85_WETTREG2013) und der saisonalen Umverteilung der Jahresniederschläge mit feuchteren Wintern.

Anlage 3 zeigt für die einzelnen Projektionen das Gebietsmittel der jährlichen Grundwasserneubildung als Säulen und die daraus gebildeten 3-jährigen und 5-jährigen gleitenden Mittel der Grundwasserneubildung als Ganglinien. Insbesondere die für die Grundwasserbewirtschaftung maßgebenden mehrjährigen Nass- und Trockenphasen treten in ihren Extremen erst in der 2. Hälfte dieses Jahrhunderts auf. Extremale Einzeljahre zeigen sich aber auch bereits früher. Die Mehrheit der Projektionen weist für Einzeljahre einen Ausfall der Grundwasserneubildung (als Mittel über das Gesamtgebiet) aus. In Nassjahren erreicht die Grundwasserneubildung in der Mehrheit der Projektionen Werte von bis zu 300-350 mm/a, was etwa dem aktuellen Neubildungsraten in ausgeprägten Nassjahren entspricht. Das Extremum mit über 450 mm/a wird auf Grundlage der Projektion HadGEM2_rcp85_RCA4 berechnet.

Das Klimaänderungssignal beim Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft wirkt v.a. durch den an die Temperaturerhöhung gekoppelten Anstieg der Verdunstung in der Vegetationsperiode. Dies wird durch die saisonale Verlagerung der Niederschläge mit trockeneren Sommern noch verstärkt. Für den Bezugszeitraum führen die Projektionen zu einem mittleren Zusatzwasserbedarf von 15-20 Mio. m³/a. Die Spanne der in allen Projektionen berechneten mittleren Zusatzwassermengen reicht im Vergleich zu heute von einem stabilen Niveau bis zu um rund ein Drittel anwachsenden Zusatzwasserbedarf in der nahen Zukunft. Insbesondere durch den fortlaufenden Temperaturanstieg getrieben wächst der Zusatzwasserbedarf um rund 30 % bis 150 % in der fernen Zukunft (Abb. 12).

Landwirtschaftliche Bewässerung [Mio. m³/a]

	1971-2099	1971-2000	2021-2050	2070-2099	DIIF II-I	DIFF III-I
EC-EARTH_rcp85_EPISODES2018	22,66	19,98	21,67	27,31	+8%	+37%
EC-EARTH_rcp85_RACMOE	20,83	18,72	20,56	24,13	+10%	+29%
MIROC5_rcp85_WETTREG2013	20,69	15,26	20,34	26,68	+33%	+75%
CanESM2_rcp85_CCLM	28,77	18,66	24,61	47,07	+32%	+152%
HadGEM2_rsp85_RCA4	20,21	19,18	18,6	24,54	-3%	+28%
MPI-ESM_rcp26_RCA4	20,28	17,99	19,49	23,39	+8%	+30%

Abb. 12: Mittlere Landwirtschaftliche Bewässerung in den Vergleichzeiträumen, Hessisches Ried

4.2 Untermain

4.2.1 Beobachtungszeitraum

Abb. 13 zeigt die anhand vorhandener realer Daten berechnete jährliche Grundwasserneubildung im Gebiet Untermain für den Beobachtungszeitraum 1971-2020.

Die niedrigste Grundwasserneubildung wurde für das Jahr 2019 berechnet, weitere Jahre mit einer deutlich unterdurchschnittlichen Grundwasserneubildung waren die Jahre 1976 und 2006. Während die Grundwasserneubildung in den Jahren nach 1976 wieder deutlich anstieg, lagen die Werte der Grundwasserneubildung seit 2006 unter den Werten der vorangegangenen 10 Jahre. Nach 2003 gab es ausschließlich Jahre mit unterdurchschnittlicher Grundwasserneubildung. Auch die geringsten mehrjährigen Grundwasserneubildung, bestimmt als gleitende Jahresmittel, liegen alle im Zeitraum nach 2004.

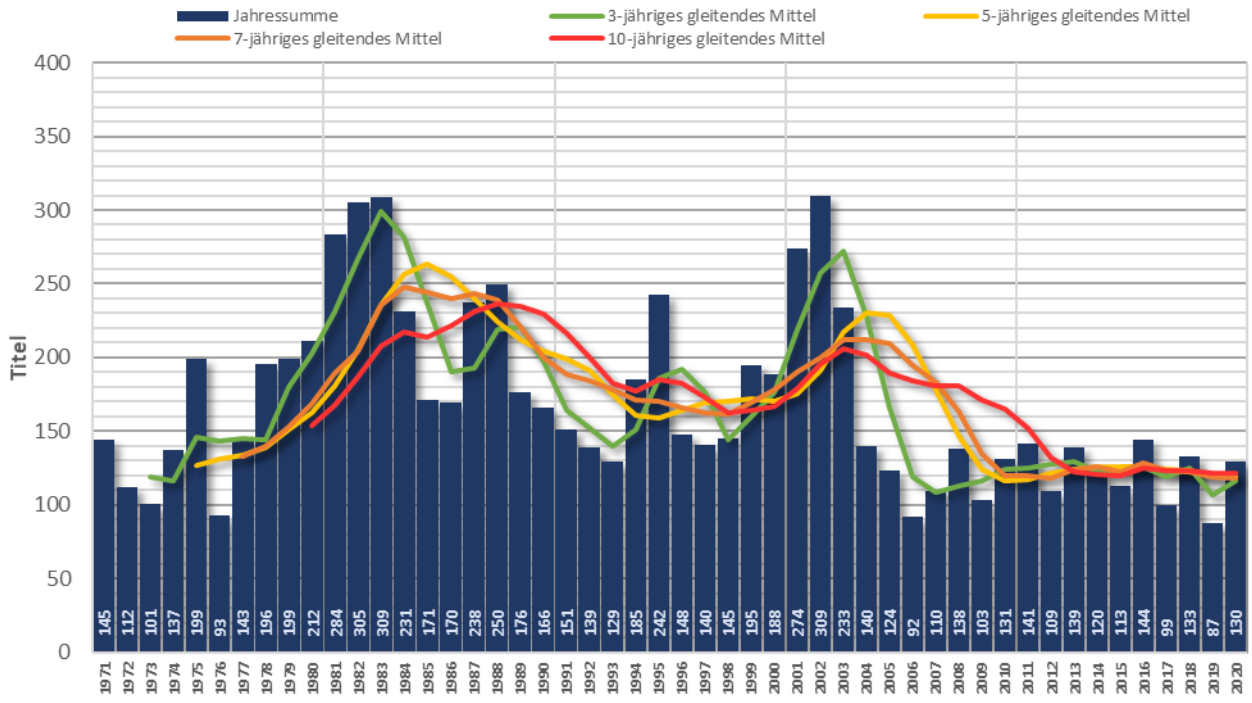

Abb. 13: Berechnete jährliche Grundwasserneubildung 1971-2020, Hessischer Untermain

4.2.2 Projektionen

Eine Einordnung der zukünftigen mittleren Entwicklung bei der Grundwasserneubildung für das Projektensemble vermittelt Abb. 14. Sie zeigt die Gebietsmittel der Grundwasserneubildung für die Gesamtsimulationszeitspanne von 1971-2099, den Bezugszeitraum 1971-2000, die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2070-2099) sowie die Differenzen von naher und ferner Zukunft zum Bezugszeitraum. In der nahen Zukunft weist lediglich die Projektion der Modellkette MIROC5_rcp85_WETTREG2013 einen Rückgang von 36 mm/a aus, der allerdings mit knapp 25 % gegenüber dem Bezugszeitraum recht deutlich ausfällt. Alle übrigen Projektionen weisen entweder eine stabile Grundwasserneubildung (CanESM2_rcp85_CCLM) oder einen mehr oder weniger ausgeprägten Anstieg bei der mittleren Grundwasserneubildung aus. Am stärksten fällt der Anstieg bei der Projektion der Modellkette HadGEM2_rcp85_RCA4 mit rund 25 % gegenüber dem Bezugszeitraum aus.

Die Bandbreite der Änderung nimmt dann in der fernen Zukunft weiter zu. Die Projektion MIROC5_rcp85_WETTREG2013 bildet unverändert gegenüber der nahen Zukunft den trockenen Rand ab. Die mittlere Grundwasserneubildung reduziert sich um 61 mm/a (ca. 50 %) gegenüber dem Bezugszeitraum. Mit den antreibenden atmosphärischen Größen der Projektion CanESM2_rcp85_CCLM wird ein Rückgang der Grundwasserneubildung um 13 mm/a (rund 10 %) gegenüber dem Bezugszeitraum berechnet. Die übrigen Projektionen führen dann zu einem Anstieg der Grundwasserneubildung von 10% (MPI-ESM_rcp26_RCA4) bis zu knapp 40 % (HadGEM2_rcp85_RCA4) gegenüber dem Bezugszeitraum.

	1971-2099	1971-2000	2021-2050	2070-2099	DIIF II-I	DIFF III-I
EC-EARTH_rcp85_EPISODES2018	124	108	130	135	+22	+27
EC-EARTH_rcp85_RACMOE	139	121	159	150	+38	+29
MIROC5_rcp85_WETTREG2013	120	151	115	90	-36	-61
CanESM2_rcp85_CCLM	138	140	146	127	+6	-13
HadGEM2_rcp85_RCA4	173	137	180	186	+43	+49
MPI-ESM_rcp26_RCA4	129	119	142	131	+23	+12

Abb. 14: Mittlere Grundwasserneubildung in den Vergleichszeiträumen, Hessischer Untermain

Bei der Analyse der Verteilung der mittleren Grundwasserneubildung im Bezugszeitraum (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050) und ferne Zukunft (2070-2099) im Modellgebiet (**Anlage 4**) fallen unterschiedlich stark ausgeprägte gebietsspezifische Merkmale auf. Mit Ausnahme der feuchten Entwicklung (HadGEM2_rcp85_RCA4) sinkt in allen übrigen Projektionen in Teilen der Gersprenz- und Mainniederung in der fernen Zukunft die mittlere Grundwasserneubildung. Diese Gebiete sind geprägt durch geringe Grundwasserflurabstände, die oftmals als Wald genutzt werden. Die an den Temperaturanstieg gekoppelten höheren potenziellen Verdunstungsraten können durch die Transpiration verbunden mit einem kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser auch tatsächlich realisiert werden. Die übrigen Gebiete profitieren tendenziell von einem ansteigenden Niederschlagsniveau (Ausnahme Projektion MIROC5_rcp85_WETTREG2013) und der saisonalen Umverteilung der Jahresniederschläge mit feuchteren Wintern.

Anlage 5 zeigt für die einzelnen Projektionen das Gebietsmittel der jährlichen Grundwasserneubildung als Säulen und die daraus gebildeten 3-jährigen und 5-jährigen gleitenden Mittel der Grundwasserneubildung als Ganglinien. Die hydro(geo)logischen Gebietsmerkmale wirken stark dämpfend auf die Dynamik der Grundwasserneubildung, die vom Witterungsverlauf angetrieben wird. Diese dämpfende Wirkung reicht im Gebietsmittel soweit, dass die ausgeprägteren Nass- und Trockenphasen im Witterungsverlauf nur deutlich eingeschränkt sich im Verlauf der Grundwasserneubildung wiederfinden. Lediglich in 3 Projektionen ist eine Zunahme in der Dynamik zu erkennen (EC-EARTH_rcp85_RACMOE, EC-EARTH_rcp85_EPISODES, HadGEM2_rcp85_RCA4), während in den 3 übrigen Projektionen keine Veränderung gegenüber dem Bezugszeitraum zu erkennen ist. In diesen Ganglinien kommt eher die mittlere Entwicklung in der Grundwasserneubildung für Bezugszeitraum, nahe Zukunft und ferne Zukunft zum Ausdruck (s.o. die textlichen Erläuterungen zu Abb. 14). Die Projektionen mit steigenden mittleren Neubildungsraten werden zukünftig auch in Einzeljahren und in mehrjährigen Mitteln höhere Werte gegenüber dem Bezugszeitraum aufweisen, während die Projektionen mit langfristig fallenden mittleren Neubildungsraten auf lange Sicht neue Minima in der Grundwasserneubildung einnehmen werden.

4.3 Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg

4.3.1 Beobachtungszeitraum

Abb. 15 zeigt die anhand vorhandener realer Daten berechnete jährliche Grundwasserneubildung im Gebiet Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg für den Beobachtungszeitraum 1971-2020.

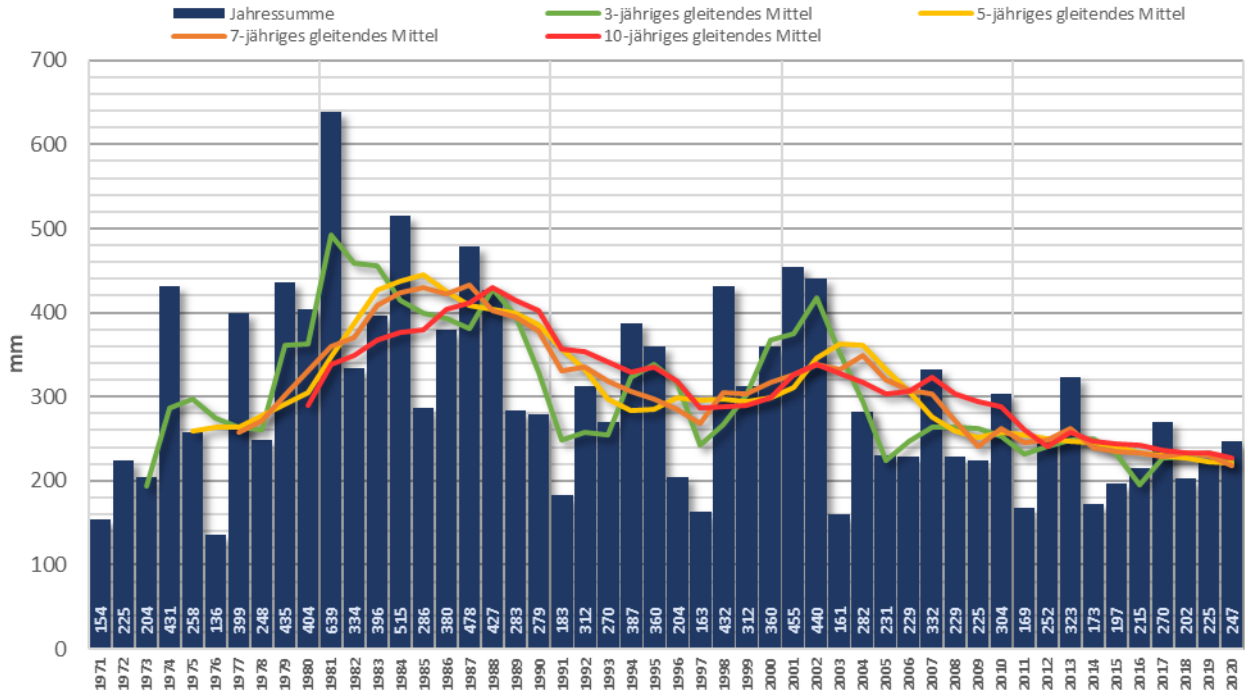

Abb. 15: Berechnete jährliche Grundwasserneubildung 1971-2020, Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg

Für das gesamte Modellgebiet wurden für die Jahre 1971, 1976, 1997 und 2003 die niedrigsten Grundwasserneubildungen berechnet. Die Einzeljahre mit sehr niedriger Grundwasserneubildung wurden jedoch meist durch nachfolgende Jahre mit höherer Grundwasserneubildung ausgeglichen. Ab 2014 lagen die Grundwasserneubildungsraten für das Gesamtmodellgebiet unter dem langjährigen Durchschnitt. Während für das Einzugsgebiets Inheiden für das Jahr 2019 eine im Gegensatz zu den übrigen Jahren seit 2010 deutlich verminderte Grundwasserneubildung berechnet wurde (Abb. 18 und Abb. 19), ist dies für das Gesamtmodellgebiet nicht der Fall.

Das Gebietsmittel der berechneten Grundwasserneubildung im Modellgebiet des Bodenwasserhaushaltsmodell beträgt für den Zeitraum 1971-2020 ca. 300 mm/a. Abb. 16 zeigt die flächenhafte mittlere Grundwasserneubildung im Modellgebiet für den Beobachtungszeitraum 1971-2020 in mm/a. Ein Hauptanteil der Grundwasserneubildung fällt entsprechend der Niederschlagsverteilung im Mittelgebirgsbereich oberhalb 600 müNN an.

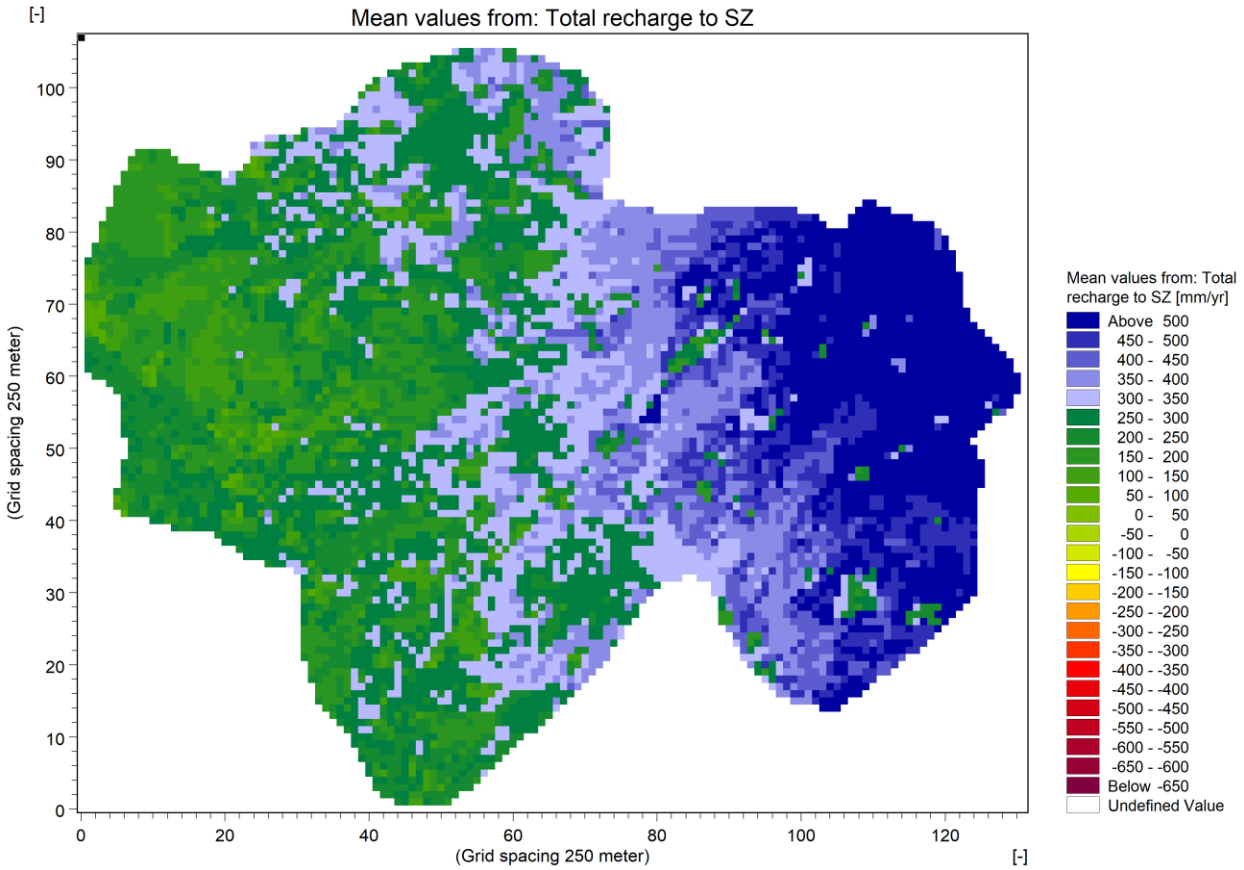

Abb. 16: Mittlere Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1971-2020 Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg

4.3.2 Projektionen

	1971-2099	1971-2000	2021-2050	2070-2099	DIFF II-I	DIFF III-I
EC-EARTH_rcp85_EPISODES2018	256	253	262	270	+9	+17
EC-EARTH_rcp85_RACMOE	291	280	314	285	+34	+5
MIROC5_rcp85_WETTREG2013	282	325	277	249	-48	-76
CanESM2_rcp85_CCLM	303	306	305	283	-1	-23
HadGEM2_rcp85_RCA4	330	296	330	347	+34	+51
MPI-ESM_rcp26_RCA4	281	275	317	258	+42	-17

Abb. 17: Mittlere Grundwasserneubildung in den Vergleichszeiträumen, Wetterau und Westlicher und Unterer Vogelsberg

Abb. 17 zeigt die Änderung der mittleren Grundwasserneubildung für das gesamte Modellgebiet für die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2070-2099). In ferner Zukunft wurde bei

3 der 6 Projektionen eine Abnahme der Grundwasserneubildung im Gesamtgebiet um bis zu 76 mm/a berechnet.

Anlage 6 zeigt die Verteilung der berechneten Grundwasserneubildung sowie die Änderung der Grundwasserneubildung für nahe und ferne Zukunft im Modellgebiet. Deutliche Änderungen in den 30-Jahres-Mitteln der Grundwasserneubildung nehmen bei allen Projektionen im Modellgebiet von Westen nach Osten hin zu. Es wird zukünftig eine stärkere Zunahme des Niederschlags in den höheren Lagen mit einem korrespondierenden Anstieg der Grundwasserneubildung erwartet. Das Dargebot im Einzugsgebiet des Wasserwerks Inheiden, das im Westen des Modellgebiets liegt, profitiert hiervon jedoch nur eingeschränkt.

Zur Beurteilung der Auswirkung der klimatischen Eingangsdaten des Projektensembles auf die Grundwasserbewirtschaftung wurden zusätzlich zu den 30-Jahres Mitteln der Grundwasserneubildung auch die Jahressummen der Grundwasserneubildung betrachtet (**Anlage 7**).

Für die Bewirtschaftung des WW Inheiden sind mehrjährige Trockenphasen maßgebend (s. 5.3). Entsprechend der beobachteten Reaktion der Grundwasserstände auf berechnete Grundwasserneubildungsraten sind somit auch zunehmend langjährige Schwankungsamplituden in den Grundwasserständen und im Grundwasserdargebot zu erwarten. Für das Einzugsgebiet des WW Inheiden liegt für 3 der Projektionen das Minimum des 3-jährigen gleitenden Jahresmittels der Grundwasserneubildung ungefähr beim derzeitigen Niveau. Bei den anderen 3 Projektionen wird gleitende 3-jährige Jahresmittel der Grundwasserneubildung um rund 25 % unterschritten.

5 Grundwasserstände

5.1 Hessisches Ried

Das Klimaänderungssignal auf die mittleren Grundwasserstände für die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2070-2099) im Hessischen Ried zeigt **Anlage 8**. Die größten Änderungen treten in Bereichen mit größeren Grundwasserflurabständen auf. In diesen Bereichen fehlen entweder Fließgewässer weitgehend oder die Austauschraten zwischen Fließgewässer und Grundwasser werden durch das Maß der Grundwasserstandsänderung als Folge der Klimaänderung nicht nennenswert beeinflusst. Dies sind v.a. im Norden das Gebiet Flughafen Frankfurt, Frankfurter Stadtwald bis Langen/Neu-Isenburg, das Gebiet westlich von Darmstadt und das Gebiet um Weinheim/Viernheim. In der trockenen Projektion MIROC5_rcp85_WETTREG2013 würden in der nahen Zukunft die mittleren Grundwasserstände flächenhaft um ca. 0,5 m sinken, lokal um bis zu 1 m. In der fernen Zukunft können die mittleren Grundwasserstände flächenhaft um ca. 1 m und lokal um bis zu ca. 2 m fallen.

In der feuchten Projektion HadGEM2_rcp85_RCA4 wird ein Grundwasseranstieg in vergleichbarer Größenordnung berechnet. Dies bedeutet für die gleichen o.g. Gebiete, dass in der nahen Zukunft die mittleren Grundwasserstände flächenhaft um ca. 0,5 m, lokal um bis zu 1 m ansteigen. In der fernen Zukunft können die mittleren Grundwasserstände flächenhaft um ca. 1 m und lokal um bis zu ca. 2 m ansteigen.

Bei geringen Grundwasserflurabständen stabilisieren die Wechselwirkungen mit den Fließgewässern die Grundwasserstände. Durch den Austausch mit Fließgewässern wird die Wirkung der Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung aus Niederschlag gedämpft. Dabei findet die Kompensation kleinräumig auf der Skala eines Einzugsgebiets statt. Eine vollständige Kompensation der Wirkung aus der Fließgewässerinteraktion setzt ein verändertes hydraulisches Gefälle zwischen Fließgewässer und Grundwasser voraus, wie es in Anlage 8 gezeigt wird. Die die Grundwasserstände stabilisierenden Wechselwirkungen mit den Fließgewässern zeigen sich ausgeprägt entlang des Rheins sowie im Schwarzbachsystem und entlang der Weschnitz.

Bei einer weitgehend stabilen Grundwasserneubildung als Gebietsmittel werden auf Grund unterschiedlicher hydro(geo)logischen Eigenschaften sowohl Bereiche mit signifikant steigenden Grundwasserständen (i.W. Bereiche mit großen Grundwasserflurabständen) als auch Bereiche mit signifikant sinkenden Grundwasserständen nebeneinander auftreten. Sinkende Grundwasserstände setzen eine hohe tatsächliche Verdunstung voraus wie sie z.B. bei Wäldern mit Grundwasseranschluss gegeben ist (s. Kap. 4.1.2).

Ob zukünftige Grundwasserstandsänderungen eine ökologische oder wasserwirtschaftliche Relevanz haben, hängt vor allem davon ab, ob in einem Gebiet sensible Grundwasserflurabstände auftreten. Im Hessischen Ried liegen die vorhandenen Infiltrationsanlagen aufgrund ihrer Aufgabenstellung nicht im Zentrum der Flächen mit zukünftig möglicherweise überdurchschnittlicher Grundwasserstandsänderungen als Folge des Klimawandels. Im Falle zukünftig deutlich sinkender Grundwasserstände (Projektion MIROC5_rcp85_WETTREG2013) könnten die vorhanden

Infiltrationsanlagen die durch den Klimawandel bedingten Änderungen der Grundwasserstände nur in den jeweilig zugeordneten Infiltrationsbereichen vollständig kompensieren. Die hierfür erforderlichen zusätzlichen Infiltrationsmengen liegen im Bereich von wenigen Mio. m³/a. Mit den vorhandenen Anlagen könnte eine Fernwirkung auf andere Teilbereiche des Hessischen Rieds nur mit drastischen Mengenerhöhungen der Infiltration erzielt werden, die an anderer Stelle die Vernässungsgefährdung spürbar vergrößern. Eine solche Vorgehensweise schließt sich daher aus. Ähnliches Gilt für die Infiltration im Frankfurter Stadtwald.

Anlage 9 zeigt für das Hessische Ried charakteristische Verläufe berechneter Grundwasserstände an Messstellenstandorten. Die Diagramme zeigen für eine verbesserte Lesbarkeit die trockene Projektion MIROC5_rcp85_WETTREG2013, die Projektion CanESM2_rcp85_CCLM mit stabiler Grundwasserneubildung bis in die nahe Zukunft und die feuchte Projektion HadGEM2_rcp85_RCA4. Diese Projektionen geben die Bandbreite der zukünftigen Entwicklung der Grundwasserstände wieder, in die sich die berechneten Grundwasserstände der übrigen Projektionen einfügen. Bis 2040 verändert sich die Dynamik gegenüber dem Bezugszeitraum nicht wesentlich. Danach werden zunehmend langjährige Schwankungsamplituden als Folge der ausgeprägteren Trocken- und Nassphasen berechnet. In Übereinstimmung mit der mittleren Entwicklung der jeweiligen Projektion sinken außerhalb von Bereichen geringer Grundwasserflurabstände die mittleren Grundwasserstände (MIROC5_rcp85_WETTREG2013) oder steigen teilweise sehr deutlich die Grundwasserstände an (HadGEM2_rcp85_RCA4). Auch die zunehmenden saisonalen Grundwasserstandschwankungen (höhere Winterniederschläge, trockenere Sommer, höhere Verdunstung insbesondere in der Vegetationsperiode) führen im gesamten Hessischen Ried zu wachsenden Amplituden in den Grundwasserständen.

5.2 Hessischer Untermain

Das Klimaänderungssignal auf die mittleren Grundwasserstände für die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2070-2099) im Hessischen Untermain zeigt **Anlage 10**. Die größten Änderungen treten in Bereichen mit größeren Grundwasserflurabständen auf. In diesen Bereichen fehlen entweder Fließgewässer weitgehend oder die Austauschraten zwischen Fließgewässer und Grundwasser werden durch das Maß der Grundwasserstandsänderung als Folge der Klimaänderung nicht nennenswert beeinflusst. Dies sind v.a. das nordwestliche und zentrale Modellgebiet im Bereich von Dietzenbach, Heusenstamm und Rodgau sowie in etwas abgeschwächter Form die Schaafheimer Senke. In der trockenen Projektion MIROC5_rcp85_WETTREG2013 sinken in diesen Bereichen in der nahen Zukunft die mittleren Grundwasserstände flächenhaft um ca. 1 m. In der fernen Zukunft können die mittleren Grundwasserstände flächenhaft um über 1 m und lokal um bis zu ca. 2 m fallen.

In der feuchten Projektion HadGEM2_rcp85_RCA4 wird ein Grundwasseranstieg in vergleichbarer Größenordnung berechnet. Dies bedeutet für die gleichen o.g. Gebiete, dass in der nahen Zukunft die mittleren Grundwasserstände flächenhaft um 1 m ansteigen. In der fernen Zukunft können die mittleren Grundwasserstände flächenhaft um über 1 m und lokal um bis zu ca. 2 m ansteigen. In den drei übrigen Projektionen mit einem Anstieg in der Grundwasserneubildung

(EC-EARTH_rcp85_RACMOE, EC-EARTH_rcp85_EPISODES, MPI-ESM_rcp26_RCA4) fällt der Anstieg der mittleren Grundwasserstände gegenüber der Projektion HadGEM2_rcp85_RCA4 nur geringfügig schwächer aus. Im Vergleich zum Hessischen Ried reagieren damit die Grundwasserstände stärker auf Veränderungen in der Grundwasserneubildung.

Bei geringen Grundwasserflurabständen stabilisieren die Wechselwirkungen mit den Fließgewässern die Grundwasserstände. Durch den Austausch mit Fließgewässern wird die Wirkung der Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung aus Niederschlag gedämpft. Dabei findet die Kompensation kleinräumig auf der Skala eines Einzugsgebiets statt. Eine vollständige Kompensation der Wirkung aus der Fließgewässerinteraktion setzt ein verändertes hydraulisches Gefälle zwischen Fließgewässer und Grundwasser voraus, wie es in Anlage 10 gezeigt wird. Die die Grundwasserstände stabilisierenden Wechselwirkungen mit den Fließgewässern zeigen sich ausgeprägt entlang des Mains und im Gewässersystem der Gersprenz.

Bei einer weitgehend stabilen Grundwasserneubildung als Gebietsmittel werden auf Grund unterschiedlicher hydro(geo)logischer Eigenschaften sowohl Bereiche mit signifikant steigenden Grundwasserständen (i.W. Bereiche mit großen Grundwasserflurabständen) als auch Bereiche mit signifikant sinkenden Grundwasserständen nebeneinander auftreten. Sinkende Grundwasserstände setzen eine hohe tatsächliche Verdunstung voraus wie sie z.B. bei Wäldern mit Grundwasseranschluss gegeben ist.

Anlage 11 zeigt für den Hessische Untermain charakteristische Verläufe berechneter Grundwasserstände an Messstellenstandorten. Die Diagramme zeigen für eine verbesserte Lesbarkeit die trockene Projektion MIROC5_rcp85_WETTREG2013, die Projektion CanESM2_rcp85_CCLM mit stabiler Grundwasserneubildung bis in die nahe Zukunft und die feuchte Projektion HadGinEM2_rcp85_RCA4. Diese Projektionen geben die Bandbreite der zukünftigen Entwicklung der Grundwasserstände wieder, in die sich die berechneten Grundwasserstände der übrigen Projektionen einfügen. Bis 2040 verändert sich die Dynamik gegenüber dem Bezugszeitraum nicht wesentlich. Danach werden mit der Projektion HadGEM2_rcp85_RCA4 zunehmend langjährige Schwankungsamplituden als Folge der ausgeprägteren Trocken- und Nassphasen berechnet. Bei den übrigen Projektionen bleibt die Schwankungsamplitude gegenüber dem Bezugszeitraum weitgehend unverändert. In Übereinstimmung mit der mittleren Entwicklung der jeweiligen Projektion sinken außerhalb von Bereichen geringer Grundwasserflurabstände die mittleren Grundwasserstände (MIROC5_rcp85_WETTREG2013) oder steigen teilweise sehr deutlich die Grundwasserstände an (HadGEM2_rcp85_RCA4).

5.3 Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg

Die Beurteilung und Bewertung zukünftiger Grundwasserstände und die sich daraus ergebenden Konsequenzen zur Grundwasserbewirtschaftung werden anhand der berechneten Grundwasserneubildung auf Basis beobachteter meteorologischer Größen und historischer Grundwasserstandsganglinien vorgenommen. Hierbei wird der Schwerpunkt auf das wasserwirtschaftlich stark genutzte Einzugsgebiet Inheiden gelegt.

Der Vogelsberg ist ein Kluftgrundwasserleitersystem, in dem die 3 hydrogeologischen Zonen „Oberwaldzone“, „Zone der schwebenden Grundwasserstockwerke“ und „Zone der durchgehenden Grundwassersättigung“ unterschieden werden. Ein Teilraum der Oberwaldzone liegt im Osten des Modellgebiets und ist durch hohe Niederschläge und hohe Grundwasserneubildungsraten geprägt. Inheiden liegt im südwestlichen Vogelsberg (südwestliches Modellgebiet). Zonen von schwebenden Grundwasserleitern liegen hier über durchgehenden Grundwasserleitern. Die Grundwasserstände sind in dem Gebiet kurzfristig durch die lokale Grundwasserneubildung und langfristig durch den Zufluss aus der Oberwaldzone geprägt (HLUG 2001).

Für die Zone der durchgehenden Grundwassersättigung lassen sich anhand von gemessenen Grundwasserständen durchgehende Potentialflächen konstruieren. Die Entnahmetiefe der 3 Brunnen am Wasserwerk Inheiden können der unteren Potentialfläche zugeordnet werden. Anfang der 1960er Jahre kam es zu einer starken Absenkung der Grundwasserstände am Wasserwerk Inheiden mit einer weiträumigen Absenkung der unteren Potentialfläche. Die hydraulische Verbindung zwischen mittlerer und unterer Potentialfläche wurde großflächig getrennt. Die mittlere Potentialfläche kann seitdem über weite Bereiche als schwebendes Grundwasserstockwerk angesehen werden. Die Zone der durchgehenden Grundwassersättigung beschränkt sich in diesem Bereich heute hauptsächlich auf den Bereich der unteren Potentialfläche (ahu 2002).

Um die Absenkung der Grundwasserstände Anfang der 1960er Jahre zu korrigieren, bestehen für die Förderung an den Brunnen Inheiden laut aktuellem Wasserrechtsbescheid folgende Auflagen (ahu 2019):

- Grenzgrundwasserstand am Brunnen IEB211 von 125,0 müNN darf nicht unterschritten werden
- Grenzgrundwasserstand am Feuchtgebiet „wasserwerksnaher Auwald“ (Grundwassermessstelle IMF 269) von 125,5 müNN darf nicht unterschritten werden
- Senkungsfläche „Mairied“ muss von Dezember bis Ende Juli überflutet sein

Die Sicherstellung der Vernässung in den Naturschutzgebieten erfolgt durch eine gezielte Fördersteuerung mit einer Förderreduzierung nach den Sommermonaten, die sich an den Grundwasserständen und den gefallenen Niederschlägen orientiert. Durch die Fördersteuerung werden die Vernässungsflächen der Feuchtgebiete Mairied und Gänsweid auch bei trockenen Sommern gestützt und ausreichend vernässt. Auf diese Zielstellungen in der Grundwasserbewirtschaftung wurde der Brunnenbetreib vor rund 10 Jahren neu ausgerichtet.

Die Grundwasserstände im Bereich Inheiden sind neben der Förderung durch die lokale und aus dem Oberwald abfließende Grundwasserneubildung beeinflusst. Auswirkungen veränderter Neubildungsraten sind am deutlichsten an Grundwassermessstellen, die außerhalb eines Fördereinflusses stehen, zu beobachten. Abb. 18 zeigt die monatliche Grundwasserneubildung im westlichen Modellgebiet und die Grundwasserstandsganglinie der Messstelle IMF012, die außerhalb des Fördereinflusses der Brunnen Inheiden liegt, für die vergangenen 10 Jahre. Während stabile mittlere Grundwasserneubildungsraten in den Jahren 2013/14 für Grundwasserstände mit nur wenig Schwankungsbreite sorgten, kam es insbesondere im Jahr 2019, in dem die

Grundwasserneubildung sehr niedrig war, zu einem Absinken des Grundwasserstands. Auch wenn es Anfang 2020 wieder zu einem Grundwasseranstieg kam, ist das Niveau der Ganglinie derzeit relativ niedrig.

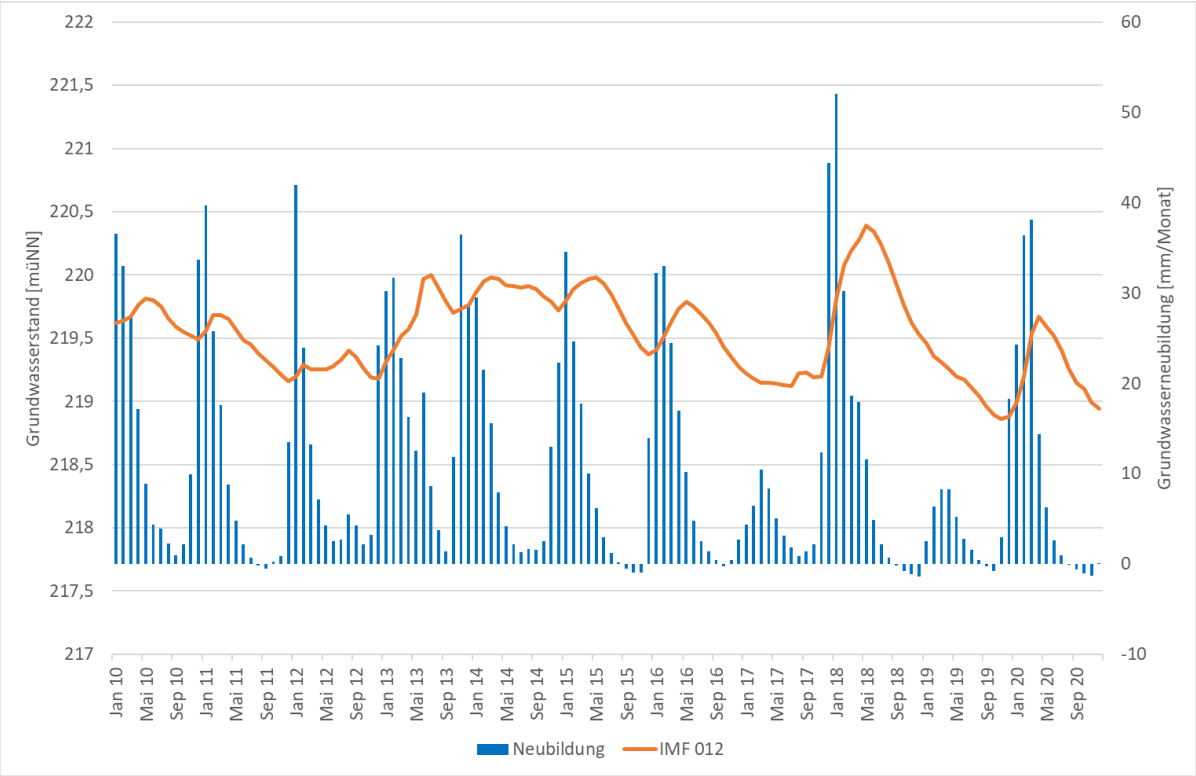

Abb. 18: Monatliche Grundwasserneubildung und Grundwasserstandsganglinie ohne Fördereinfluss (IMF012, westliches Modellgebiet, Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg)

Abb. 19 zeigt die Grundwasserstandsganglinie der ebenfalls außerhalb eines Fördereinflusses liegenden Messstelle RMT131. Hier ist eine verzögerte Reaktion auf Änderungen in der Grundwasserneubildung in Teilen des Einzugsgebiets Inheiden zu sehen. Auffällig hierbei ist insbesondere der um mehr als 1 Jahr verzögerte Grundwasserstandsanstieg in 2019 als Reaktion auf die überdurchschnittliche Grundwasserneubildung in 2018.

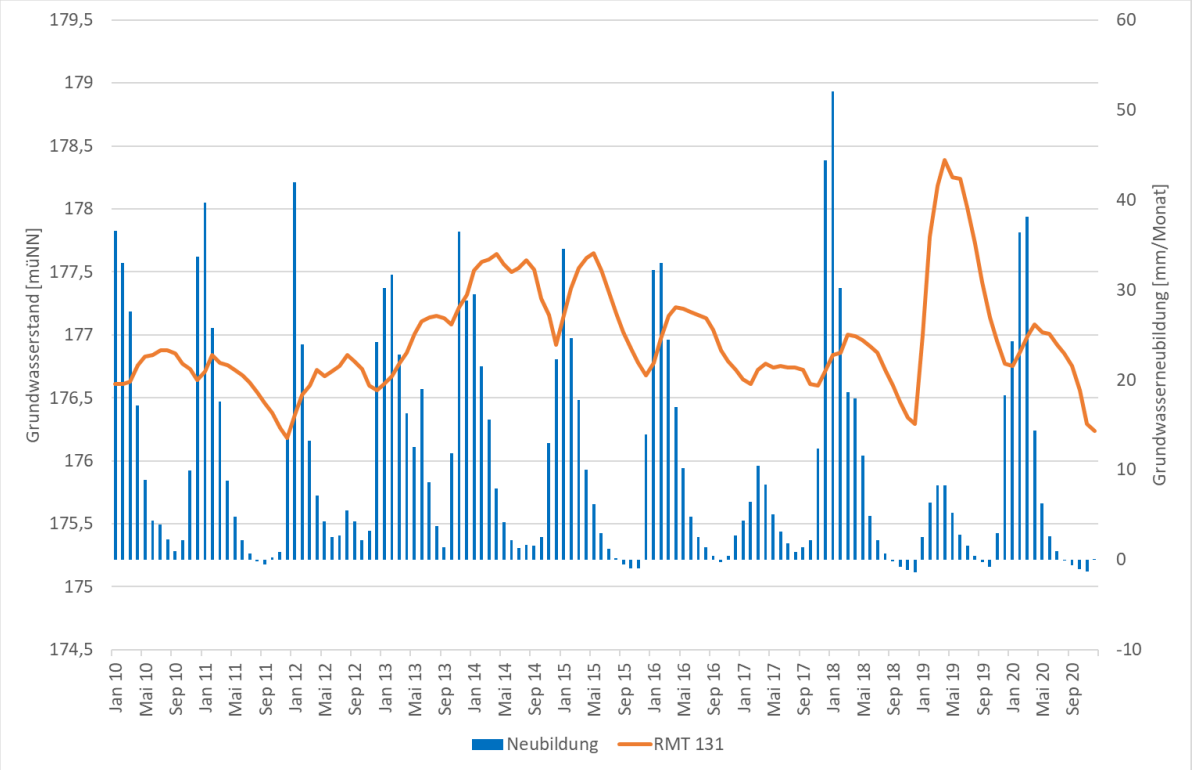

Abb. 19: Monatliche Grundwasserneubildung und Grundwasserstandsganglinie ohne Fördereinfluss (RMT131)

Ausgeprägte saisonale Schwankungen sind für die langjährige Grundwasserstandsentwicklung als unkritisch anzusehen. Mehrjährige ausgeprägte Trockenphasen führen jedoch zu längerfristig sinkenden Grundwasserständen, die für die Bewirtschaftung des WW Inheiden (nutzbares Grundwasserdargebot) maßgebend werden.

6 Zusammenfassung und Einordnung der Berechnungsergebnisse

6.1 Auswahl der Klimaprojektionen

Ausgangspunkt des Projektes bildeten die regionalen Klimaprojektionen des EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment for Europe). Im Rahmen des BMBF-finanzierten Projekts ReKliEs-DE waren diese Daten unter Beteiligung von DWD, HLNUG und GERICS systematisch für Deutschland ausgewertet und ergänzt worden, sodass mit den Ergebnissen auch erste Hinweise zu Qualität bzw. fachlicher Eignung der einzelnen Modellläufe zur Verfügung standen. Im Gegensatz zu den früheren SRES-Szenarien (Special Report on Emission Scenarios), die auf der Entwicklung der Emissionen basierten, bilden die RCP-Klimaprojektionen (Representative Concentration Pathways) unterschiedliche Szenarien bei der Entwicklung der absoluten Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre ab (Klimaszenarien). RCP2.6 entspricht dabei einem Szenario mit deutlichen Anstrengungen beim Klimaschutz, die auch Anstrengungen im Bereich negativer Emissionen einschließen; RCP8.5 entspricht einem „Weiter-so-wie-bisher“-Szenario (sog. Baseline); RCP4.5 beschreibt moderate Entwicklungen, deren Klimawirkungen in ihrer Bandbreite durch die beiden vorgenannten Szenarien erfasst werden.

Stand der wissenschaftlichen Diskussion ist, jedem von anerkannten Fachkreisen als geeignet geprüften Klimamodell die gleiche Bedeutung zuzuerkennen. Hiermit wird dem Problem begegnet, dass systematische Modellfehler und natürliche Klimavariabilität zu einer großen Bandbreite projizierter möglicher Änderungen des Klimas führen. Für eine weitergehende Untersuchung des Klimaänderungssignals und dessen Wirkung hat sich daher die Arbeit mit Ensembles von Klimaprojektionen etabliert.

Bei der Zusammenstellung des Projekt-Ensembles wurden systematisch die Abbildung der Bandbreite des Änderungssignals des Niederschlags und der potentiellen Verdunstung (jeweils Jahressummen und saisonal) sowie eine ausgeprägte Dynamik in der mehrjährigen klimatischen Wasserbilanz (rein manuelles Auswahlverfahren durch Sichtung der Ganglinien) geprüft. Letztere wurde einbezogen, weil langjährige Erfahrungen zur Grundwasserbewirtschaftung zeigen, dass in den Untersuchungsgebieten extreme Zustände nur in der Abfolge mehrjähriger Nass- oder Trockenphasen auftreten.

Bei der Ensemblezusammenstellung wurde ferner darauf geachtet,

- Informationen zur Bedeutung von Global- und Regionalmodell in der Modellkette bei Fragen der Grundwasserbewirtschaftung durch eine hohe Zahl verschiedener Global- und Regionalmodellen zu gewinnen,
- Projektionen sowohl statistischer als auch dynamischer Regionalmodelle zu verwenden,
- zu einer Einschätzung der Relevanz der Klimaszenarien bei der Entwicklung der Grundwasserneubildung zu gelangen.

Die biaskorrigierten meteorologischen Eingangsdaten für Niederschlag und potentielle Verdunstung in der Auflösung des EUR11-Gitters (ca. 12 km x 12 km Rasterzellenweite) wurden auf die Modellgitter der Bodenwasserhaushaltsmodelle verfeinert. Die Regionalisierung erfolgte mittels statistischem Downscaling. Aus gerasterten räumlich hochaufgelösten Beobachtungsdaten von Niederschlag und potentieller Verdunstung wurde deren Verteilungsmuster in den Modellgebieten mittels Hauptkomponentenanalyse (z.B. Berücksichtigung von Einflussfaktoren wie Topografie der Erdoberfläche oder Luv- und Lee-Effekte) ermittelt und hochaufgelöste Eingangsdatensätze im 1x1 km²-Raster für Niederschlag und potentielle Evapotranspiration erstellt.

Mit dem gewählten Ensemble der Klimaprojektionen, darunter ein RCP2.6 und fünf RCP8.5-Szenarien, steht damit die Ergebnisbreite zur Beschreibung der möglichen Entwicklung der Grundwasserneubildung und des Grundwasserdargebots für die Untersuchungsgebiete Hessisches Ried, Hessischer Untermain und Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg zur Verfügung.

Alle regionalen Klimaprojektionen zeigen für die Untersuchungsgebiete bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine Fortsetzung des bereits beobachteten Temperaturanstiegs. Die potentielle Verdunstung bzw. der Wasserbedarf des Naturhaushalts werden entsprechend ansteigen.

Die Entwicklung der Niederschläge als determinierende antreibende Größe der Grundwasserneubildung hingegen wird deutlich vom Einfluss der verwendeten globalen und regionalen Klimamodelle (Modellkette) geprägt. Einen markanten Trend zu trockeneren Verhältnissen zeigt in den Bodenwasserhaushaltsberechnungen zur Ermittlung der Grundwasserneubildung ausschließlich das Regionalmodell WETTREG 2013. Sämtliche dynamischen Regionalmodelle und auch das im Rahmen dieser Untersuchung betrachtete zweite statistische Regionalmodell EPISODES führen zu weitgehend stabilen oder ansteigenden mittleren Grundwasserneubildungsraten. In dieser Spanne liegt auch das einzige RCP2.6-Klimaszenario. Vergleichsweise einheitlich deuten die Klimamodellketten auf eine saisonale Umverteilung von geringeren Niederschlagsmengen im Sommer hin zu größeren im Winter (robuste Ensembleprojektion) hin.

6.2 Grundwasserneubildung im Klimawandel

Die Klimaprojektionen umfassen zur Kontrolle auch vergangene Zeiträume, so dass die berechneten Ergebnisse hierfür mit gemessenen Werten verglichen werden können. So reicht die Spanne der mittleren Grundwasserneubildung (Gebietsmittel) im Bezugszeitraum 1971-2000 der Klimaprojektionen im Hessischen Ried von 101 mm/a bis 159 mm/a. Die vergleichbaren Werte für den Hessischen Untermain reichen von 108 mm/a bis 151 mm/a und für die Wetterau und Westlichen Unteren Vogelsberg von 253 mm/a bis 325 mm/a. Diese Werte liegen in einem Rahmen, der sich auch aus Beobachtungsdaten ergibt. Dies ist ein Beleg für die deutlichen Fortschritte in der regionalen Klimamodellierung. Qualitativ vergleichbare Daten von dynamischen regionalen Klimamodellen für Fragestellungen zur Grundwasserbewirtschaftung waren für die Bearbeitung des BMBF-Forschungsvorhabens AnKLiG (2006-2010) nicht verfügbar.

Zu beachten ist dabei allerdings, dass die originalen Projektionsdaten der dynamischen Modelle vor der Verwendung im Bodenwasserhaushaltsmodell bereits einer Korrektur systematischer Fehler (Bias-Korrektur) unterzogen wurden, die das Ziel einer Anpassung der Größenordnungen an die der mittleren beobachteten Werte im Bezugszeitraum hatte. Da jede Anpassung der Klimamodellergebnisse die Gefahr einer Veränderung des Klimaänderungssignals beinhaltet, verbleibt hier für die Impact-Modellierung eine gewisse Unsicherheit. Auch diesem Spezifikum dynamischer Modelle kann durch die Arbeit im Ensemble begegnet werden.

Die berechnete Spanne des Klimaänderungssignals bei der Grundwasserneubildung für die nahe Zukunft (2021-2050) und ferne Zukunft (2070-2099) ist zunächst überraschend in allen drei Untersuchungsgebieten Hessisches Ried, Hessischer Untermain sowie Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg relativ ähnlich. Bei der Ergebnisanalyse werden jedoch unterschiedliche Wirkzusammenhänge innerhalb der Gebiete deutlich, die die übereinstimmende mittlere Änderung der Grundwasserneubildung in den drei Untersuchungsgebieten nicht als generell auszuweisendes Merkmal charakterisieren (s.u.). Die berechnete Spanne der mittleren Grundwasserneubildungsänderung (Gebietsmittel) reicht in der nahen Zukunft von einer Zunahme der Grundwasserneubildung um ca. 50 mm/a bis zu einer Abnahme um ca. 50 mm/a jeweils bezogen auf den Bezugszeitraum der jeweiligen Klimaprojektion. In der fernen Zukunft reicht die berechnete Spanne von einer Zunahme der Grundwasserneubildung um ca. 70 mm/a bis zu einer Abnahme um ca. 80 mm/a. Betrachtet man nur die Ergebnisse der dynamischen Modelle und lässt das Regionalmodell WETTREG 2013 mit seinem markanten Trend zu trockeneren Verhältnissen hierfür außer Betracht, reicht die berechnete Spanne der mittleren Grundwasserneubildungsänderung in der nahen Zukunft (2021-2050) von einer Zunahme der Grundwasserneubildung um ca. 50 mm/a bis zu einer weiterhin konstanten Grundwasserneubildung. In der fernen Zukunft (2070-2099) reicht die berechnete Spanne dann von einer Zunahme der Grundwasserneubildung um ca. 70 mm/a bis zu einer Abnahme um ca. 30 mm/a.

Im Vogelsberg zeigt sich bei der projizierten Niederschlagsverteilung zukünftig eine stärkere Zunahme in den höheren Lagen mit einem korrespondierenden Anstieg der Grundwasserneubildung. Das Dargebot im Einzugsgebiet des Wasserwerks Inheiden profitiert hiervon jedoch nur eingeschränkt.

Trotz der unterschiedlichen Gebietsmerkmale der drei ausgewählten Untersuchungsgebiete Hessisches Ried, Hessischer Untermains sowie Wetterau und Unterer Westlicher Vogelsberg zeigen die Klimaprojektionen in den die Grundwasserneubildung antreibenden atmosphärischen Größen Niederschlag und potenzielle Verdunstung eine ähnliche Entwicklung, die auch für das Gebiet aller WRM-Mitgliedunternehmen als gültig angesehen werden darf. Für das Gesamtgebiet der WRM-Mitgliedunternehmen ist eine stabile bis moderat ansteigende mittlere Grundwasserneubildung in der nahen Zukunft (2021-2050) wahrscheinlich. Die Dynamik in der Grundwasserneubildung wird dann sehr deutlich von hydro(geo)logischen Eigenschaften der Gewinnungsgebiete geprägt, die eine spezifische Betrachtung erfordern.

6.3 Nass- und Trockenperioden, Entwicklung des Dargebots

Alle Klimaprojektionen bis 2100 weisen auf ausgeprägtere mehrjährige Nass- und Trockenphasen bis 2100 hin, die für die Grundwasserbewirtschaftung in den Untersuchungsgebieten maßgeblich sind. Für das Einzugsgebiet des WW Inheiden führen 3 Projektionen im Vergleich zu heute zu etwa unveränderten Grundwasserneubildungsminima in einem 3- bzw. 5-Jahreszeitraum der gleitenden Mittelwertbildung. 3 Projektionen ergeben für die gleichen Zeiträume einen Rückgang von ca. 25 %. Für das Hessische Ried und für den Hessischen Untermain reicht die Bandbreite des Rückgangs der Grundwasserneubildung in Trockenphasen (3-jähriges bzw. 5-jähriges gleitende Jahresmittel) von 0 bis 50 %. Ähnliche prozentuale Änderungen können auch für längere Zeiträume einer gleitenden Mittelwertbildung in Ansatz gebracht werden.

Die zukünftig noch stärker ausgeprägten Nass- und Trockenphasen werden höhere Anforderungen an die Grundwasserbewirtschaftung stellen, um die stärker werdenden Dargebotsschwankungen auch im Rahmen der wasserrechtlichen Bewirtschaftungsvorgaben kompensieren zu können. Grundsätzlich ist zur Vorbereitung auf Trockenphasen eine stärkere Bevorratung im Grundwasserspeicher geeignet. Im Hessischen Ried haben sich langjährig die Infiltrationsanlagen als zentrales Element der Grundwasserbewirtschaftung bewährt. In Bereichen mit einer Stockwerksgliederung im Grundwasserleiter bieten temporäre Förderverlagerungen in tiefere Stockwerke eine weitere Möglichkeit einer verträglichen Grundwasserentnahme.

Im Hessischen Ried liegen die vorhandenen Infiltrationsanlagen nicht im Zentrum der Flächen überdurchschnittlicher klimawandelbedingter Grundwasserstandsänderungen. Im Falle zukünftig zeitweise deutlich sinkender Grundwasserstände wird es nur im Bereich der jeweiligen Infiltrationsanlagen gelingen, die durch den Klimawandel verursachten Änderungen der Grundwasserstände vollständig zu kompensieren. Die hierfür erforderlichen zusätzlichen Infiltrationsmengen liegen im Bereich von wenigen Mio. m³/a. Systembedingt kann mit den vorhandenen Anlagen keine Fernwirkung auf andere Gebiete erreicht werden, da damit an anderer Stelle die Vernässungsgefährdung spürbar vergrößert würde.

Entsprechend ist auch im Kontext wasserrechtlicher Verfahren auf Handlungsspielräume im Sinne ausreichender und standortangepasster Einflussmöglichkeiten auf die Grundwasserstände im Rahmen einer aktiven Grundwasserbewirtschaftung zu achten. Die Wirkungen des Klimawandels sind bei der Festsetzung von einzuhaltenden Grundwasserständen als Bescheidsauflage angemessen zu berücksichtigen (z.B. temporäre Unterschreitung von Grundwasserständen in Bereichen ohne Nutzungskonflikte).

In Verbindung mit den Grundwassermodellrechnungen werden die prägenden Einflüsse der hydro(geo)logischen Gebietseigenschaften auf die zukünftige Veränderung bei der Grundwasserneubildung als Folge des Klimawandels offenkundig. Eine vergleichsweise starke Wirkung der höheren Verdunstungsraten, die an den Temperaturanstieg gekoppelt sind, entsteht in Bereichen, in denen der atmosphärische Verdunstungsanspruch auch tatsächlich aus dem Bodenwasserspeicher bedient werden kann. Dies trifft insbesondere auf Wälder mit Grundwasseranschluss (tiefer Wurzelwuchs, optimale Wasserversorgung durch kapillaren Aufstieg aus dem

Grundwasser) und Böden mit einem großen Speichervermögen (z.B. Auensedimente des Rheins oder der Gersprenz) zu.

Die übrigen Bereiche profitieren eher von einer saisonalen Umverteilung der Niederschläge mit höheren Niederschlägen im Winter, die den wesentlichen Beitrag zur Grundwasserneubildung erbringen.

Die Grundwasserstände variieren in enger Kopplung mit der flächenhaften Grundwasserneubildung. Meist weisen die auf Grundlage der Klimaprojektionen berechneten Grundwasserstände langfristig (ferne Zukunft) eine zunehmende langjährige Schwankungsamplitude als Folge der ausgeprägteren Trocken- und Nassphasen auf. Auch die zunehmenden saisonalen Grundwasserstandschwankungen (höhere Winterniederschläge, trockenere Sommer, höhere Verdunstung insbesondere in der Vegetationsperiode) werden einen erkennbaren Einfluss auf die Grundwasserstände haben.

In Bereichen hoher Grundwasserflurabstände (im Hessischen Ried v.a. der Bereich Frankfurter Stadtwald/Neu-Isenburg und westlich von Darmstadt sowie im Hessischen Untermain mit Ausnahme der Main- und Gersprenzniederung) reicht die Spanne der Änderung der über den Zeitraum 2021-2050 (nahe Zukunft) gemittelten Grundwasserstände etwa von -1 m bis + 1 m. Am Ende des Betrachtungszeitraumes kann sich die über den Zeitraum 2070-2099 gemittelte Grundwasserstandsänderung etwa verdoppeln. Bei hohen Flurabständen ist in der Regel jedoch keine ökologische Relevanz gegeben.

In Verbindung mit geringen Grundwasserflurabständen stabilisiert die Wechselwirkung mit den Fließgewässern die Grundwasserstände. Durch den Austausch mit Fließgewässern wird die Wirkung der Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung aus Niederschlag gedämpft. Dabei findet die Kompensation kleinräumig auf der Skala eines Einzugsgebiets statt. Die kompensierende Wirkung der Fließgewässerinteraktion setzt ein entsprechend verändertes hydraulisches Gefälle zwischen Fließgewässer und Grundwasser voraus, so dass die Kompensation eines geringeren Dargebots in Folge verringerter Grundwasserneubildung aus Niederschlag durch Vorgaben einzuhaltender Grenz- bz. Niedriggrundwasserstände eingeschränkt wird. Hierbei sind Auswirkungen auf die Gewässer- und Grundwasserqualität möglich und zu beachten.

Bei unverändertem Grundwasserstandsniveau wird die Dargebotsentwicklung durch die Veränderungen in der flächenhaften Grundwasserneubildung geprägt.

6.4 Einordnung der Dargebotsentwicklung

Um zu einer fundierten Einordnung zur Dargebotsentwicklung als Ergebnis der Klimaprojektionen (Impaktmodellierung) zu gelangen, wurde weiterhin ein modellgestützter Vergleich historischer Trockenperioden auf Grundlage meteorologischer Beobachtungsdaten durchgeführt. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stand die Gegenüberstellung der aktuellen Phase unterdurchschnittlicher Grundwasserneubildung, die unstrittig bereits dem Klimawandel unterliegt, zur Trockenperiode 1971-76, die in weitaus geringerem Maße vom Klimawandel beeinflusst war. In diesem Fall wurde die Grundwasserneubildung in Modellrechnungen auf Basis meteorologischer

Beobachtungsdaten ermittelt. Die übrigen Einflussgrößen auf die Grundwasserneubildung wie Landnutzung, Fördermengen oder Grundwasserstände lehnten sich an die aktuellen Verhältnisse an und wurden über den gesamten Simulationszeitraum konstant gehalten. Hierdurch war es möglich, systematisch zu bestimmen, inwieweit ausschließlich das Klima (beobachteter Witterungsverlauf) die Grundwasserneubildung verändert. Beobachtete Grundwasserstände sind für diese Quantifizierung weniger geeignet, da sie zahlreichen weiteren Einflüssen deutlich unterliegen (z.B. Veränderungen in der Grundwasserbewirtschaftung und der Landnutzung).

Im Hessischen Ried waren die Jahre 1973, 1971 und 1976 in der Rangfolge der trockensten Einzeljahre die drei Jahre mit der geringsten jährlichen Grundwasserneubildung im Betrachtungszeitraum 1970-2020 (Beobachtungsdaten). Auch das niedrigste 3-jährige gleitende Mittel tritt in der Trockenperiode der 1970er Jahre auf. Erst ab dem 7-jährigen gleitenden Mittel ist die gemittelte Grundwasserneubildung für die Trockenphase bis 2020 niedriger als für den Vergleichszeitraum in den 1970er Jahren. Derartige langandauernden, aber mit im Vergleich zu kürzeren Betrachtungszeiträumen etwas höheren Neubildungsraten sind für die Grundwasserbewirtschaftung im Hessischen Ried allerdings meist weniger kritisch.

Hiervon weichen die Ergebnisse im Hessischen Untermain grundlegend ab. Das Einzeljahr mit der geringsten Grundwasserneubildung liegt in der aktuellen Trockenphase (2019). Das Jahr 2006 liegt in der Rangfolge der trockensten Einzeljahre an 2. Stelle und erst an 3. Stelle liegt mit dem Jahr 1976 ein Jahr aus der Trockenperiode der 1970er. Auch die Minima der gleitenden mehrjährigen Mittel finden sich durchgängig in der aktuellen Trockenphase. Die Ursache gegenüber dem vom Hessischen Ried abweichenden Verhalten wird in erster Linie in den hydro(geo)logischen Gebietseigenschaften gesehen. Als Folge der vergleichsweisen hohen Anteile an Flächen mit großen Grundwasserflurabständen reagiert das hydrogeologische System im Hessischen Untermain träger und extreme Einzeljahre werden stärker gepuffert.

Das Gebiet von Wetterau und Westlichem Unteren Vogelsberg nimmt in diesem Vergleich eine Zwischenposition ein.

6.5 Landwirtschaftliche Bewässerung

Das Klimaänderungssignal beim Wasserbedarf in der Landwirtschaft wirkt v.a. durch den an die Temperaturerhöhung gekoppelten Anstieg der Verdunstung in der Vegetationsperiode. Dies wird durch die saisonale Verlagerung der Niederschläge mit trockeneren Sommern noch verstärkt. Die Spanne der berechneten mittleren Zusatzwassermengen in der nahen Zukunft reicht in allen Projektionen im Vergleich zu heute von einem stabilen Niveau bis zu um rund ein Drittel anwachsenden Zusatzwasserbedarf zur Deckung des Pflanzenwasserbedarfs. Insbesondere durch den fortlaufenden Temperaturanstieg getrieben wächst der Zusatzwasserbedarf in der fernen Zukunft um rund 30 % bis 150 % im Vergleich zu heute. Der berechnete Bewässerungsbedarf berücksichtigt nicht Änderungen in der Bewässerungstechnik, in den angebauten Kulturen, z.B. durch die verlängerten Vegetationsperioden, und dergleichen.

6.6 Bewertung des Kenntnisstandes

Die Klimaprojektionen als atmosphärischer Antrieb in den Boden- und Grundwassermodellrechnungen führen meist zu moderaten Entwicklungen bei Grundwasserneubildung und Grundwasserständen bis 2040/2050 (nahe Zukunft). Mit Ausnahme des Regionalmodells WETTREG 2013, das einen Trend zu trockeneren Verhältnissen zeigt, weisen alle übrigen Projektionen bis zur Mitte des Jahrhunderts eine stabile bis steigende mittlere Grundwasserneubildung aus. Ein zumindest stabiles mittleres Grundwasserdargebot ist daher auf Grundlage des derzeitigen Standes der Klimamodellierung bis zur Mitte des Jahrhunderts wahrscheinlich.

Die Untersuchung zeigt, dass die hydro(geo)logischen Gebietseigenschaften einen deutlichen Einfluss darauf haben, wann Extremzustände in der Grundwasserbewirtschaftung auftreten. Der Vergleich des Zeitraums 1970-2020 auf der Grundlage von meteorologischen Beobachtungsdaten weist dabei darauf hin, dass Witterungsverläufe, die wie die Trockenjahre der 1970er Jahre mehrere Jahrzehnte zurückliegen und im Vergleich zu heute weniger stark vom Klimawandel geprägt waren, unverändert zu Extremen in der Grundwasserbewirtschaftung führen können. Die Witterungsvariabilität ist daher in Fragestellungen zu langfristigen Wirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserbewirtschaftung angemessen zu berücksichtigen.

Die tiefgehende Bearbeitung der Auswirkungen des Klimawandels im Rahmen dieses Vorhabens führt auch zu der Einschätzung, dass qualitätsgeprüfte Klimaprojektionen (z.B. EURO-Cordex, ReKlies-De) erstmalig eine Zuverlässigkeit erreichen, die es erlaubt, unter Berücksichtigung methodischer Aspekte (z.B. Bias-Korrektur) Fragestellungen der Grundwasserbewirtschaftung auch in Gebieten mit hohen Anforderungen (z.B. in etwa ausgeglichene klimatische Wasserbilanz) zu bearbeiten. Auf Grund der raschen Weiterentwicklung des Kenntnisstandes in der regionalen Klimamodellierung, der in der Vergangenheit auch zu grundlegend veränderten Einschätzungen des Klimaänderungssignals bei den Niederschlägen geführt hat, sind die Ergebnisse dieser Untersuchung zu einem späteren Zeitpunkt zu überprüfen und ggf. fortzuschreiben.

7 Kurzfassung

Anlass und Methodik:

Die klimatische Entwicklung und deren Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung stellen eine maßgebliche Randbedingung für die zukünftige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen und die Sicherstellung der Wasserversorgung in der Rhein-Main-Region dar.

Die Änderungen in der flächenhaften Grundwasserneubildung wurden exemplarisch für die Gewinnungsgebiete mit Bedeutung für die regionale Wasserversorgung, Hessisches Ried, Hessischer Untermain sowie Wetterau und Westlicher Unterer Vogelsberg, untersucht. Zum Einsatz kamen zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Modelle zur Beschreibung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserströmung.

Den Ausgangspunkt des Projektes bildeten die regionalen Klimaprojektionen, die über EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment for Europe) und das BMBF-Vorhaben ReKliEs-DE bereitgestellt wurden. In systematischen Untersuchungen wurden mehrere Klimaprojektionen ausgewählt, die die Bandbreite des Klimaänderungssignals (Niederschlag und Verdunstung) auf die Grundwasserneubildung erfassen (Ensembleansatz).

Für die weitergehende Untersuchung des Klimaänderungssignals und dessen Wirkung hat sich die Arbeit mit Ensembles von Klimaprojektionen etabliert. Zur Einordnung der Ergebnisse werden die Entwicklungen für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2070-2099) unterschieden.

Um zu einer fundierten Einordnung der Ergebnisse zur Dargebotsentwicklung als Folgerung aus Klimaprojektionen (Impaktmodellierung) zu gelangen, wurde weiterhin ein modellgestützter Vergleich historischer Trockenperioden auf Grundlage meteorologischer Beobachtungsdaten durchgeführt. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stand die Gegenüberstellung der aktuellen Phase unterdurchschnittlicher Grundwasserneubildung ab 2004 bis 2019, die unstrittig bereits dem Klimawandel unterliegt, zur Trockenperiode 1971-76, die in weitaus geringerem Maße vom Klimawandel beeinflusst war.

Ergebnisse:

Die betrachteten Klimaprojektionen als atmosphärischer Antrieb in den Boden- und Grundwassermodellrechnungen führen meist zu moderaten Entwicklungen bei Grundwasserneubildung und Grundwasserständen bis 2040/2050 (nahe Zukunft). Die berechnete Spanne der mittleren Grundwasserneubildungsänderung (Gebietsmittel) reicht in der nahen Zukunft von einer Zunahme der Grundwasserneubildung um ca. 50 mm/a bis zu einer Abnahme um ca. 50 mm/a jeweils bezogen auf den Bezugszeitraum der jeweiligen Klimaprojektion. Betrachtet man nur die Ergebnisse der dynamischen Modelle und lässt das Regionalmodell WETTREG 2013 mit seinem markanten Trend zu trockeneren Verhältnissen hierfür außer Betracht, reicht die berechnete Spanne der mittleren Grundwasserneubildungsänderung in der nahen Zukunft (2021-2050) von einer Zunahme der Grundwasserneubildung um ca. 50 mm/a bis zu einer weiterhin konstanten Grundwasserneubildung. Im Vogelsberg zeigt sich bei der projizierten Niederschlagsverteilung

zukünftig eine stärkere Zunahme in den höheren Lagen mit einem korrespondierenden Anstieg der Grundwasserneubildung. Das Dargebot im Einzugsgebiet des Wasserwerks Inheiden profitiert hiervon jedoch nur eingeschränkt.

Mit Ausnahme des Regionalmodells WETTREG 2013, das einen Trend zu trockeneren Verhältnissen zeigt, weisen alle übrigen Projektionen bis zur Mitte des Jahrhunderts eine stabile bis steigende mittlere Grundwasserneubildung aus. Ein zumindest stabiles mittleres Grundwasserdargebot in allen drei Untersuchungsgebieten ist daher auf Grundlage des derzeitigen Standes der Klimamodellierung bis zur Mitte des Jahrhunderts wahrscheinlich. Dies ist auf das Gesamtgebiet der WRM-Mitgliedunternehmen für die nahe Zukunft (2021-2050) übertragbar. Die Entwicklung in der fernen Zukunft ist dann mit deutlichen Unsicherheiten verbunden.

Bei einer weitgehend stabilen Grundwasserneubildung als Gebietsmittel werden auf Grund unterschiedlicher hydro(geo)logischen Eigenschaften sowohl Bereiche mit signifikant steigenden Grundwasserständen (i.W. Bereiche mit großen Grundwasserflurabständen) als auch Bereiche mit signifikant sinkenden Grundwasserständen nebeneinander auftreten. Sinkende Grundwasserstände setzen eine hohe tatsächliche Verdunstung voraus wie sie z.B. bei Wäldern mit Grundwasseranschluss gegeben ist.

Trotz der unterschiedlichen Gebietsmerkmale der drei ausgewählten Untersuchungsgebiete zeigen die Klimaprojektionen in den die Grundwasserneubildung antreibenden atmosphärischen Größen Niederschlag und potenzielle Verdunstung eine ähnliche Entwicklung, die auch für das Gebiet aller WRM-Mitgliedunternehmen als gültig angesehen werden darf.

Alle Klimaprojektionen weisen allerdings auf ausgeprägtere mehrjährige Nass- und Trockenphasen bis 2100 hin, die für die Grundwasserbewirtschaftung in den Untersuchungsgebieten maßgeblich sind.

Es zeigt sich, dass die hydro(geo)logischen Gebietseigenschaften einen deutlichen Einfluss darauf haben, wann Extremzustände in der Grundwasserbewirtschaftung auftreten. Die Betrachtung des Zeitraums 1970-2020 auf der Grundlage von meteorologischen Beobachtungsdaten weist darauf hin, dass Witterungsverläufe wie in den Trockenjahren der 1970er Jahre bei den Gebietsmerkmerkmalen des Hessischen Rieds unverändert zu Extremen in der Grundwasserbewirtschaftung führen.

Dagegen bewirkt im Hessischen Untermain die langjährige Phase unterdurchschnittlicher Grundwasserneubildung bis 2019 rechnerisch historische Niedriggrundwasserstände. Das Gebiet von Wetterau und Westlichem Unteren Vogelsberg nimmt in diesem Vergleich eine Zwischenposition ein. Die Witterungsvariabilität ist daher in Fragestellungen zu langfristigen Wirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserbewirtschaftung angemessen zu berücksichtigen.

In den durch Grundwasserentnahmen oder Grundwasseranreicherungen beinflussbaren Bereichen werden zusätzliche Anforderungen an die Grundwasserbewirtschaftung gestellt, um die stärker werdenden Dargebotsschwankungen auch im Rahmen der wasserrechtlichen Bewirtschaftungsvorgaben (z.B. Einhalten von Grenz- oder Niedriggrundwasserständen) kompensieren zu können.

Vor diesem Hintergrund sind folgende Entwicklungen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten:

- Signifikante Veränderungen der Grundwasserneubildung erst ab 2040/2050.
- Bis dahin eher moderate Veränderungen der natürlichen Grundwasserneubildung.
- Auf Grund der uneinheitlichen Entwicklung der Grundwasserneubildung im Ensemble der Klimaprojektionen sind flexible (robuste) Anpassungsmaßnahmen erforderlich.
- Konzentration der Neubildungsphase auf kürzere Zeiträume im Winterhalbjahr, daher Zunahme der saisonalen Schwankungsbreite der Grundwasserstände.
- Zunahme von Extremperioden, daher Zunahme auch der langjährigen periodischen Grundwasserstandsschwankungen.
- Hohe Abhängigkeit von hydro(geo)logischen Standortfaktoren, daher örtlich sehr unterschiedliche Auswirkungen, die lokal vertieft untersucht werden müssen.
- Deutliche Zunahme des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfs.

Schlussfolgerungen:

Aus den Ergebnissen lassen sich wichtige und robuste Erkenntnisse auch in Bezug auf die zukünftige Wasserversorgung des Rhein-Main-Ballungsraumes gewinnen, die einerseits maßgeblich von der natürlichen Grundwasserneubildung und dem nutzbaren Grundwasserdargebot abhängt und andererseits innerhalb des Leitungsverbunds auch von der Infiltration aufbereiteten Oberflächenwassers, die wiederum ebenfalls von den veränderlichen klimatischen Bedingungen und Grundwasserständen mitdeterminiert wird.

Damit sind belastbare Handlungsempfehlungen für die Grundwassernutzung im Allgemeinen, für die öffentliche Wasserversorgung, für die Grundwasseranreicherung und für die übergreifende Grundwasserbewirtschaftung im Gebiet der WRM ebenso ableitbar wie für die landwirtschaftliche Beregnung im Bereich des WHR.

Im Hinblick auf die <u>öffentliche Wasserversorgung</u> ergeben sich insbesondere folgende Handlungsnotwendigkeiten:

- Grundsätzlich ist zur Vorbereitung auf Trockenphasen eine stärkere Bevorratung im Grundwasserspeicher geeignet, die jedoch örtlich ggf. durch Vernässungsgefahren begrenzt ist.
- Im Hessischen Ried haben sich langjährig die Infiltrationsanlagen als zentrales Element der Grundwasserbewirtschaftung bewährt. Die vorhandenen Infiltrationsanlagen sind auf Grund ihrer Aufgabenstellung und Lage zum Dargebotsausgleich im näheren Umfeld von Wasserwerken geeignet, um auch die durch den Klimawandel verursachten Änderungen der Grundwasserstände vollständig zu kompensieren. Abseits der bestehenden Standorte hinaus ist dies nicht möglich. Hier wäre die Errichtung zusätzlicher Infiltrationsstandorte oder anderer lokaler Maßnahmen entsprechend dem Handlungsbedarf (z. B. Stützung des Naturraums) zu prüfen.
- In Bereichen mit einer Stockwerksgliederung im Grundwasserleiter bieten temporäre Förderverlagerungen auch in tiefere Stockwerke eine weitere Möglichkeit einer verträglichen Grundwasserentnahme.

- Um einzugsgebietsübergreifend flexibel agieren zu können, erscheint der Ausbau des Leitungsverbundes zwischen verschiedenen Gewinnungsbereichen sinnvoll. Damit könnten temporäre Fördermengenverlagerungen zwischen einzelnen Brunnen oder ganzen Gewinnungsanlagen besser umgesetzt werden.
- Entsprechend ist auch im Kontext wasserrechtlicher Verfahren auf aus den jeweiligen Notwendigkeiten heraus begründete Handlungsspielräume im Sinne ausreichender Einflussmöglichkeiten zu achten, um verträgliche Grundwasserstände z. B. in den Fördergebieten auch unter den Wirkungen des Klimawandels sicherstellen zu können. Soweit es die Handlungsnotwendigkeiten (z. B. Sicherstellung der öffentlichen Wasserversorgung) in besonderen Situationen erfordern, kann auch die temporäre Aussetzung von Grundwasserstandsvorgaben in Bereichen ohne Nutzungskonflikten geprüft werden.

Im Hinblick auf sonstige Wassernutzungen ergeben sich insbesondere folgende Aspekte und Entwicklungsperspektiven:

- Das Klimaänderungssignal beim Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft beruht v.a. auf dem an die Temperaturerhöhung gekoppelten Anstieg der Verdunstung in der Vegetationsperiode. Dies wird durch die saisonale Verlagerung der Niederschläge mit trockeneren Sommern nochmals verstärkt. Die Spanne des berechneten mittleren Bewässerungsbedarfs, der v.a. im Hessischen Ried von erheblicher Bedeutung für die Grundwasserbewirtschaftung ist, reicht in der nahen Zukunft in allen Projektionen im Vergleich zu heute von einem stabilen Niveau bis zu rund einem Drittel anwachsenden Zusatzwasserbedarf. In der fernen Zukunft wird der Bewässerungsbedarf dann verstärkt ansteigen.
- Auffällig ist der Zusammenhang zwischen Klimawandel und verringerter Grundwasserneubildung unter Wald mit Grundwasseranschluss aufgrund erhöhter Verdunstungsleistung. Die Waldbewirtschaftung ist auf derartige Veränderungen anzupassen.
- Andererseits sollten auch die Signale für eine möglicherweise erhöhte Grundwasserneubildung und temporär erhöhte Grundwasserstände nicht aus den Augen verloren werden. Gerade im Hinblick auf Vernässungsgefährdungen für Siedlungen, Verkehrswege, etc. sollte dies bei der Raumplanung mitberücksichtigt werden.

Auf Grund der raschen Weiterentwicklung des Kenntnisstandes in der regionalen Klimamodellierung, die in der Vergangenheit auch zu grundlegend veränderten Einschätzungen des Klimaänderungssignals bei den Niederschlägen geführt hat, sollten die Ergebnisse dieser Untersuchung zu einem späteren Zeitpunkt überprüft und ggf. fortgeschrieben werden. Die weitere Entwicklung in der regionalen Klimamodellierung lässt auch im Hinblick auf strategische und konzeptionelle Überlegungen zur Grundwasserbewirtschaftung erwarten, dass die große Bandbreite möglicher Entwicklungen nach 2050 bei Dargebot und Grundwasserständen weiter eingegrenzt wird.

8 Literaturverzeichnis

AG BODENKUNDE (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl., Nachdr., Hannover.

ahu AG (2002): Wasserrechtsantrag der Oberhessischen Versorgungsbetriebe AG für das Fördergebiet Inheiden. Erläuterungsbericht.

ahu AG (2019): Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht 2018 für die OVAG-Fördergebiete Inheiden, Rainrod, Ober-Schmitten, Kohden, Orbes, Gedern-Merkenfritz, Berstädter Markwald und Lauter/ Wetterfeld. Gutachten.

ATV-DVWK-M 504 (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden.

BGS UMWELT, HLUG, Hessenwasser (2010): Anpassungsstrategien an Klimatrends und Extremwetter und Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement, BMBF-Fördermaßnahme, Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen, Teilaspekt B: Anpassung an Klimatrends und Extremwetter.

Brauch, J., Fröhlich, K., Imbery, F. (2017): Modellierung des Klimasystems. In: Promet – Meteorologische Fortbildung, Heft 99: Regionale Klimamodellierung I – Grundlagen.

Cannon, A.J. (2018): Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. Clim Dyn50, 31–49 (2018). https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6

Cannon, A.J., S.R. Sobie, und T.Q. Murdock (2015): Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes?. J. Climate, 28, 6938–6959, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1

Dobler, A. und Ahrens, B. 1998: Precipitation by a regional climate model and bias correction in Europe and South Asia. Meteorologische Zeitschrift, Vol17, No.4, 499-509, Stuttgart.

DWA-M 504-1 (2018): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasseroberflächen -Teil 1: Grundlagen, experimentelle Bestimmung der Landverdunstung, Gewässerverdunstung.

DWD (2020): Informationen zu den verfügbaren regionalen Klimaprojektionen, letztmalig abgerufen am 18.05.2020, von https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/liste-klimaprojektionen.html?nn=541460

HLUG (2001): Die Hydrologie des vulkanischen Vogelsberges. Geologische Abhandlungen Hessen, Band 108. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden.

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. (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht.

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. (2017): ReKliEs-De

Nutzerhandbuch. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Nutzerhandbuch.

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. (2017): ReKliEs-De Nutzerhandbuch - Langfassung des Kapitels 8 „Datenverarbeitung“. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. Abgerufen am 28.01.2019 von http://reklies.hlnug.de/home/

Krähenmann, S. (2019): Statistisches Downscaling und BIAS-Adjustierung der EURO- CORDEX Simulationen über dem HYRAS-Gebiet, Referat Zentrales Klimabüro (KU11), DWD.

Kreienkamp, F., Paxian, A., Früh, B. et al. (2019): Evaluation of the empirical–statistical downscaling method EPISODES. Clim Dyn 52, 991–1026 (2019). https://doi.org/10.1007/s00382-018-4276-2

URLs:

https://www.ipcc.ch/
https://euro-cordex.net/
https://www.klimanavigator.eu/