

# **Modellierung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung für Schleswig-Holstein im Beobachtungszeitraum 1961 – 2021 und für Klimaszenarien bis 2100**

Ian McNamara, Björn Tetzlaff, Tim Wolters, Frank Wendland

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 654

ISBN 978-3-95806-803-2





Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Bio- und Geowissenschaften (IBG)  
Agrosphäre (IBG-3)

# **Modellierung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung für Schleswig-Holstein im Beobachtungszeitraum 1961 – 2021 und für Klimaszenarien bis 2100**

Ian McNamara, Björn Tetzlaff, Tim Wolters,  
Frank Wendland

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 654

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-803-2

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten  
sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Herausgeber  
und Vertrieb:           Forschungszentrum Jülich GmbH  
                                  Zentralbibliothek, Verlag  
                                  52425 Jülich  
                                  Tel.: +49 2461 61-5368  
                                  Fax: +49 2461 61-6103  
                                  zb-publikation@fz-juelich.de  
                                  www.fz-juelich.de/zb

Umschlaggestaltung: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck:                    Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright:             Forschungszentrum Jülich 2025

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 654

ISSN 1866-1793  
ISBN 978-3-95806-803-2

Vollständig frei verfügbar über das Publikationsportal des Forschungszentrums Jülich (JuSER)  
unter [www.fz-juelich.de/zb/openaccess](http://www.fz-juelich.de/zb/openaccess).



This is an Open Access publication distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/),  
which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Modellierung der flächendifferenzierten  
Grundwasserneubildung für Schleswig-Holstein  
im Beobachtungszeitraum 1961-2021 und für  
Klimaszenarien bis 2100**

*M.Sc. Ian McNamara, Dr. Björn Tetzlaff,  
Dr. Tim Wolters & Prof. Dr. Frank Wendland*

Forschungszentrum Jülich  
Institut für Bio- und Geowissenschaften (IBG-3: Agrosphäre)  
52425 Jülich

Tel.: 02461 61-3165

E-mail: [f.wendland@fz-juelich.de](mailto:f.wendland@fz-juelich.de)

# Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis .....	5
Abkürzungsverzeichnis .....	8
<b>TEIL 1: Modellierung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung für Schleswig-Holstein .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>10</b>
<b>2 Simulation der Abflusskomponenten.....</b>	<b>11</b>
2.1 Hydrologische Grundbegriffe und Definitionen .....	11
2.2 Wasserhaushaltsmodell mGROWA .....	13
2.3 Berechnung der Gesamtabflusshöhe und der Sickerwasserhöhe .....	14
2.3.1 Standorte mit Vegetation .....	16
2.3.2 Versiegelte Standorte .....	23
2.4 Wasserhaushaltssimulation auf freien Wasseroberflächen .....	24
2.5 Ausweisung des Oberflächenabflusses und der Sickerwasserhöhe.....	24
2.6 Separation von Grundwasserneubildung, natürlichem Zwischenabfluss und Dränabfluss .....	25
2.7 Kalibrierung des mGROWA-Modells.....	28
<b>3 Datengrundlagen und Modellsetup .....</b>	<b>29</b>
3.1 Zusammenfassung der verwendeten Daten.....	29
3.2 mGROWA Modellsetup.....	29
3.3 Klimatische Daten.....	30
3.3.1 Niederschlagshöhe .....	31
3.3.2 Potenzielle Evapotranspiration .....	32
3.4 Topographische Datengrundlage.....	33
3.5 Daten zum Versiegelungsgrad .....	35
3.6 Daten zur Landbedeckung .....	36
3.7 Bodenkundliche Datengrundlagen .....	41
3.7.1 Bodenprofile .....	41
3.7.2 Grundwasserbeeinflusste Böden .....	42
3.7.3 Potenziell dränierter Flächen .....	44
3.7.4 Staunässe .....	45
3.7.5 Feldkapazität .....	46
3.7.6 Nutzbare Feldkapazität.....	47
3.8 Bindige Deckschichten.....	48
3.9 Relevante Standorteigenschaften zur Separation des Gesamtabflusses .....	49
3.10 Abflussdaten und Einzugsgebietsabgrenzungen.....	50
<b>4 Modellergebnisse .....</b>	<b>53</b>
4.1 Übersicht zu den Modellergebnissen .....	53
4.2 Tatsächliche Evapotranspiration .....	54

4.3	Gesamtabfluss .....	55
4.4	Oberflächenabfluss .....	56
4.5	Urbaner Direktabfluss .....	57
4.6	Sickerwasserhöhe .....	58
4.7	BFI-Werte .....	58
4.7.1	BFI-Werte für bindige Deckschichten .....	58
4.7.2	BFI-Werte für sonstige Flächen .....	59
4.8	Grundwasserneubildung .....	60
4.9	Natürlicher Zwischenabfluss und Drainageabfluss .....	62
4.10	Ergebnisvalidierung .....	64
4.10.1	Überprüfung des berechneten Netto-Gesamtabflusses .....	64
4.10.2	Überprüfung der berechneten Netto-Grundwasserneubildung .....	67
<b>5</b>	<b>Weitergehende Auswertungen zur modellierten Grundwasserneubildung .....</b>	<b>71</b>
5.1	Auswertung der jährlichen Grundwasserneubildung .....	71
5.2	Räumliche Verteilung der monatlichen Grundwasserneubildung im Zeitraum 1991-2020 .....	75
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....</b>	<b>79</b>
<b>TEIL 2: Grundwasserneubildung unter dem Einfluss des Klimawandels in Schleswig-Holstein - Simulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA .....</b>		
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>83</b>
<b>2</b>	<b>Erläuterungen wichtiger Begriffe in der Klimamodellierung .....</b>	<b>84</b>
<b>3</b>	<b>Vorverarbeitung der Klima-Eingabedaten .....</b>	<b>87</b>
3.1	Zusammenfassung der Klimamodelle .....	87
3.2	Niederschlagsdaten .....	89
3.3	Potenzielle Evapotranspirationsdaten .....	90
3.4	Räumliche Interpolation der klimatischen Eingaben aus Gitterpunkten .....	91
3.5	Vergleich der Änderungen bei Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration .....	92
<b>4</b>	<b>Grundwasserneubildung unter dem Einfluss des Klimawandels bis 2100 .....</b>	<b>96</b>
4.1	Referenzniveau der Netto-Grundwasserneubildung basierend auf beobachteten Klimaeingaben .....	96
4.2	Bewertung des Modell-Bias über den Referenzzeitraum 1971-2000 .....	96
4.3	Veränderungen der Grundwasserneubildung in Schleswig-Holstein .....	102
4.4	Bewertung der Robustheit der Änderungssignale .....	109
4.5	Quantifizierung der wahrscheinlichen Veränderungen .....	111
4.6	Auswertungen für verschiedene Gebietskulissen .....	117
4.6.1	Auswertungen auf Ebene der Planungseinheiten nach EU-WRRL .....	117
4.6.2	Auswertungen auf Ebene der Kreise und kreisfreien Städte .....	121

4.6.3 Auswertungen auf Ebene der hydrogeologischen Teilräume .....	125
4.7 Änderungen der Variabilität.....	129
4.8 Auswertung der Kern-Ensembles.....	132
<b>5 Diskussion und Ausblick .....</b>	<b>135</b>
5.1 Vergleich mit anderen Studien .....	135
5.2 Prognosen zum Klimawandel.....	137
5.3 Mögliche Änderungen der Grundwasserstände .....	137
5.4 Weitere statische Eingangsgrößen .....	138
<b>6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....</b>	<b>139</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>142</b>
<b>Appendix A: Eingaben und Ausgaben für 1971-2000 und 1981-2010.....</b>	<b>150</b>
<b>Appendix B: Tabellierte Werte der Netto-Grundwasserneubildung .....</b>	<b>160</b>
<b>Appendix C: Liste der Akronyme der Klimamodellnamen .....</b>	<b>163</b>
<b>Appendix D: Überblick der klimatischen Eingaben bezüglich des Winter- und Sommerhalbjahrs.....</b>	<b>164</b>
<b>Appendix E: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung für alle 44 Mitglieder des Klima-Ensembles.....</b>	<b>170</b>
<b>Appendix F: Zeitreihendarstellungen der jährlichen und monatlichen räumlichen Mittel der Netto-Grundwasserneubildung für alle 44 Mitglieder des Klima-Ensembles .....</b>	<b>177</b>
<b>Appendix G: Darstellung der jährlichen räumlichen Mittelwerte der Netto-Grundwasserneubildung in Linienform.....</b>	<b>189</b>
<b>Appendix H: Auswertung des Bayern_Ensemble_v1 .....</b>	<b>190</b>

## Symbolverzeichnis

$BFI$	Base-Flow-Index (dimensionslos)
$CWC$	kritischer Wassergehalt
$\frac{ds}{dt}$	Änderung der gespeicherten Wassermenge über die Zeit
$e$	Eulersche Zahl
$e_s(T)$	Sättigungsdampfdruck in hPa
$et_a$	tatsächliche Evapotranspiration in mm/T
$ET_a$	tatsächliche Evapotranspiration in mm/a
$et_o$	Gras-Referenzevapotranspiration in mm/T
$ET_o$	Gras-Referenzevapotranspiration in mm/a
$h$	Wasserspannung in hPa
$h_{tab}$	tabellierte Werte der Wasserspannung in hPa
$i$	Zeitschritt im Modell (Tag)
$j$	Anzahl der für die Validierung verwendeten Einzugsgebiete
$k$	Index zur Kennzeichnung der simulierten Schichten des Modells
$k_{LN}$	landnutzungsspezifischer Verdunstungsfaktor (dimensionslos)
$KGE$	<i>Kling-Gupta efficiency</i>
$n$	Parameter des van Genuchten-Modells (dimensionslos)
$n$	Anzahl der Monate bzw. Jahre, die für einen Vergleich zwei Zeitreihen verwendet werden
$n_{lay}$	Anzahl der Schichten des mGROWA-Modells
$n_{lay,aus}$	Anzahl der Modellschichten, für die im Jahresverlauf Wasser für die tatsächliche Evapotranspiration zur Verfügung stehen kann
$NSE$	<i>Nash-Sutcliffe Efficiency</i>
$p$	Niederschlag in mm/T
$\hat{p}$	korrigierten Niederschlagswerte in mm/T
$p^m$	Niederschlagswerte der Beobachtungen in mm/T
$p^o$	Niederschlagswerte des Modells in mm/T
$P$	Niederschlag in mm/a
$pBIAS$	<i>percent bias</i>
$q_{cr}$	kapillare Aufstiegsrate in mm/T
$q_{cr,pot}$	potenziell mögliche kapillare Aufstiegsrate in mm/T
$Q_D$	Direktabfluss in mm/a
$q_{dir,e,gw}$	direkte Verdunstung aus dem Grundwasser in mm/T
$q_{e,gw}$	die vertikal auf das Modellelement in den Bilanzraum zufließende Wassermenge in mm/T
$Q_{gw}$	Grundwasserneubildungsrate in mm/a
$Q_{mod}$	Abfluss modelliert in mGROWA in m <sup>3</sup> /s
$\bar{Q}_{mod}$	Mittlerer modellierter Abfluss über alle ausgewerteten Einzugsgebiete in m <sup>3</sup> /s
$q_n$	Netto-Gesamtabfluss in mm/T
$Q_o$	Oberflächenabflusshöhe in mm/a
$Q_{obs}$	an den Pegeln beobachtete Abflussmenge in m <sup>3</sup> /s
$\bar{Q}_{obs}$	Mittlerer beobachteter Abfluss über alle ausgewerteten Einzugsgebiete in m <sup>3</sup> /s
$q_p$	Sickerwasserrate in mm/T
$Q_p$	Sickerwasserrate in mm/a
$q_{pp}$	Sickerwasserrate vor Erreichen der Feldkapazität in mm/T

$q_r$	Brutto-Grundwasserneubildung in mm/T
$Q_r$	Brutto-Grundwasserneubildung in mm/a
$Q_{reg,i}$	aus Regressionsmodell extrahierter Abfluss entsprechend dem beobachteten Abfluss in m <sup>3</sup> /s
$q_m$	Netto-Grundwasserneubildung in mm/T
$Q_m$	Netto-Grundwasserneubildung in mm/a oder in mm/mon
$Q_{rn,mod}$	Monatliche bzw. jährliche Netto-Grundwasserneubildung, berechnet unter Verwendung der Eingaben der Klimamodelle in mm/mon oder mm/a
$\bar{Q}_{rn,mod}$	Mittlere monatliche bzw. jährliche Netto-Grundwasserneubildung, berechnet unter Verwendung der Eingaben der Klimamodelle in mm/mon oder mm/a
$\hat{Q}_{rn,mod}$	Durch ein lineares Modell berechnete monatliche bzw. jährliche Netto-Grundwasserneubildung in mm/mon oder mm/a
$Q_{rn,obs}$	Monatliche bzw. jährliche Netto-Grundwasserneubildung, berechnet unter Verwendung der beobachteten Klimaeingaben in mm/mon oder mm/a
$\bar{Q}_{rn,obs}$	Mittlere monatliche bzw. jährliche Netto-Grundwasserneubildung, berechnet unter Verwendung der beobachteten Klimaeingaben in mm/mon oder mm/a
$q_t$	Gesamtabfluss in mm/T
$Q_t$	Gesamtabfluss in mm/a
$q_u$	urbaner Direktabfluss in mm/T
$Q_u$	urbaner Direktabfluss in mm/a
$r$	pflanzenspezifischer Faktor (dimensionslos)
$r$	Pearson-Korrelationskoeffizient
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$R_a$	mittlere extraterrestrische Strahlung in mm/T
$R_{Disse}$	Disse-Funktion
$Rn^*$	Nettostrahlung in W/m <sup>-2</sup>
$RMSE$	<i>root mean square error</i>
$s$	gespeicherte Wassermenge in mm
$s$	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve über Wasser in hPa/K
$\Delta S$	Vorratsänderung in mm/a
$sL$	berechneter Skalierungsfaktor nach LOCI-Methode
$T_{max}$	maximale Tageslufttemperatur in °C
$T_{mean}$	Lufttemperatur als Tagesmittel in °C
$T_{min}$	minimale Tageslufttemperatur in °C
$TCL_{low}$	Terrain classification index for lowlands (dimensionslos)
$u$	Anteil der gesamten täglichen Evapotranspiration, der aus einer Modellschicht entnommen wird (dimensionslos)
$U$	relative Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe in %
$v_z$	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe (Tagesmittel) in m/s
$WDT$	<i>wet day threshold</i>
$z_a$	Abstand zwischen Grundwasseroberfläche und der Untergrenze einer Schicht in dm
$\alpha$	Parameter des van Genuchten-Modells in 1/hPa
$\beta$	Hangexposition gegenüber Nord in °
$\beta$	<i>bias ratio</i>
$\gamma$	Hangneigung in °
$\gamma$	psychrometrische Konstante in hPa/K
$\gamma$	<i>variability ratio</i>
$\gamma^*$	modifizierte psychrometrische Konstante in hPa/K
$\theta$	Wassergehalt im Boden in cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> oder Vol. %

$\theta_a$	pflanzennutzbarer Teil des Wassergehalts bei Feldkapazität (nutzbare Feldkapazität) in $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ oder Vol. %
$\theta_{crit}$	kritischer Wassergehalt in Vol. %
$\theta_{fc}$	Wassergehalt im Boden bei Feldkapazität in $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ oder Vol. %
$\theta_{pwp}$	Wassergehalt im Boden am permanenten Welkepunkt in $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ oder Vol. %
$\theta_r$	Parameter des van Genuchten Modells in $\text{cm}^3/\text{cm}^3$
$\theta_s$	Parameter des van Genuchten Modells in $\text{cm}^3/\text{cm}^3$
$\sigma$	Standardabweichung

## Abkürzungsverzeichnis

ALKIS	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
AMBAV	Agrarmeteorologische Berechnung der aktuellen Verdunstung
ATKIS	Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem
AWGV	Amtliches Wasserwirtschaftliches Gewässerverzeichnis
BGK	Bodengesellschaftenkarte
BK	Bodenkarte
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BOWAB	Bodenwasserbilanzierung
BÜK	Bodenkundliche Übersichtskarte
CDC	<i>Climate Data Center</i>
CLIMB	<i>Climate induced changes on the Hydrology of Mediterranean Basins</i>
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>
CORDEX	<i>Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment</i>
DGM	Digitales Geländemodell
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EPSCG	<i>European Petroleum Survey Group</i>
ETRS	<i>European Terrestrial Reference System</i>
fSms	Mittelsandiger Feinsand
FZJ	Forschungszentrum Jülich
GCM	<i>General circulation model</i>
GFV	Gewässerkundliches Flächenverzeichnis
GROWA	Großräumiges Wasserhaushaltsmodell
GWN	Grundwasserneubildung
HRL	<i>High resolution layer</i>
IDW	<i>Inverse distance weighting</i>
IMD	<i>Imperviousness density</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
KLIMZUG	Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten
LfU	Landesamt für Umwelt
LOCI	<i>Local Intensity Scaling</i>
mGROWA	mehrschichtiges Großräumiges Wasserhaushaltsmodell
MHGW	mittlerer Hochstand des Grundwassers
MNGW	mittlerer Niedrigstand des Grundwassers
MoMNQ	mittlere Niedrigwasserabflüsse
MQ	mittlere Tagesabflüsse
RCM	<i>Regional climate model</i>
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
ReKliEs-De	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland
SRES	<i>Special Report on Emissions Scenarios</i>
SSPI	<i>Surface sealing percolation index</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
WCRP	<i>World Climate Research Programme</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

## **TEIL 1:**

# **Modellierung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung für Schleswig-Holstein**

## 1 Einleitung

Die Grundwasserneubildung (GWN) bildet eine entscheidende Bemessungsgrundlage für unterschiedliche wasserwirtschaftliche Fragestellungen, wie z. B. zur Ermittlung des quantitativen Zustandes des Grundwassers nach EU-Wasserrahmenrichtlinie. Da die Trinkwassergewinnung in Schleswig-Holstein zu 100 Prozent aus Grundwasser erfolgt, ist die Grundwasserneubildung damit eine entscheidende Wasserhaushaltsgröße der Wasserwirtschaft.

Für Schleswig-Holstein wurden Grundwasserneubildungshöhen bislang mit dem Modell GROWA berechnet (Tetzlaff et al., 2017). Die Datengrundlagen für diese Modellierung stammten größtenteils aus dem Jahr 2011. Die Berechnung der tatsächlichen Evapotranspiration geht im GROWA-Modell auf das Verfahren nach Renger und Wessolek (1990) zurück. Dabei wird der Bodenwasserspeicher nicht berücksichtigt und der Bodenwasserhaushalt sowie die Wasserhaushaltskomponenten können nur über sehr lange stationäre Zeiträume betrachtet werden. Typischerweise sind dies 30-jährige Zeiträume, die den Klimareferenzperioden entsprechen. Das GROWA-Modell hat sich seit der für Schleswig-Holstein durchgeführten Modellstudie (Tetzlaff et al., 2017) stetig weiterentwickelt und durch das oben bereits erwähnte mGROWA-Modell ersetzt. Im mGROWA-Modell wurde ein Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell (Erweiterung des BOWAB-Modells von Engel et al., 2012) für Flächen mit Vegetation in die Modellierung integriert. Dadurch werden die Wasserhaushaltsgrößen (z. B. tatsächliche Evapotranspiration, Grundwasserneubildung) nicht mehr nur für langjährige Zeiträume, sondern für einzelne Tage bzw. Monate quantifiziert. Somit sind auch belastbare Aussagen zur saisonalen Variabilität möglich.

Weiterhin hat sich die Datengrundlage für das Land Schleswig-Holstein seit 2011 verbessert. Die in Tetzlaff et al. (2017) verwendeten Bodenparameter standen in unterschiedlicher Auflösung und nicht immer flächendeckend zur Verfügung. Somit wurden die Eingangsparameter aus einem heterogenen Datensatz bestehend aus drei Karten (Bodenschätzung, BK25 und BGK200) abgeleitet und zusammengestellt. Die aktuelle Bodenkundliche Übersichtskarte BÜK250 beinhaltet Leitprofile mit vielen der benötigten Parameter für die Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodellierung. Die für die mGROWA-Modellierung benötigten Parameter, wie z.B. die Feldkapazität, wurden anhand der Daten der BÜK250 abgeleitet und vom Landesamt für Umwelt (LfU) des Landes Schleswig-Holstein und bereitgestellt.

Der Aufbau des Modells mGROWA-Schleswig-Holstein durch das FZJ machte eine enge Zusammenarbeit mit dem LfU erforderlich, um regionale Besonderheiten in den Datengrundlagen und beim Modellierungsprozess zu berücksichtigen. So wurde die Grundwasserneubildung im Östlichen Hügelland mit anstehendem Geschiebemergel im GROWA-Modell als zu hoch berechnet. Im neu zu entwickelnden Modell mGROWA-Schleswig-Holstein sollten diese Schwachstellen in der landesweiten Wasserhaushaltsmodellierung überwunden und die Grundwasserneubildung und weitere Abflusskomponenten plausibler dargestellt werden. Konkret sollten im neu zu entwickelnden mGROWA-Modell für Schleswig-Holstein die folgenden Wasserhaushaltskomponenten berechnet werden:

- tatsächliche Evapotranspiration,
- Gesamtabflusshöhe,
- Oberflächenabflusshöhe,
- Sickerwasserhöhe,
- natürlicher Zwischenabfluss,
- Dränabfluss,
- Direktabfluss aus urbanen Systemen und
- Grundwasserneubildung.

In diesem Bericht werden die Modellierungsergebnisse als mittlere jährliche Raster für den 30-jährigen Zeitraum 1991-2020 dargestellt. Die Ergebnisse für die Zeiträume 1971-2000 und 1981-2010 sowie tabellarische Statistiken für einzelne Monate und Jahre sind im Appendix aufgeführt. Die Arbeiten wurden im Auftrag des LfU Schleswig-Holstein durchgeführt.

## 2 Simulation der Abflusskomponenten

### 2.1 Hydrologische Grundbegriffe und Definitionen

Die gesamte aus einer Landschaft abfließende Wassermenge lässt sich aus der Wasserbilanzgleichung herleiten:

$$Q_t = P - ET_a + \Delta S \quad \text{Gl. 2-1}$$

mit	$Q_t$	=	Gesamtabfluss	(mm/a)
	$P$	=	Niederschlag	(mm/a)
	$ET_a$	=	tatsächliche Evapotranspiration	(mm/a)
	$\Delta S$	=	Vorratsänderung	(mm/a)

Bei langjährigen Betrachtungen kann die Vorratsänderung ( $\Delta S$ ) vernachlässigt werden. Der **Gesamtabfluss** entspricht damit nach DIN 4049-1 (1994) der Differenz zwischen der Niederschlagshöhe und der Höhe der tatsächlichen Evapotranspiration (auch als „reale Verdunstung“ bezeichnet) und lässt sich in verschiedene Abflussanteile (Abb. 2-1) aufgliedern, die den Vorflutern auf der Erdoberfläche oder im Boden und Grundwasserbereich mit unterschiedlichen Fließzeiten zuströmen.

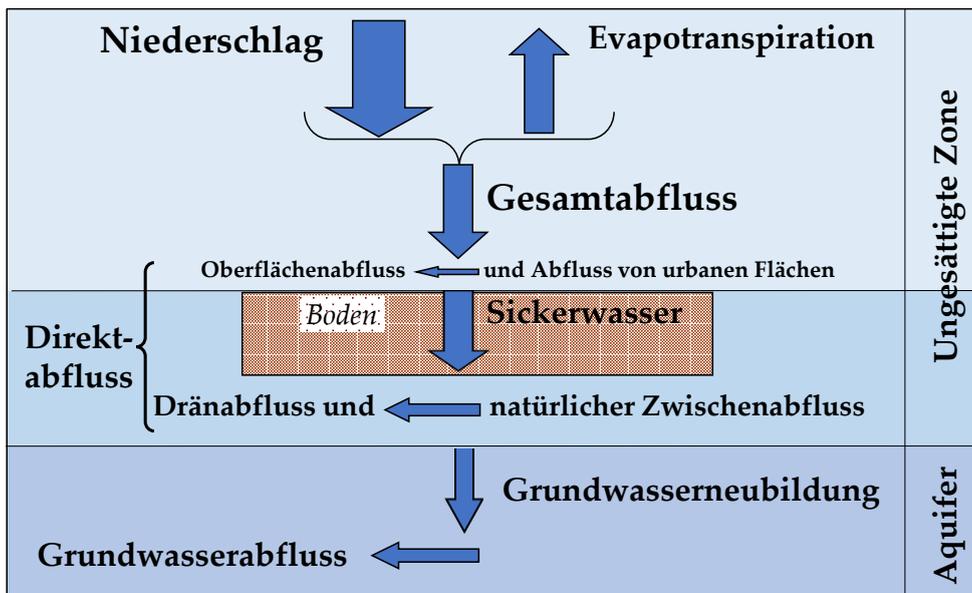


Abbildung 2-1: Die Komponenten des Abflusses.

Als **Oberflächenabfluss** wird nach DIN 4049-3 (1994) der Teil des Abflusses gekennzeichnet, der, ohne in den Boden eingedrungen zu sein, oberirdisch einem Vorfluter zuströmt. Nach einem Niederschlagsereignis erreicht der Oberflächenabfluss den Vorfluter im Allgemeinen nach wenigen Stunden (Baumgartner und Liebscher, 1996). Von Schwarze et al. (1991) und Peschke (1997) wird dieser Abflussanteil als „schneller Direktabfluss“ bezeichnet.

Beim Eindringen in den Boden gelangt das Wasser entweder in den Grundwasserbereich oder an eine wenig wasserleitende Schicht über dem eigentlichen Aquifer. Im letzten Fall wird das in den Boden infiltrierte Wasser (**Sickerwasser**) gestaut und fließt hangparallel dem größten Gefälle folgend oberhalb des eigentlichen Grundwasserbereiches in der wasserungesättigten Zone dem Vorfluter zu. Diese Abflusskomponente wird als **natürlicher Zwischenabfluss** bezeichnet und wird in DIN 4049-3 (1994) als der Teil des Abflusses definiert, der dem Vorfluter unterirdisch mit nur geringer Verzögerung zufließt. Die Fließzeit des natürlichen Zwischenabflusses bis zum Eintritt in den Vorfluter ist länger als die des Oberflächenabflusses und bewirkt ein späteres Ansteigen und langsames Abklingen der Abflussganglinien. Häufig wird der Zwischenabfluss in einen „unmittelbaren“ (schnellen) und einen „verzögerten“ (langsamen) Zwischenabfluss unterschieden, wobei dem „unmittelbaren Zwischenabfluss“ wesentlich höhere Volumenanteile zugeschrieben werden (Baumgartner und Liebscher 1996). Schwarze et al. (1991) und Peschke (1997) bezeichnen diese Abflusskomponente als „verzögerten Direktabfluss“. Die Fließzeit des Zwischenabflusses im Untergrund liegt meist in der Größenordnung von einem bis zu mehreren Tagen.

Bei grundwasserbeeinflussten oder staunässebeeinflussten Böden wurde der Wasserabfluss aus dem oberen Bodenbereich (Wurzelbereich) in vielen Regionen durch die Installation von Dränsystemen (Rohrdränagen, Grabendränagen) beschleunigt. Hydraulisch stellen Dränsysteme schnelle Abflusswege dar, die in ihrer Wirkung mit dem natürlichen Zwischenabfluss vergleichbar sind. **Dränabfluss** und natürlicher Zwischenabfluss werden daher beide dem Direktabfluss zugeordnet.

Die Summe aus Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Abfluss aus Dränagen wird in der DIN 4049-3 (1994) als **Direktabfluss** bezeichnet. Der Direktabfluss ist damit die Summe aller Abflusskomponenten, welche mit nur geringer Zeitverzögerung nach einem abflussauslösenden Niederschlagsereignis den Vorfluter erreichen. Für die vorliegende Untersuchung wurde dieser Definition gefolgt.

Nach DIN 4049-3 (1994) bezeichnet der Begriff der **Grundwasserneubildung** den Zugang von in den Boden infiltriertem Wasser durch den Sickerraum zum Grundwasser. Während die Sickerwassermenge an der Untergrenze des durchwurzelten Bodenraumes gemessen wird, findet die eigentliche Grundwasserneubildung an der Grundwasseroberfläche statt. Grundwasserneubildung findet nur im obersten Grundwasserstockwerk statt, da die Speisung von tieferen Stockwerken als Zusickerung definiert ist.

Als **Basisabfluss** wird nach DIN 4049-3 (1994) der Teil des Abflusses bezeichnet, der nicht zum Direktabfluss eines die Anschwellung (eines Vorfluters) auslösenden Ereignisses zählt. Die Fließzeiten des Basisabflusses sind im Allgemeinen deutlich höher als die der Direktabflusskomponenten. Zum Basisabfluss gehören die Abflussanteile, die mit der Grundwasserneubildung in den Grundwasserraum eingetragen werden. Dieses Wasser bewegt sich als **grundwasserbürtiger Abfluss** dem hydraulischen Potential folgend dem Vorfluter zu.

Im langjährigen Mittel ist die Höhe des grundwasserbürtigen Abflusses nahezu gleichbleibend, so dass man bei Betrachtung größerer Zeiträume von einem Gleichgewicht zwischen der aus infiltrierten Niederschlägen dem Grundwasserraum zufließenden und der aus dem Grundwasserraum in die Vorfluter abströmenden Wassermenge sprechen kann. Als Teil des Wasserkreislaufs eines Gebietes entspricht der mittlere langjährige grundwasserbürtige Abfluss der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung (DIN 4049-3, 1994). Schwarze et al. (1991) und Peschke (1997) unterteilen den Basisabfluss in einen „kurzfristigen“ Basisabfluss (verzögerter Zwischenabfluss) und einen „langfristigen“ Basisabfluss (grundwasserbürtiger Abfluss). Der langfristige Basisabfluss entspricht dabei weitestgehend der Grundwasserneubildung ( $Q_{gw}$ ) (Peschke, 1997). Die mittlere Grundwasserneubildungsrate in einer Landschaft kann somit durch folgende Gleichung bilanziert werden:

$$Q_{gw} = P - ET_a - Q_D$$

mit	$Q_{gw}$	=	mittlere jährliche Grundwasserneubildungsrate	(mm/a)
	$P$	=	mittlere jährliche Niederschlagshöhe	(mm/a)
	$ET_a$	=	mittlere jährliche tatsächliche Evapotranspirationshöhe	(mm/a)
	$Q_D$	=	mittlere jährliche Direktabflusshöhe	(mm/a)

## 2.2 Wasserhaushaltsmodell mGROWA

Das Wasserhaushaltsmodell mGROWA wurde im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunktes „KLIMZUG“ (Herrmann et al., 2013; Herrmann et al., 2014a, b) sowie im Rahmen des EU-Projektes CLIMB „Climate induced changes on the Hydrology of Mediterranean Basins“ (Herrmann et al., 2016a; Ehlers et al., 2016) entwickelt und ist für einen Einsatz in großen Modellgebieten (Flusseinzugsgebiete, Bundesländer etc.) konzipiert. Im Sinne von Becker und Serban (1990) ist es ein deterministisches konzeptionelles rasterbasiertes flächendifferenziertes hydrologisches Bilanzmodell. Das mGROWA-Modell basiert auf der Berechnung der Wasserbilanz für jede Rasterzelle in täglicher Auflösung über mehrere Bodenschichten. Das Modell kann mit hoher räumlicher Auflösung betrieben werden (typischerweise Rasterzellengrößen von 100 m x 100 m).

mGROWA wird kontinuierlich weiterentwickelt und erweitert, z. B. zur Simulation der möglichen Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen (Herrmann et al., 2017a) und Nordrhein-Westfalen (Herrmann et al., 2021), zur Ausweisung der nachhaltig nutzbaren Grundwassermenge in Nordrhein-Westfalen (Herrmann et al., 2015) und Hamburg (Wolters und Wendland, 2021), zur Ermittlung des Beregnungsbedarfs in der Metropolregion Hamburg (Herrmann et al., 2016b) und deutschlandweit (McNamara et al., 2024), zur Simulation des Abflussgeschehens im alpinen Raum Sloweniens (Herrmann et al., 2017b), zur Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit in Deutschland (Tröltzsch et al., 2021) sowie im Hinblick auf die Ausweisung der relevanten Eintragspfade für Nährstoffe in Deutschland (Wolters et al., 2023; Zinnbauer et al., 2023) sowie in den Bundesländern Sachsen-Anhalt (Wolters et al., 2022), Hessen (Tetzlaff et al., 2023) und Rheinland-Pfalz (Wendland et al., 2021).

Als klimatischer Modellinput werden die Niederschlagssummen und die Summen der potenziellen Evapotranspiration über Gras in Form von Datenrastern in täglicher Auflösung benötigt. Diese Daten werden entweder schon als Rasterdatensätze in täglicher Auflösung bereitgestellt oder werden im Laufe der Vorprozessierung aus den in Datenrastern gespeicherten Monatssummen und den an Klimastationen beobachteten Zeitreihen der Tagessumme mit dem IDW-Verfahren (Shepard, 1968) interpoliert. Auf Basis dieser beider Größen berechnet das Modell mGROWA eine tägliche räumliche Verteilung des klimatischen Modellantriebs.

Im Modell mGROWA erfolgt die Simulation des Wasserhaushaltes in zwei Stufen (s. Abb. 2-2). In der prozessorientierten ersten Stufe wird in Tagesschritten die tatsächliche Evapotranspiration ( $et_a$ ) von der Erdoberfläche und die Abflussbildung in Form des Sickerwasserabflusses ( $q_p$ ) aus dem Boden flächendifferenziert simuliert. Die Berechnung erfolgt für die Oberflächentypen Boden mit Vegetation, versiegelte Fläche und freie Wasseroberfläche mit einer jeweils an die spezifische Wasserspeicherfähigkeit angepassten speziellen Simulationethodik (Speicherfunktionen) in Tagesschritten unter Berücksichtigung des für diesen Prozess zur Verfügung stehenden (gespeicherten) Wassers. Die Simulation des Bodenwasserhaushalts auf Flächen mit Vegetation erfolgt auf Basis des von Engel et al. (2012) entwickelten Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodells BOWAB. Für versiegelte Flächen und freie Wasseroberflächen werden in das mGROWA-Modell jeweils für die Abbildung der speziellen Speichercharakteristik dieser Flächen konzipierte Speicherfunktionen implementiert.

In der empirischen zweiten Stufe des mGROWA-Modells werden vom Gesamtabfluss zunächst der Oberflächenabfluss und der urbane Direktabfluss abgetrennt. Die sich hieraus ergebende Sickerwasserhöhe wird in Monatsschritten in die für die wasserwirtschaftliche Praxis relevanten unterirdischen Abflusskomponenten untergliedert (natürlicher Zwischenabfluss,

Abfluss über Dränagen und die Grundwasserneubildung). Letztere repräsentiert den Teil des Gesamtabflusses, der als Sickerwasser in den Aquifer infiltriert. Im langjährigen Mittel kann die Grundwasserneubildung dem langjährigen mittleren grundwasserbürtigen Abfluss (Basisabfluss) gleichgesetzt werden (DIN 4049-3, 1994).

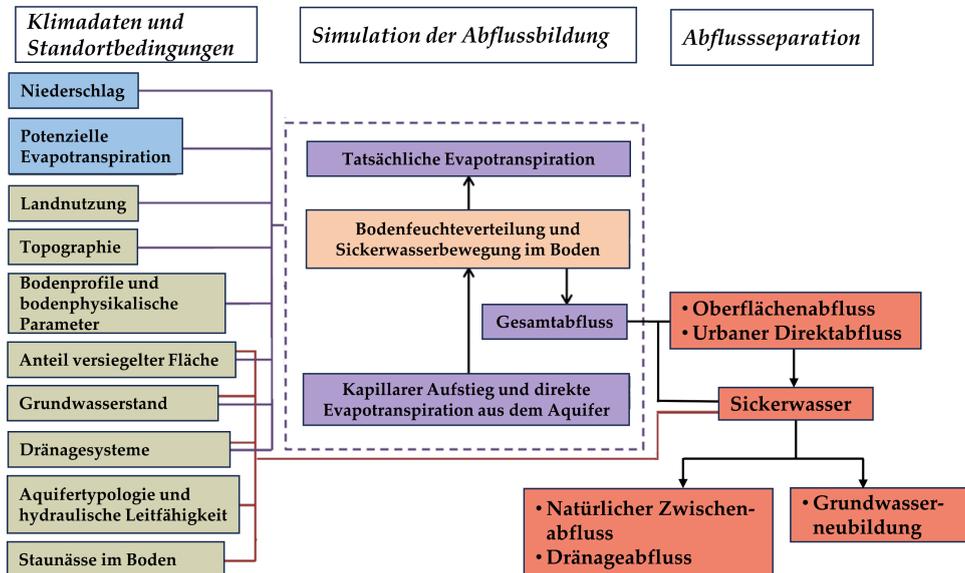


Abbildung 2-2: Modellkonzept des Wasserhaushaltsmodells mGROWA.

### 2.3 Berechnung der Gesamtabflusshöhe und der Sickerwasserhöhe

Die täglich durch die verschiedenen Prozesse des Wasserkreislaufs in einem diskreten Modellelement (Rasterzelle) bewegte Wassermenge wird durch die Wasserhaushaltsgleichung (Gl. 2-3) bilanziert:

$$\frac{ds}{dt} = p + q_{e,gw} - et_a - q_t \quad \text{Gl. 2-3}$$

Hierbei sind  $p$  der Niederschlag,  $q_{e,gw}$  der vertikale Zufluss in den Bilanzraum des Modellelements aus dem Grundwasser (kapillarer Aufstieg und direkte Evapotranspiration, wenn sich die untere Grenze des Wurzelraums mit dem Grundwasserspiegel überschneidet),  $et_a$  die landnutzungsspezifische tatsächliche Evapotranspiration,  $q_t$  der gesamte gebildete Abfluss von diesem Modellelement und  $ds/dt$  die Änderung der gespeicherten Wassermenge über die Zeit. Für den Fall eines Standortes mit Vegetation entspricht  $s$  dem Wassergehalt im Boden  $\theta$ , bei versiegelten Flächen entspricht der Speicher der Menge, die über dieser Versiegelung gespeichert werden kann.

Als wesentliche Größe der Wasserhaushaltsgleichung muss die landnutzungsspezifische tatsächliche Evapotranspiration flächendeckend berechnet werden. Im mGROWA-Modell erfolgt diese Berechnung für einzelne Tage auf Basis der sogenannten Gras-Referenzverdunstung  $et_o$ , eines landnutzungsspezifischen Verdunstungsfaktors  $k_{LN}$ , einer Funktion  $f(\beta, \gamma)$  zur Berücksichtigung der Hangexposition und -neigung sowie einer Speicherfunktion  $f(s)$  zur Berücksichtigung der für die Verdunstung zur Verfügung stehenden Wassermengen nach Gl. 2-4:

$$et_a = et_o \cdot k_{LN} \cdot f(\beta, \gamma) \cdot f(s)$$

Gl. 2-4

Die Gras-Referenzverdunstung wird mit Hilfe der Penman-Monteith-Gleichung berechnet (Monteith, 1965; Allen et al., 1998). Diese Gleichung bildet den physikalischen Prozess der Evapotranspiration auf Grundlage der meteorologischen Eingangsgrößen sowie standortspezifischer Oberflächen- und Pflanzenparameter ab (Albedo, aerodynamischer Verdunstungswiderstand, Bestandswiderstand). Für eine von den Referenzbedingungen abweichende Landoberfläche und die darauf befindliche abweichende Vegetation können mit Hilfe landnutzungsspezifischer Verdunstungsfaktoren ( $k_{LN}$ ) die entsprechenden Parameter der Penman-Monteith-Gleichung angepasst werden, sodass sich aus der Gras-Referenzverdunstung für beliebige Oberflächen eine tatsächliche Evapotranspiration ableiten lässt. Verdunstungsfaktoren für einzelne Feldfrüchte (z. B. Dommermuth und Trampf, 1991; DVWK, 1996; Allen et al., 1998; Engel et al., 2012) oder auch Landnutzungsklassen (z. B. ATV-DVWK, 2002) sind vielfach publiziert worden.

Bei der Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit Hilfe der Penman-Monteith-Gleichung wird eine ebene Landoberfläche vorausgesetzt. Allerdings erhalten Hangflächen, abhängig von ihrer Neigung und Exposition, einen veränderten Energieeintrag durch die einfallende Strahlung. Kunkel und Wendland (2002) haben zur Berücksichtigung dieses Effektes eine Korrekturfunktion (Gl. 2-5) auf Basis der Untersuchungen in Deutschland von Golf (1981) ermittelt (Abb. 2-3). Hierin sind  $\beta$  die Hangexposition gegenüber Nord und  $\gamma$  die Hangneigung (jeweils in  $^\circ$ ). Für Rasterzellen mit hoher Neigung werden untere und obere Grenzen von 0,4 und 1,8 gesetzt:

$$f(\beta, \gamma) = (1,605 \cdot 10^{-2} \cdot \sin(\beta - 90) - 2,5 \cdot 10^{-4}) \cdot \gamma + 1$$

Gl. 2-5

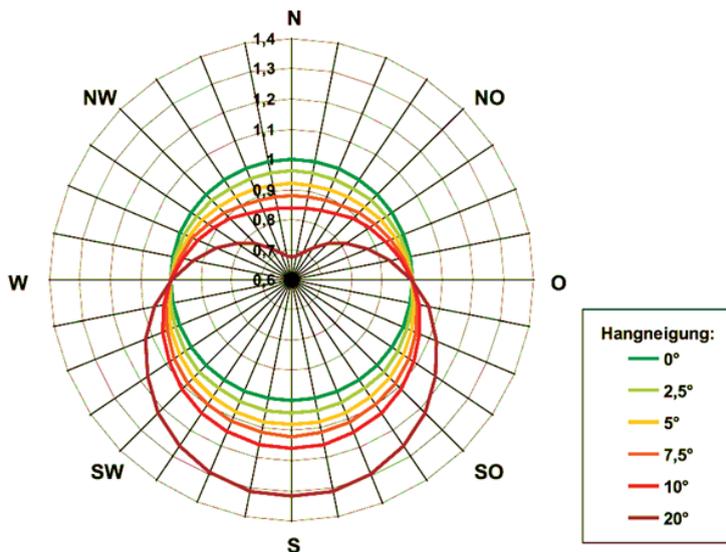


Abbildung 2-3: Funktionswerte der Korrekturfunktion in Abhängigkeit von der Topographie.

Mit dem letzten Faktor in Gl. 2-4 wird die für die Verdunstung zur Verfügung stehende Wassermenge berücksichtigt. Die Funktion  $f(s)$  ist für die verschiedenen Standorttypen:

- Standorte mit Vegetation,
- versiegelte Standorte und
- freie Wasseroberflächen

unterschiedlich definiert und wird in den nächsten Abschnitten erläutert.

### 2.3.1 Standorte mit Vegetation

Die Bilanzierung des Bodenwasserhaushalts auf Flächen mit Vegetation, und damit des für die Verdunstung zur Verfügung stehenden Wassers, erfolgt im mGROWA-Modell auf Basis der BOWAB-Methodik (Engel et al., 2012). Zur Simulation des Bodenwasserhaushalts wird für jede Zelle mit Vegetation ein 1-dimensionales Modell des Bodens auf Basis der in der vorliegenden Bodenkarte ausgewiesenen Bodenprofile erzeugt. Dieser Prozessschritt impliziert die vollständig automatisierte Gliederung der Rasterzellen in Schichten und die Zuweisung hydro-pedologischer Parameter (Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität etc.) an diese Schichten. Die Anzahl und die Mächtigkeit der Schichten können dabei frei gewählt werden, sollten sich jedoch an der maximalen Durchwurzelungstiefe der im Modellgebiet vorhandenen Vegetationsarten orientieren (für Schleswig-Holstein wurden 7 Schichten mit einer Mächtigkeit von je 30 cm bilanziert).

Abb. 2-4 zeigt ein Schema für die Übertragung von Parametern auf die einzelnen Modellschichten. Beispielhaft ist der Parameter effektive Feldkapazität dargestellt. Die in den Schichten angenommenen Werte entsprechen den gewichteten Mittelwerten der Bodenschichten über die Tiefe des Bodenprofils.

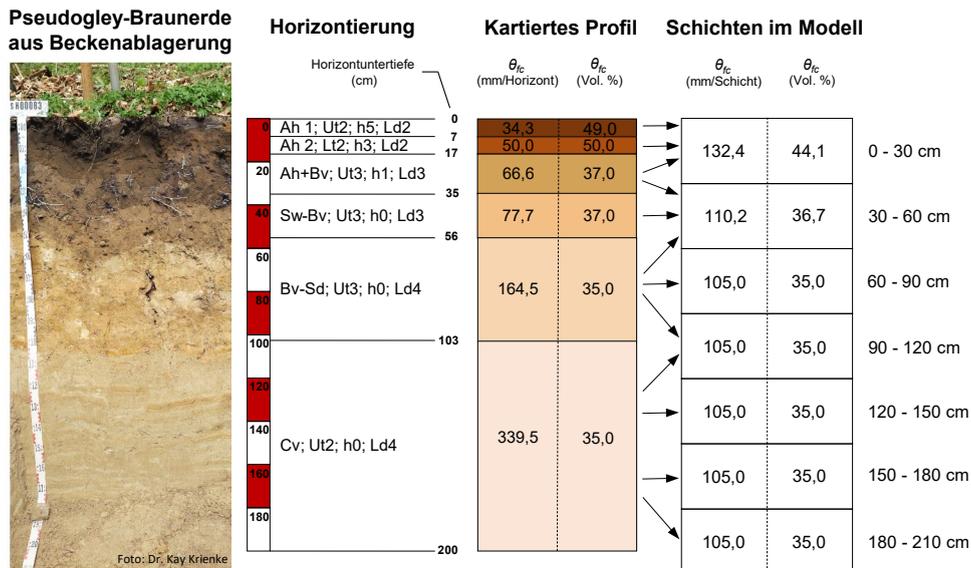


Abbildung 2-4: Beispiel zur Übertragung eines kartierten Bodenprofils auf die Schichten des mGROWA-Modells für die Variable Feldkapazität ( $\theta_{fc}$ ).

Mit jedem Zeitschritt (Tag)  $i$  verändert sich der Wassergehalt  $\theta$  in den bilanzierten Schichten  $k$  des Modells aufgrund von Niederschlagsereignissen und Verdunstung. Außerdem kann bei

entsprechend hohem Wassergehalt eine Sickerwasserbewegung  $q_p$  oder bei ausreichend geringem Wassergehalt auf grundwassernahen Standorten ein kapillarer Aufstieg  $q_{cr}$  einsetzen (die Berechnung dieser Bilanzgrößen wird im Folgenden noch erläutert). Aus den genannten Größen und dem Wassergehalt der Schichten am Beginn des Tages wird für alle Schichten ein neuer Wassergehalt für den Beginn des Folgetages berechnet. Für die oberste Schicht ( $k = 1$ ) lautet die Bilanzgleichung:

$$\theta_{i+1,1} = \theta_{i,1} + p_i - et_{a,i,1} - q_{p,i,1} + q_{cr,i,1} \quad \text{Gl. 2-6}$$

und für alle darunter befindlichen Schichten:

$$\theta_{i+1,k} = \theta_{i,k} - et_{a,i,k} + q_{p,i,k-1} - q_{p,i,k} + q_{cr,i,k} - q_{cr,i,k-1} \quad \text{Gl. 2-7}$$

Die Berechnung der Sickerwasserbewegung erfolgt nach dem Konzept eines einfachen Überlaufmodells. Die Sickerwasserrate aus der untersten bilanzierten Schicht wird als Gesamtabfluss von dieser Rasterzelle angesehen.

Die tatsächliche Evapotranspiration auf Standorten mit Vegetation ist zum einen abhängig vom Wassergehalt im Boden und von der Stärke der Wasserbindung an die Bodenmatrix. Sie ist zum anderen auch abhängig vom Tiefenbereich, den die Vegetation über ihr Wurzelsystem für die Wasseraufnahme erschlossen hat. Für jede Rasterzelle mit Vegetation ergibt sich die tägliche tatsächliche Evapotranspiration aus der Summe der Wassermengen, die jede Modellschicht  $k$  zum Prozess beiträgt:

$$et_{a,i} = \sum_{k=1}^{n_{lay}} et_{a,i,k} \quad \text{Gl. 2-8}$$

Die Anteile einzelner Schichten an der gesamten tatsächlichen Evapotranspiration eines Monats werden auf der Grundlage der Anzahl der Schichten, in die die Wurzeln einer Landbedeckung hineinragen, und des pflanzenverfügbaren Wassers in jeder dieser entsprechenden Schichten gewichtet. In Tabelle 2-1 ist ein Beispiel für die Ausschöpfungstiefen für ackerbauliche Nutzung im Laufe eines Jahres dargestellt, wobei eine farbliche hervorgehobene Zelle bedeutet, dass Evapotranspiration aus dieser Schicht modelliert werden kann. Die Ausschöpfungstiefen wurden für die vorliegenden Landnutzungstypen unabhängig vom Bodenprofil in Anlehnung an die in ATV-DVWK (2002) angegebenen Durchwurzelungstiefen festgelegt.

*Tabelle 2-1: Beispiel für die monatliche Ausschöpfungstiefe für Ackerland in Anlehnung an ATV-DVWK (2002).*

Schicht in cm	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0 – 30												
30 – 60												
60 – 90												
90 – 120												
120 – 150												
150 – 180												
180 – 210												

Der Prozess der Wasseraufnahme ist vom Wassergehalt und dessen Pflanzenverfügbarkeit in den einzelnen Schichten abhängig. Mit abnehmender Bodenfeuchte sinkt auch die Transpirationsleistung der Vegetation. Der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Transpirationsleistung wird im mGROWA-Modell durch die Disse-Funktion (Disse, 1995) schichtbezogen beschrieben (Gl. 2-9):

$$R_{Disse,i,k} = \frac{1 - e^{-r \frac{\theta_{i,k} - \theta_{pwp,k}}{\theta_{a,k}}}}{1 + e^{-r \frac{\theta_{i,k} - \theta_{pwp,k}}{\theta_{a,k}}} - 2 \cdot e^{-r}} \quad \text{Gl. 2-9}$$

Hierin ist  $e$  die Eulersche Zahl,  $r$  ein pflanzenspezifischer Faktor,  $\theta_a$  der pflanzennutzbare Teil des Wassergehalts bei Feldkapazität (entspricht der nutzbaren Feldkapazität) und  $\theta_{pwp}$  der Wassergehalt am permanenten Welkepunkt. Für Flächen mit Vegetation wird durch die Disse-Funktion die Funktion  $f(s)$  aus Gl. 2-4 für die Fälle spezifiziert, in denen die für die Verdunstung zur Verfügung stehenden Wassermengen einen signifikanten Einfluss auf die gesamte Evapotranspiration haben (Gl. 2-10). Dies ist beispielsweise der Fall, wenn der Wassergehalt einer Schicht unter einen kritischen Wassergehalt  $\theta_{crit}$  fällt. Der kritische Wassergehalt variiert für verschiedene Bodengruppen. Für Sandböden ist  $\theta_{crit} = 0,5 \cdot \theta_a$ , für alle übrigen Böden  $\theta_{crit} = 0,6 \cdot \theta_a$ .

$$f(s_{i,k}) = \begin{cases} 1, & k = 1 \text{ und } p_i > et_{o,i} \cdot k_{LN} \cdot f(\beta, \gamma) \\ 1, & R_{Disse,i,k} > 1 \\ 0, & R_{Disse,i,k} < 0 \\ 1, & \theta_{i,k} > \theta_{crit} \\ R_{Disse,i,k}, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Gl. 2-10}$$

Nach der Bestimmung der Werte  $f(s_{i,k})$  für jede Schicht wird die Gewichtung, wie viel Wasser aus jeder der modellierten Schichten entnommen wird, gemäß Gl. 2-11 berechnet.

$$u_{i,k} = \frac{f(s_{i,k})}{\sum_{k=1}^{n_{lay,aus}} f(s_{i,k})} \quad \text{Gl. 2-11}$$

Für die Berechnung der tatsächlichen Evapotranspiration aus den einzelnen Modellschichten werden für die oberste Modellschicht die Gl. 2-12 und die tiefen liegenden Schichten die Gl. 2-13 verwendet. In Gl. 2-12 ist die Interzeptionsverdunstung, d. h. die Verdunstung des Niederschlagsanteils, der von der Vegetation aufgefangen, vorübergehend gespeichert und von den Pflanzenoberflächen in die Atmosphäre zurückgelangt ohne den Erdboden zu erreichen, implizit enthalten.

$$et_{a,i,1} = (p_i - (p_i - et_{o,i} \cdot k_{LN} \cdot f(\beta, \gamma)) \cdot f(s_{i,k})) \cdot u_{i,k} \quad \text{Gl. 2-12}$$

$$et_{a,i,k} = et_{o,i} \cdot k_{LN} \cdot f(\beta, \gamma) \cdot f(s_{i,k}) \cdot u_{i,k} \quad \text{Gl. 2-13}$$

Zwischen den Modellschichten und aus der Bodensäule heraus nach unten kann in zwei Fällen eine Sickerwasserbewegung einsetzen. Wenn der Wassergehalt einer Schicht den Wassergehalt bei Feldkapazität übersteigt, kann die betreffende Schicht das überschüssige Wasser nicht mehr gegen die Schwerkraft halten. Das Wasser sickert in die nächst tiefer liegende Schicht ein. In Aufsättigungsphasen kann bereits vor Erreichen der Feldkapazität eine Sickerwasserbewegung  $q_{pp}$  z. B. auf präferentiellen Fließwegen einsetzen (Jarvis et al., 2016). Um diesen Prozess zu berücksichtigen, wurde in der BOWAB-Methodik (Engel et al., 2012) festgelegt, dass der Wassergehalt am Beginn des Tages über einem Schwellenwert und über dem Wassergehalt am Beginn des Vortages liegen muss (Gl. 2-14):

$$q_{p,i,k} = \begin{cases} \theta_{i,k} - \theta_{fc,k}, & \theta_{i,k} > \theta_{fc,k} \\ q_{pp,k}, & \theta_{i,k} \leq \theta_{fc,k} \text{ und } \theta_{i,k} \geq \theta_{i-1,k} \text{ und } \theta_{i,k} > \theta_{crit} + \theta_{pwp} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Gl. 2-14}$$

Die Berechnung der Sickerwassermenge  $q_{pp}$  beruht auf der in den Bodenparametern angegebenen Bodengruppe. In Gl. 2-14 ist  $\theta_{fc}$  der Wassergehalt des Bodens bei Feldkapazität.

Die Sickerwasserrate  $q_{pp}$ , die vor Erreichen der Feldkapazität entstehen kann, ist abhängig von der Bodengruppe und nimmt mit zunehmender Tiefe ab (Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Sickerwasserrate vor Erreichen der Feldkapazität nach Bodenart (Engel et al., 2012).

Tiefenbereich in cm	$q_{pp}$ in mm/d	
	Sandböden	Alle übrigen Bodenarten
0 – 30	2,0	1,2
30 – 60	1,2	0,8
> 60	0,8	0,5

In einigen Regionen von Schleswig-Holstein sind die Flurabstände zum Grundwasser gering (< 3 m). Dies kann bei ausreichendem Wasserdefizit im Boden einen kapillaren Aufstieg von Wasser aus dem Grundwasserleiter in die durchwurzelte Bodenzone zur Folge haben oder es kann, wenn sich die untere Grenze des Wurzelraums mit dem Grundwasserspiegel überschneidet, eine direkte Verdunstung aus dem Grundwasser auftreten. Dieses kapillar aufsteigende Wasser bzw. die direkte Evapotranspiration aus dem Grundwasser stellt eine Grundwasserzehrung dar und wird ebenso bilanziert.

Im mGROWA-Modell ist der Grundwasserstand im Boden eine Randbedingung für Rasterzellen mit Grundwasserbeeinflussung und wird variabel als Jahresgang in Monatsschritten vorgegeben. Abb. 2-5 zeigt schematisch die mit dem Jahresgang des Grundwasserstandes im Boden in Verbindung stehenden Prozesse. Eine Sickerwasserbewegung in Richtung der Grundwasseroberfläche kann ganzjährig erfolgen, wenn dies aufgrund der Bodensättigung möglich ist. Wenn temporär oder ganzjährig der Wurzelraum in das Grundwasser hineinragt, erfolgt ein Teil der Evapotranspiration direkt aus dem Grundwasser. Für den Fall tiefer liegenden Grundwassers kann ein kapillarer Aufstieg in die Wurzelzone stattfinden.

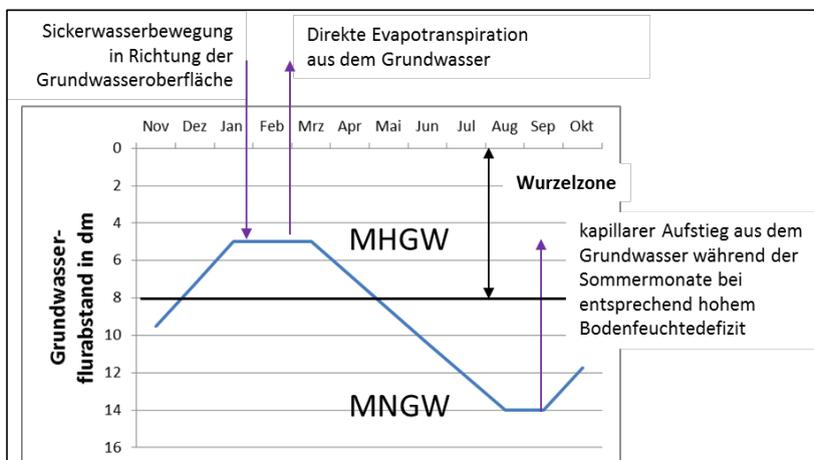


Abbildung 2-5: Beispielhafte, schematische Darstellung des „natürlichen“ Jahresganges des Grundwassers sowie der in diesem Zusammenhang mit mGROWA simulierten Prozesse. MHGW – mittlerer Hochstand des Grundwassers im Boden; MNGW – mittlerer Niedrigstand des Grundwassers im Boden.

Bei grundwasserbeeinflussten Rasterzellen, in denen eine Dränage installiert ist, wird die natürliche Variation des Grundwasserstandes im Boden durch das Vorhandensein der Dränage und deren Tiefe verändert (Abb. 2-6). In diesem Fall wird das Dränsystem in den Monaten

aktiviert, in denen die Dräntiefe tiefer als der natürliche Grundwasserstand im Boden liegt. Wenn dies geschieht, wird das in diese Tiefe gelangende Sickerwasser als Dränabfluss modelliert, und in den Monaten, in denen die Dränage nicht aktiviert ist, trägt das Sickerwasser zur Grundwasserneubildung bei.

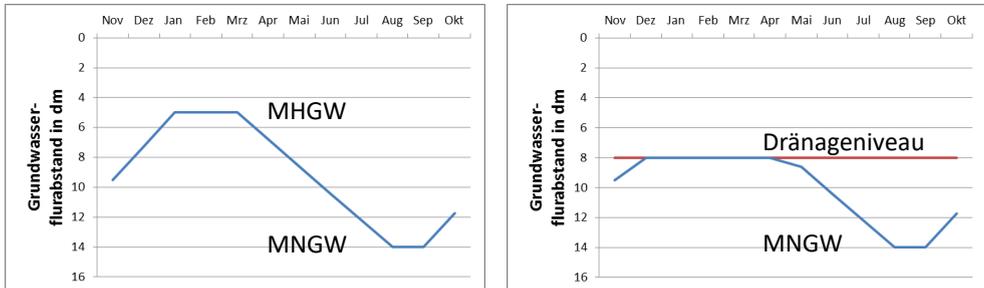


Abbildung 2-6: Beispielhafte, schematische Darstellung des variablen Grundwasserflurabstandes in Verbindung mit Dränagen (rechts). MHGW – mittlerer Hochstand des Grundwassers im Boden; MNGW – mittlerer Niedrigstand des Grundwassers im Boden.

Für den Abstand  $z_a$  zwischen Grundwasseroberfläche und der Untergrenze der entsprechenden Modellschicht muss für grundwasserbeeinflusste Rasterzellen bei gegebener Bodenart ein kapillarer Aufstieg möglich sein. Die für den jeweiligen Tag dann potenziell mögliche kapillare Aufstiegsrate  $q_{cr,pot,k}(z_a)$  wird Tabellenwerken entnommen (Renger et al., 2009; Müller und Waldeck, 2011). Bei dieser Vorgehensweise ist eine Umrechnung des Wassergehaltes einer Schicht in eine Wasserspannung  $h$  notwendig. Diese wird mit Hilfe der von van Genuchten (1980) angegebenen Funktion (Gl. 2-15) durchgeführt:

$$|h_{i,k}| = \frac{\left[ \left( \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_{i,k} - \theta_r} \right)^{\frac{n}{n-1}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \quad \text{Gl. 2-15}$$

Die Parameter  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $n$  und  $\alpha$  dieses sogenannten van Genuchten-Mualem Modells liegen ebenfalls für eine Vielzahl Bodenarten tabelliert vor (z. B. in Barth, 2003; Schindler et al., 2004; Schwärzel et al., 2006; Renger et al., 2009; Vereecken et al., 2010; Müller und Waldeck, 2011). Die potenziell mögliche kapillare Aufstiegsrate  $q_{cr,pot,k}(z_a)$  je nach Bodenart wird aus der oben zitierten Literatur übernommen. In Tabelle 2-3 ist dies beispielhaft für die Bodenart mittelsandiger Feinsand (fSms) dargestellt.

Tabelle 2-3: Beispiel für tabellierte kapillare Aufstiegsraten in mm/d (aus Müller und Waldeck, 2011).

Bodenart	Abstand $z_a$ zwischen der Grundwasseroberfläche und der Untergrenze der bilanzierten Schicht in dm												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
fSms	> 5	> 5	> 5	> 5	> 5	3	1,5	0,7	0,3	0,15	0,1	< 0,1	0

In Abhängigkeit vom vorhandenen Wasserdefizit wird die tatsächlich kapillar aufsteigende Wassermenge abgeschätzt (Gl. 2-16).

$$q_{cr,i,k} = \begin{cases} q_{cr,pot,k}(z_a), & |h_{i,k}| > |h_{tab}| \text{ und } \theta_{fc,k} - \theta_{i,k} \geq q_{cr,pot,k}(z_a) \\ \theta_{fc,k} - \theta_{i,k}, & |h_{i,k}| > |h_{tab}| \text{ und } \theta_{fc,k} - \theta_{i,k} < q_{cr,pot,k}(z_a) \\ 0, & q_{cr,pot,k}(z_a) < 0.1 \end{cases} \quad \text{Gl. 2-16}$$

In mGROWA wird zusätzlich eine direkte Verdunstung aus dem Grundwasser ( $q_{dir,e,gw}$ ) zu der Zeit, in der der Grundwasserspiegel sich in der Wurzelzone einer entsprechenden Landbedeckung befindet, modelliert (s. Abb. 2-5). Die Summe der kapillar aufsteigenden Wassermenge aus dem Grundwasser und der direkten Verdunstung aus dem Grundwasser entspricht im mGROWA-Modell der dem Modellelement vertikal zufließenden Wassermenge in den Bilanzraum (Gl. 2-17).

$$q_{e,gw} = q_{cr} + q_{dir,e,gw} \quad \text{Gl. 2-17}$$

Für Schleswig-Holstein wurden 7 Bodenschichten mit jeweils 30 cm Mächtigkeit modelliert. Abb. 2-7 fasst die sich mit jedem Zeitschritt  $i$  (Tag) verändernden Wassergehalte  $\theta$  in den bilanzierten Schichten  $k$  des Modells aufgrund von Niederschlagsereignissen und Verdunstung zusammen. Es kann bei entsprechend hohem Wassergehalt eine Sickerwasserbewegung ( $q_p$ ) einsetzen. Das Beispiel zeigt eine Rasterzelle ohne Grundwasserbeeinflussung.

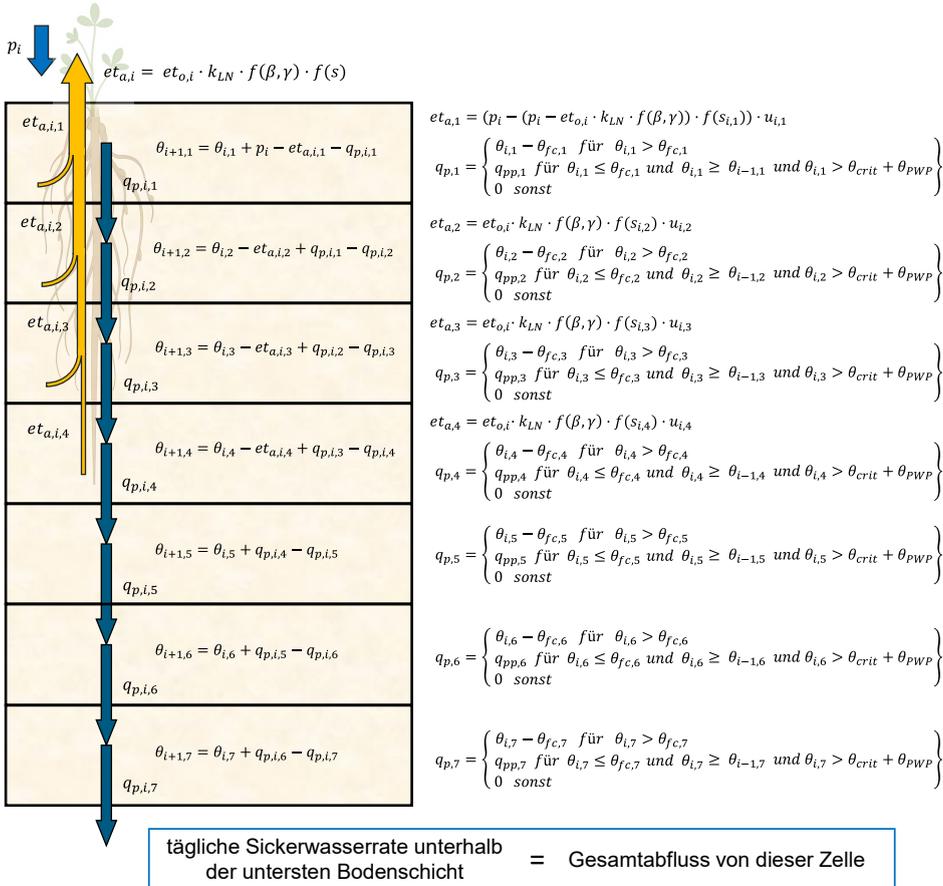
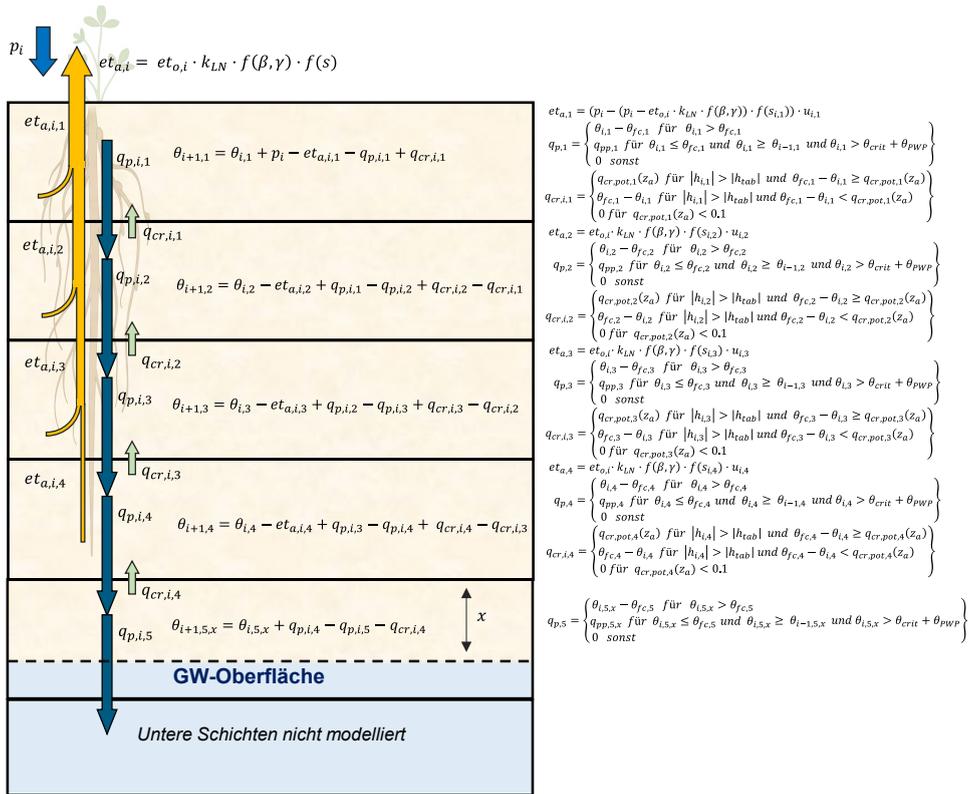


Abbildung 2-7: Modellierung der Wasserbewegungen zwischen den Bodenschichten im Modell mGROWA. Das Beispiel zeigt eine nicht grundwasserbeeinflusste Rasterzelle mit einer Vegetation, deren Ausschöpfungstiefe in die vierte modellierte Schicht für den vorgestellten Zeitschritt hineinragt. Die schichtweise angegebenen Gleichungen sind in diesem Kapitel erläutert.

Bei grundwasserbeeinflussten Rasterzellen wird als tiefste Schicht diejenige modelliert, die der Tiefe der Grundwasseroberfläche im Monat entspricht. Abb. 2-8 zeigt ein Beispiel für den Modellierungsprozess für einen Tag für eine grundwasserbeeinflusste Rasterzelle. Im Gegensatz zu Abb. 2-7 wird nun auch der kapillare Aufstieg ( $q_{ct}$ ) mit eingerechnet. Für den Fall, dass die Wurzeltiefe bis unter die Grundwasseroberfläche reichen würde, wird zusätzlich die Komponente  $q_{dir,e,gw}$  berücksichtigt.



tägliche Sickerwasserrate unterhalb der untersten modellierten Bodenschicht = Grundwasserneubildung und/oder Drainageabfluss

Abbildung 2-8: Modellierung der Wasserbewegungen zwischen den Bodenschichten im Modell mGROWA. Das Beispiel ist für eine grundwasserbeeinflusste Rasterzelle mit einer Vegetation, deren Ausschöpfungstiefe in die vierte modellierte Schicht für den vorgestellten Zeitschritt hineinragt. Die schichtweise angegebenen Gleichungen sind in diesem Kapitel erläutert.

### 2.3.2 Versiegelte Standorte

Auf den versiegelten Flächen der urbanen Räume - z. B. Asphaltflächen, Dachflächen mit Entwässerung, Straßenpflaster - ist der Betrag der tatsächlichen Evapotranspiration ebenfalls abhängig von der zur Verfügung stehenden Wassermenge. Zu beachten ist, dass hier alle versiegelten Flächen (z. B. auch die außerhalb von städtischen Gebieten) unter dem Begriff „urbane Flächen“ betrachtet werden. Im Gegensatz zum Boden kann von den versiegelten Flächen jedoch nur das Wasser verdunsten, welches auf der Oberfläche auch gespeichert werden kann. Auf typischen versiegelten Flächen urbaner Räume kann etwa 1 mm Regenwasser gespeichert werden (abgeleitet aus Untersuchungen von Wessolek und Facklam, 1997). Der Anteil des Niederschlages, der nicht gespeichert werden kann, fließt ab.

Für die Ermittlung der tatsächlichen Evapotranspiration für Rasterzellen mit versiegelten Flächen wird für jede modellierte Rasterzelle der Anteil (in %) der versiegelten Flächen als Eingabe angegeben. Dadurch können viele Kombinationen aus individuellem Versiegelungsgrad sowie Landnutzungs- und Vegetationstypen berücksichtigt werden. Auf den einzelnen Rasterzellen werden dann die mit der jeweiligen speziellen Simulationsmethodik einzeln berechneten

Wasserhaushaltsgrößen mit Hilfe des individuellen Versiegelungsgrades zusammengesetzt. Der auf dem versiegelten Anteil gebildete urbane Direktabfluss  $q_u$  wird separat bilanziert und in der Abflusseparation weiterverarbeitet. Im Modell mGROWA wird demzufolge auf urbanen Flächen der Verdunstungsprozess mit Hilfe von zwei unterschiedlich definierten Speicherfunktionen simuliert und nachfolgend die resultierende Wasserbilanz für die entsprechenden Rasterzellen anhand des durch den Versiegelungsgrad vorgegebenen Flächenverhältnisses ermittelt.

## 2.4 Wasserhaushaltssimulation auf freien Wasseroberflächen

Oberflächengewässer (z. B. Seen, Flussläufe) haben freie Wasseroberflächen, von denen für den Evaporationsprozess immer ausreichend Wasser zur Verfügung steht. Die Speicherfunktion in Gl. 2-4 ist für freie Wasseroberflächen als  $f(s) = 1$  definiert. Die Korrekturfunktion  $f(\beta, \gamma)$  nimmt ebenfalls den Wert 1 an, was dazu führt, dass die Evaporation nur durch die atmosphärischen Bedingungen gesteuert wird. Bei einer auf Pegelinzugsgebiete bezogenen Bilanzierung des Gesamtabflusses ist die Wasserbilanz der freien Wasseroberfläche von Oberflächengewässern für die entsprechenden Rasterzellen des Modellgebietes nach Gl. 2-18 einzubeziehen. Für die als freie Wasseroberflächen ausgewiesenen Rasterzellen wird in mGROWA keine Modellierung der Grundwasserneubildung durchgeführt.

$$q_n = p - et_a \quad \text{Gl. 2-18}$$

## 2.5 Ausweisung des Oberflächenabflusses und der Sickerwasserhöhe

Das Auftreten von Oberflächenabfluss ist im Allgemeinen an Starkregenereignisse gebunden und auf stark reliefierte Regionen beschränkt. Aus diesem Grund erfolgt die Ermittlung des Oberflächenabflusses zur Hochwasservorhersage in der Regel mit zeitlich sehr hoch aufgelösten (z. B. stündlichen) Modellen, wie z. B. SWMM (Huber et al., 1988) und MIKE FLOOD (DHI Group, 2023). Bei der Wasserhaushaltsmodellierung mit dem mGROWA-Modell ist der Einsatz solcher Berechnungsansätze nicht praktikabel. Stattdessen kommen vereinfachte Ansätze zur Anwendung, bei dem die im langjährigen Mittel zu erwartenden Oberflächenabflusshöhen ausgewiesen werden. Nach US Soil Conservation Service (1972) wird die Höhe des Oberflächenabflusses als von der Niederschlagshöhe abhängiger Anteil an der Gesamtabflusshöhe berechnet. In Lockergesteinsregionen ohne Staunässe- und Grundwasserbeeinflussung sowie ohne Drainageeinfluss ergibt sich die Oberflächenabflusshöhe in Abhängigkeit vom Gesamtabfluss und der Hangneigung (Wolters et al., 2023).

Ob und in welchem Umfang der auf einer Rasterzelle gebildete Oberflächenabfluss ein Oberflächengewässer erreicht, hängt von einer Reihe weiterer Einflussfaktoren ab. Hierzu zählen z. B. die Landnutzung, die Hangneigung und vor allem die Anbindung der Einzelflächen an das Gewässernetz. Als Rasterzellen mit Oberflächenabfluss werden bei der Modellierung daher nur die Rasterzellen mit Oberflächenabflussbildung ausgewiesen, die eine direkte Anbindung an ein Oberflächengewässer haben. Für diese Flächen ergibt sich die Sickerwasserrate aus der Differenz von Gesamt- und Oberflächenabfluss bzw. urbanem Direktabfluss:

$$Q_p = Q_t - Q_o - Q_u \quad \text{Gl. 2-19}$$

mit:	$Q_p$	=	mittlere jährliche Sickerwasserhöhe	(mm/a)
	$Q_t$	=	mittlere jährliche Gesamtabflusshöhe	(mm/a)
	$Q_o$	=	mittlere jährliche Oberflächenabflusshöhe	(mm/a)
	$Q_u$	=	mittlere jährliche urbane Direktabflusshöhe	(mm/a)

Für die übrigen Flächen entspricht die Sickerwasserhöhe der ausgewiesenen Gesamtabflusshöhe minus der urbanen Direktabflusshöhe.

## 2.6 Separation von Grundwasserneubildung, natürlichem Zwischenabfluss und Dränabfluss

Die in den Boden einsickernden Abflussanteile gelangen als natürlicher Zwischenabfluss, Drainageabfluss oder als Grundwasserabfluss in die Oberflächengewässer. Die Separation in die Komponenten des unterirdischen Direktabflusses und in die Grundwasserneubildung (Zugang von infiltriertem Wasser durch den Sickerraum zum Grundwasser; DIN 4049-3, 1994) erfolgt auf der Grundlage des in Abb. 2-9 dargestellten Entscheidungsbaums. Es wird ein hierarchischer Ansatz verwendet, bei dem jeweils nur eine Gebietskenngröße als bestimmend für die Abflussseparation angesehen wird. Weitere Parameter werden erst dann betrachtet, wenn die primäre Gebietskenngröße nicht relevant ist.

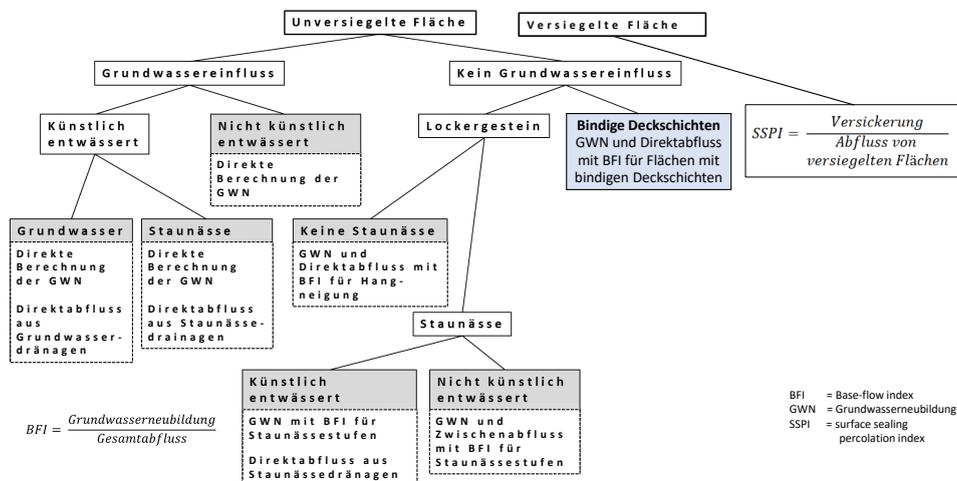


Abbildung 2-9: An die Standortbedingungen in Schleswig-Holstein angepasstes hierarchisches Vorgehen bei der Abflussseparation im mGROWA-Modell.

Im mGROWA-Modell wird zwischen Netto- und Brutto-Werten für den Gesamtabfluss und die Grundwasserneubildung unterschieden. Für alle Landflächen ohne Grundwassereinfluss sind die Netto- und Brutto-Werte identisch. Bei Rasterzellen mit Grundwassereinfluss beziehen sich die Nettowerte auf den gesamten erzeugten Gesamtabfluss (bzw. die gesamte erzeugte Grundwasserneubildung) abzüglich der dem Modellelement vertikal zufließenden Wassermenge in den Bilanzraum aus dem Grundwasser. Die Bruttowerte beziehen sich bei Rasterzellen mit Grundwassereinfluss dagegen auf die gesamte erzeugte Abflussmenge (bzw. Grundwasserneubildung) ohne die dem Modellelement vertikal zufließende Wassermenge in den Bilanzraum aus dem Grundwasser. Die Gl. 2-20 zeigt das Verhältnis zwischen dem Netto-Gesamtabfluss ( $q_n$ ) und dem Brutto-Gesamtabfluss ( $q_t$ ), während Gl. 2-21 das Verhältnis zwischen der Netto-Grundwasserneubildung ( $q_{rn}$ ) und der Brutto-Grundwasserneubildung ( $q_r$ ) zeigt.

$$q_n = q_t - q_{e,gw} \quad \text{Gl. 2-20}$$

$$q_{rn} = q_r - q_{e,gw} \quad \text{Gl. 2-21}$$

Für jede Rasterzelle prüft das Modell zunächst, ob eine Versiegelung vorliegt. In diesem Fall wird der generierte Abfluss über den versiegelten Anteil der Rasterzelle in den direkten Abfluss von urbanen Flächen, d. h. den Anteil des Abflusses, der über die Regenwasserkanalisation abgeleitet wird, und den Anteil, der in den Boden infiltriert, unterteilt (vgl. Kap. 2.3.2).

Nicht alle im Modell als versiegelt abgebildeten Flächen verfügen über eine solche Anbindung. Das abfließende Wasser versickert beispielsweise dann an anderer Stelle, da nicht alle Flächen hydraulisch so dicht sind, dass unter ihnen keine Sickerwasserbewegung stattfinden kann. Um diesen Sachverhalt zu berücksichtigen, sind sogenannte SSPI-Werte (engl. surface sealing percolation index) in die Abflusseparation eingeführt worden, mit denen auf versiegelten Flächen abhängig vom Versiegelungsgrad der gebildete Abfluss in den urbanen Direktabfluss und einen unterirdisch abfließenden Anteil aufgespalten wird. Dieser unterirdisch abfließende Anteil wird gemeinsam mit dem auf dem unversiegelten Anteil einer Rasterzelle gebildeten Abfluss in die Grundwasserneubildung und weitere unterirdische Direktabflusskomponenten (Dränageabfluss, natürlicher Zwischenabfluss) separiert. Die unterirdisch unter den versiegelten Teilflächen versickernde Wassermenge wird gemeinsam mit den Sickerwassermengen, die die unterste Modellschicht der unversiegelten Teilfläche verlassen, als Sickerwasserrate bilanziert.

Bei unversiegelten Flächen wird zunächst geprüft, ob der Boden grundwasserbeeinflusst ist. Für Rasterzellen mit einer Grundwasserbeeinflussung wird dann geprüft, ob eine künstliche Entwässerung zu erwarten ist. In diesem Fall steuern die Einbautiefe der landwirtschaftlichen Dränagen und der monatlich schwankende Grundwasserspiegel im Boden direkt die Aufteilung des Sickerwassers in Dränageabfluss und Grundwasserneubildung (vgl. Abb. 2-6). Dränageabflüsse entstehen ausschließlich in dem Zeitraum, in dem der Grundwasserspiegel über die Einbautiefe der Dränagesysteme gestiegen ist.

Bei Rasterzellen mit einer Grundwasserbeeinflussung und ohne künstliche Entwässerung erreicht das Sickerwasser direkt die Grundwasseroberfläche und wird somit per Definition zur Grundwasserneubildung. Aufgrund des Kapillaraufstiegs und der direkten Evapotranspiration aus dem Grundwasser kann es an diesen Standorten vor allem in den Sommermonaten dazu kommen, dass die verdunstete Wassermenge aus dem Grundwasser die Grundwasserneubildung übersteigt. Man spricht in diesem Falle von einer Grundwasserzehrung.

Bei Lockergesteinen ohne Grundwasserbeeinflussung werden die Staunässeigenschaften des Bodens und die Neigung berücksichtigt. Für Standorte mit Staunässe werden BFI-Werte (Verhältnis von Basisabfluss zu Gesamtabfluss) verwendet, die den Gesamtabfluss in Anteile von Dränageabfluss und Grundwasserneubildung aufteilen, abhängig von der Staunässeklasse des Bodens und dem Vorhandensein von Dränagen. Für Standorte mit Lockergestein und ohne Staunässe- oder Grundwasserbeeinflussung werden BFI-Werte verwendet, um den Gesamtabfluss in Grundwasserneubildung und Oberflächenabfluss zu trennen, sofern eine Gewässeranbindung vorliegt (s. Kap. 2.5).

Dem BFI-Konzept liegt die Annahme zu Grunde, dass das Verhältnis von Basisabfluss zu Gesamtabfluss als Mehrjahreswert weitgehend unabhängig von der kurzfristigen Witterungs- und Abflussdynamik ist und primär von zeitlich vergleichsweise invarianten Einflussfaktoren wie Hydrogeologie oder Relief geprägt wird (Arbeitskreis KLIWA, 2012). Die Methodik und Verwendung von BFI-Werten kann Haberlandt et al. (2001), Bogena et al. (2003), Wendland et al. (2010) oder Herrmann et al. (2014b) entnommen werden:

$$Q_r = BFI \cdot Q_t \quad \text{Gl. 2-22}$$

mit:	$Q_r$	=	mittlere jährliche Brutto-Grundwasserneubildung	(mm/a)
	BFI	=	Basisabflussanteil ( <i>Base-Flow-Index</i> )	(-)
	$Q_t$	=	mittlerer jährlicher Gesamtabfluss	(mm/a)

Der BFI kann theoretisch Werte zwischen 0 und 1 annehmen und ist ein Maß für das Wasseraufnahmevermögen eines Grundwasserleiters. Dabei bedeutet ein Wert von 0, dass ein Grundwasserleiter kein versickerndes Wasser aufnehmen kann, während ein Wert von 1 bedeutet, dass das gesamte Sickerwasser vom Grundwasserleiter aufgenommen werden kann.

Für Rasterzellen, die weder Grundwassereinfluss noch Staunässeinfluss aufweisen, werden neigungsabhängige BFI-Werte eingesetzt, die den Gesamtabfluss in natürlichen Zwischenabfluss und Grundwasserneubildung aufteilen, sofern keine Gewässeranbindung vorliegt und dadurch Oberflächenabfluss berechnet wurde (s. o.).

### Separationsmethode für Regionen mit mächtigen bindigen Deckschichten

Nahezu der gesamte östliche Landesteil von Schleswig-Holstein wird durch die pleistozäne Jungmoränenlandschaft des Östlichen Hügellandes eingenommen. Die westliche und südwestliche Verbreitungsgrenze der Jungmoränen zeichnet etwa die maximale Ausdehnung der Weichsel-Vereisung nach. Die weichselzeitlichen Jungmoränen sind kleinräumig durch einen inhomogenen Schichtaufbau gekennzeichnet, der durch glazitektonische Vorgänge wie Stauung und Verschuppung entstanden ist (Beer et al., 2016).

Im Östlichen Hügelland ist der Geschiebemergel das am weitesten verbreitete hochglaziale, oberflächennahe Ausgangsgestein des Bodens (Burbaum & Filipinski, 2012). Dieser Geschiebemergel enthält alle Korngrößen von Blöcken und Steinen über Kiese und Sande bis zu den Schluffen und Tonen. Die Geschiebemergel des Östlichen Hügellandes entsprechen in der Regel den Bodenarten Ls4 oder Ls3 des Bodenartendreiecks der Bodenkundlichen Kartieranleitung. (17-25 % Ton, 15-40 % Schluff) und weisen Trockenrohdichten um  $1,7 \text{ g/cm}^3$  auf (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Damit ergeben sich mittlere gesättigte Leitfähigkeiten im Bereich der Bodenbildung um 10 cm pro Tag. In tiefer liegenden Geschiebemergeln ist aufgrund fehlender Bodenbildung (Gefügebildung, Regenwurmaktivität etc.) von noch kompakteren Geschiebemergeln mit entsprechend geringeren Leitfähigkeiten auszugehen.

Die Gebiete mit Geschiebemergel (im Folgenden als „bindige Deckschichten“ bezeichnet) bilden im Östlichen Hügelland ein komplexes hydrogeologisches System, in dem die Durchlässigkeiten kleinräumig stark wechseln können. Großräumig betrachtet ist aber für weite Bereiche der weichselzeitlichen Jungmoränen ein ausgeprägter hydrogeologischer Stockwerksbau charakteristisch, bei dem die bindigen Deckschichten meist Mächtigkeiten von mehreren zehner Metern erreichen und den wasserwirtschaftlich genutzten, oberen Hauptgrundwasserleiter in diesem Raum überlagern (Beer et al., 2016).

In dem für Schleswig-Holstein entwickelten GROWA-Modell (Tetzlaff et al., 2017) wurde der Geschiebemergel als Lockergestein eingestuft, was vermutlich zu einer Unterschätzung der Direktabflussanteile und damit zu einer Überschätzung der Grundwasserneubildung geführt hat. Zur expliziten Berücksichtigung der hydrologischen Charakteristika des Geschiebemergels wurde für nicht grundwasserbeeinflusste Rasterzellen mit bindigen Deckschichten eine eigenständige Separationsmethode umgesetzt.

Die zugrundeliegende Hypothese war, dass die Prozesse der Grundwasserneubildung in Gebieten, die durch bindige Deckschichten dominiert werden, ähnlich ablaufen wie in Flächen, die durch Festgestein dominiert werden. Folglich werden BFI-Werte zugewiesen, die angeben, welcher Anteil des Wassers, das durch die unterste modellierte Bodenschicht infiltriert, als direkter Abfluss (Dränabfluss, natürlicher Zwischenabfluss) abfließt und wie viel zur Grundwasserneubildung beiträgt. Der blaue Kasten in Abb. 2-9 zeigt diese Abflussseparation für bindige Deckschichten (ohne Grundwassereinfluss) für das mGROWA-Modell Schleswig-Holstein. Räumlich differenziert wurden die BFI-Werte in Gebieten mit bindigen Deckschichten anhand von Angaben zur Mächtigkeit dieser Schichten (vgl. Kap. 3-8).

## 2.7 Kalibrierung des mGROWA-Modells

Das Modell mGROWA wurde für mehrjährige Mittelwerte des Abflusses kalibriert und validiert, unter der Annahme, dass die Veränderung der Speicher über einen langen Zeitraum vernachlässigbar ist. Die Kalibrierung anhand von Abflussmessungen wurde durchgeführt für den Netto-Gesamtabfluss und für die Netto-Grundwasserneubildung. Die Kalibrierung des mGROWA-Modells ist ein iteratives Verfahren, bei dem die Parameter (z. B.  $k_{LN}$ -Faktoren, BFI-Werte für bindige Deckschichten) angepasst werden, um die Leistung des Modells zu verbessern, wobei sichergestellt wird, dass die Werte innerhalb der in der Literatur angegebenen plausiblen Parameterbereiche bleiben. Der Bedarf an Kalibrierung für Parameter wie landnutzungsspezifische  $k_{LN}$ -Faktoren und regionale BFI-Werte für Staunässe ist jedoch minimal, da es umfangreiche Literatur mit Schätzungen dieser Werte gibt und die Parametrisierung des mGROWA-Modells nicht wesentlich von solchen etablierten Parametern abweichen sollte.

## 3 Datengrundlagen und Modellsetup

### 3.1 Zusammenfassung der verwendeten Daten

Die für die Modellierung verwendeten Datengrundlagen sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst dargestellt. Die Aufbereitung dieser Datensätze zur Erstellung von Eingaben für das Modell mGROWA wird in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels beschrieben.

Tabelle 3-1: Datengrundlagen und -quellen des mGROWA-Modells.

Datengrundlage	Datenquelle
Modellgitter	Vom LfU bereitgestellte Shape-Datei
Klimadaten: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Niederschlag</li> <li>– Potenzielle Evapotranspiration über Gras</li> <li>– Temperatur</li> </ul>	DWD (Deutscher Wetterdienst): <ul style="list-style-type: none"> <li>– CDC (Climate Data Center), Zeitreihe 1961-2021 <a href="https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/">https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/</a></li> </ul>
Modell der Geländeoberfläche	Vom LfU bereitgestelltes DGM 10
Landnutzungstypen	Kombinierter InVeKoS- und ALKIS-Datensatz aus 2020 (Tetzlaff et al., 2024), ergänzt mit Daten aus ATKIS v6.0 aus 2021
Versiegelungsgrade der Erdoberfläche	Copernicus Land Monitoring Service: <ul style="list-style-type: none"> <li>– High Resolution Layer Imperviousness Density (IMD) 2018 10 m <a href="https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/imperviousness">https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/imperviousness</a></li> </ul>
Bodenkarte mit Bodenprofilen	Bodenübersichtskarte von Schleswig-Holstein 1:250.000 (BÜK250), Stand 2017
Potenziell dränierte Flächen, Grundwasserstufe und Vernässungsgrad	Tetzlaff und Kuhr (2011)
Ausmaß und Mächtigkeit der bindigen Deckschichten	Kunkel und Wendland (2020)
Tägliche Abflussdaten und entsprechende Koordinaten von Messstationen	Zur Verfügung gestellt von LfU
Einzugsgebietsgrenzen	Tetzlaff et al. (2017)

### 3.2 mGROWA Modellsetup

Die Abgrenzung des zu modellierenden Gebiets wurde aus dem Digitalen Gewässerkundlichen Flächenverzeichnis (GFV) als Bestandteil des Amtlichen Wasserwirtschaftlichen Gewässerverzeichnisses (AWGV) abgeleitet. Dazu wurde das GFV an der Westküste, der Elbe und in Teilbereichen auch an der Ostsee um die Gebiete außerhalb der Deichlinie reduziert. An den nicht eingedeichten Küstenabschnitten der Ostsee entspricht die Abgrenzung der Küstenlinie in ATKIS. Die Abgrenzung zu den Nachbarbundesländern und Dänemark entspricht den politischen Grenzen. Alle Marschinseln, Sande o. ä. im Meeresbereich wurden aus dem GFV entfernt, sodass im zu modellierenden Gebiet als Inseln nur Helgoland<sup>1</sup>, die Geestkerninseln Amrum, Föhr und Sylt sowie Fehmarn verbleiben.

<sup>1</sup> Helgoland ist auf den Karten in diesem Bericht nicht dargestellt.

Eine Shape-Datei, die der obigen Beschreibung entspricht, wurde vom LfU bereitgestellt und für die Definition des Modellgitters für mGROWA verwendet. Das amtliche geodätische Bezugssystem ETRS98/UTM mit führender 32 im East-Wert (EPSG-Code 4647) wurde als einheitliche Geokodierung verwendet. Das festgelegte Modellgitter hat eine räumliche Auflösung von 100 m x 100 m, wobei die Mittelpunkte der Rasterzellen immer geraden Koordinaten mit einem Vielfachen von 100 m entsprechen. Somit wurde die Fläche von Schleswig-Holstein in ca. 1,56 Mio. individuelle Rasterzellen unterteilt, auf die jede Modelleingabegröße bzw. jede Modellrechnung bezogen wurde. Abb. 3-1 zeigt das Modellgitter vor dem Hintergrund eines Satellitenbildes.

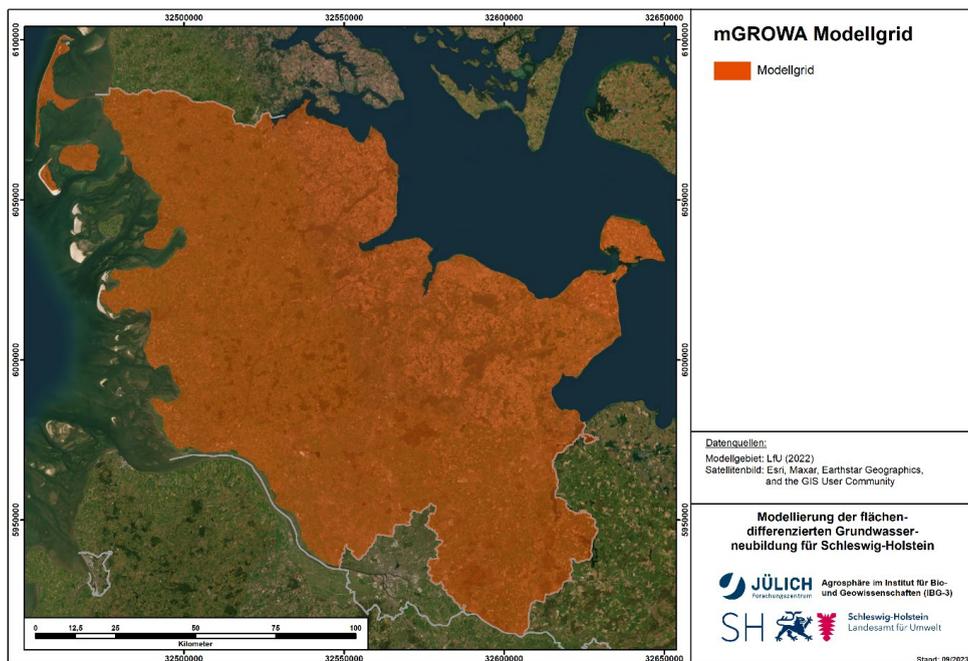


Abbildung 3-1: Ausdehnung des mGROWA-Modellgitters.

Das mGROWA-Modell wurde auf einer täglichen Zeitskala für die 61 Jahre vom 01.11.1960 bis zum 31.10.2021 (entsprechend den 61 vollen hydrologischen Jahren 1961-2021) ausgeführt. Für die Modellierung des Wasserhaushalts im Boden wurden 7 Bodenschichten mit einer Dicke von je 30 cm modelliert.

### 3.3 Klimatische Daten

Für die Modellierung der Wasserhaushaltsgrößen mit dem mGROWA-Modell wurden die Niederschlags- und Klimadaten des Climate Data Center (CDC) (<ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) der Periode 1961-2021 berücksichtigt (DWD, 2018; DWD, 2020). Hierbei handelte es sich zum einen um Rasterdatensätze, die eine räumliche Auflösung von 1000 m x 1000 m haben. Zum anderen wurden die in täglicher Auflösung vorliegenden Stationsdaten der Periode 1961-2021 berücksichtigt.

Die Standorte der Stationen für Niederschlag und potenzielle Evapotranspiration sind in Abb. 3-2 dargestellt. Es werden alle Stationen angezeigt, für die zu irgendeinem Zeitpunkt im Modellierungszeitraum 1961-2021 Daten vorliegen. Die Zahl der aktiven Stationen hat sich in den

letzten Jahrzehnten verringert. So hat sich beispielsweise die Zahl der aktiven Niederschlagsstationen in Schleswig-Holstein von 158 im Jahr 1971 auf nur noch 63 im Jahr 2021 verringert.

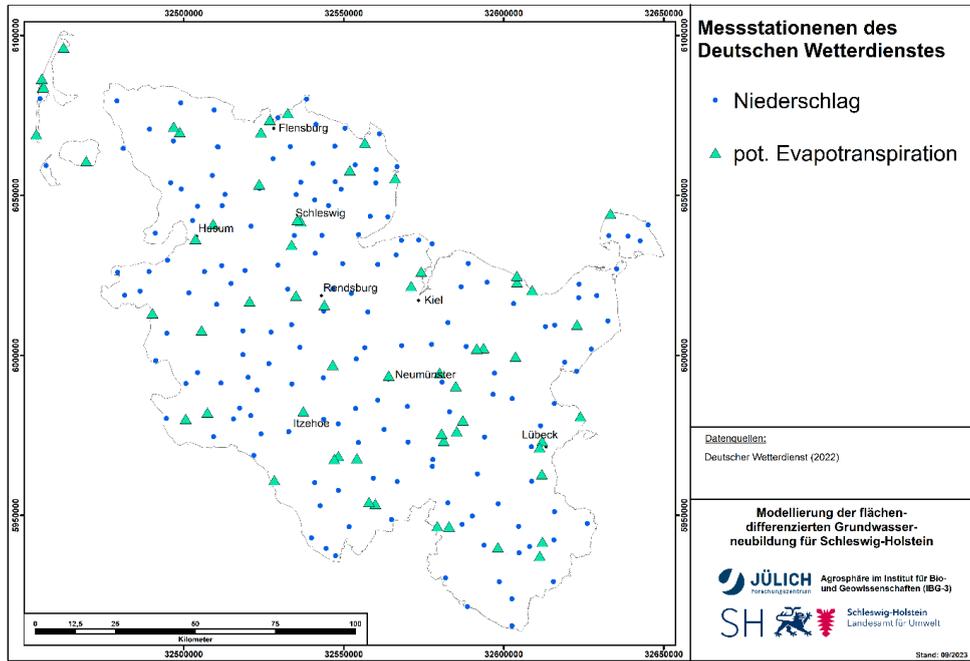


Abbildung 3-2: Messstationen mit in täglicher Auflösung vorliegenden Daten für die Klimaparameter Niederschlag und potenzielle Evapotranspiration des Climate Data Center (CDC).

### 3.3.1 Niederschlagshöhe

Um aus den oben beschriebenen Datensätzen die für die mGROWA-Modellierung notwendigen Niederschlagsfelder in Tagesschritten und in einer räumlichen Auflösung von 100 m x 100 m abzuleiten, wurden die in monatlicher Auflösung vorliegenden Rasterdatensätze bei der Regionalisierung zeitlich (auf Tageswerte) und räumlich (auf 100 m x 100 m-Raster) interpoliert. Die Beobachtungen an den Niederschlagsstationen wurden hierbei als Stützstellen genutzt. Für jede Rasterzelle wird in den vier umgebenden Quadranten (d. h. 0-90°, 90-180°, 180-270° und 270-360°) die jeweils nächstgelegene Klimastation mit verfügbaren Werten ermittelt. Aus den Tagessummen dieser Stationen werden mit dem IDW-Verfahren (Shepard, 1968) Tagessummen für alle Tage des entsprechenden Monats interpoliert. Daraus ergibt sich für jede Rasterzelle eine Zeitreihe, die auf den Daten der Klimastationen basiert. Für jeden Monat wird die zeitliche Verteilung aus den von den Stationen abgeleiteten Zeitreihen als Gewichtung für die Werte aus den monatlichen Rastern verwendet, um dann tägliche Zeitreihen des Niederschlags für jede Rasterzelle zu erzeugen.

Abb. 3-3 zeigt die mittlere jährliche Niederschlagshöhe der Periode 1991-2020. Die mittleren jährlichen Werte schwanken zwischen 553 mm/a und 1030 mm/a, wobei der mittlere Niederschlag vom Osten Schleswig-Holsteins nach Westen hin allgemein zunimmt. Das räumliche Mittel des mittleren jährlichen Niederschlags beträgt 815 mm/a. Neben dem Ost-West-Gefälle gibt es auch eine schwache Korrelation zwischen der Niederschlags- und Geländehöhe (Zunahme des Niederschlags mit zunehmender Höhe, vgl. Abb. 3-5). Die gleichen Abbildungen für die Zeiträume 1971-2000 und 1981-2010 befinden sich im Appendix A.

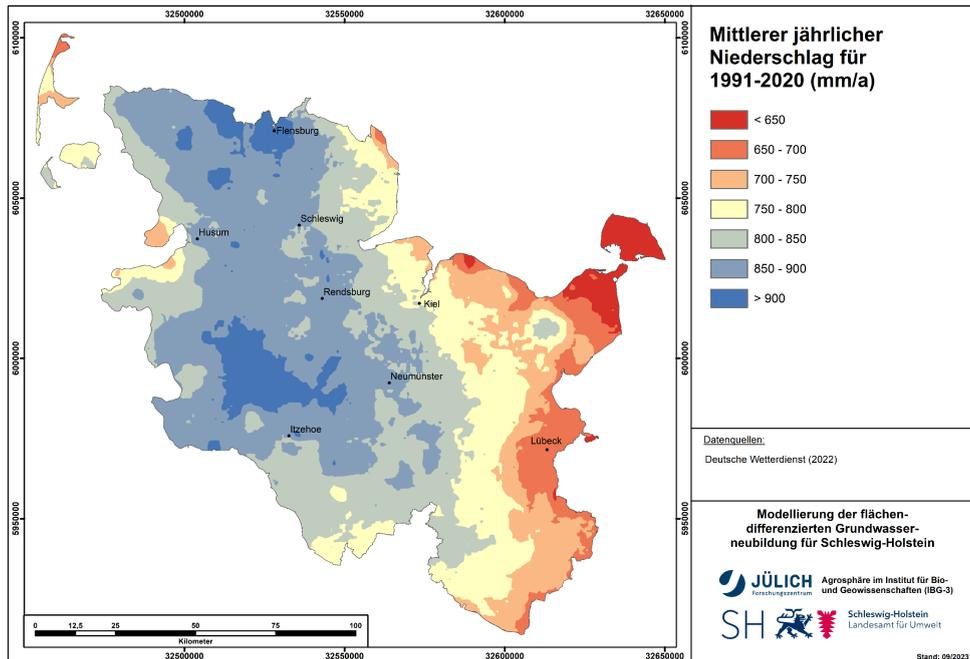


Abbildung 3-3: Mittlerer jährlicher Niederschlag für 1991 bis 2020.

### 3.3.2 Potenzielle Evapotranspiration

Um für den gesamten Zeitraum 1961-2021 Werte zur potenziellen Evapotranspiration zur Verfügung zu haben, wurde auf zwei verschiedene Datensätze des CDC zurückgegriffen. Für den Zeitraum 1961-1990 werden vom CDC ausschließlich Raster mit monatlichen potenziellen Evapotranspirationswerten zur Verfügung gestellt, die anhand des Wending-Verfahrens (Wending et al., 1991) abgeleitet worden sind.

Ähnlich wie bei den Niederschlagsdaten (Kap. 3.3.1) wurden tägliche Stationsmessungen für die räumliche und zeitliche Interpolation verwendet, um tägliche Rasterfelder für die potenzielle Evapotranspiration zu erzeugen. Da vom CDC jedoch keine täglichen potenziellen Evapotranspirationswerte für die entsprechenden Klimastationen zur Verfügung gestellt werden, wurden die täglich gemessenen meteorologischen Messwerte (Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer, relative Luftfeuchtigkeit usw.) der Stationen verwendet, um hieraus die Zeitreihen der potenziellen Evapotranspiration anhand der Penman-Monteith-Gleichung (Monteith, 1965; Allen et al., 1998) abzuleiten.

Für den Zeitraum 1991-2021 werden vom CDC Raster mit potenziellen Evapotranspirationswerten in täglicher Auflösung zur Verfügung gestellt. Für diesen Zeitraum wurden daher keine stationsbasierten Tageswerte der potenziellen Evapotranspiration für die Ableitung des täglichen Inputs für das mGROWA-Modell benötigt. Die Raster über diesen Zeitraum werden jedoch mit der AMBAV-Methode (Löpmeier, 1994) berechnet. Dies bedeutet, dass leichte räumlich und zeitlich unterschiedlich variierende Verteilungen der potenziellen Evapotranspiration zwischen den beiden Methoden auftreten. Um die Konsistenz der mGROWA-Modelleingaben zu gewährleisten, wurden die monatlichen AMBAV-Werte an die Wending-Werte über Koeffizienten angepasst.

Die mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration für 1991-2020 ist in Abb. 3-4 dargestellt. Die Schwankungsbreite ist relativ gering, mit Werten zwischen 545 und 604 mm/a, wobei ein

allgemeiner Anstieg im Südosten des Landes zu verzeichnen ist. In Anbetracht der relativ geringen Höhenunterschiede in Schleswig-Holstein ist ein Muster aus verringerter  $ET_0$  bei erhöhter Elevation, wie es in übrigen Teilen von Deutschland zu beobachten ist, innerhalb des Landes nicht zu erkennen. Die mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration in Schleswig-Holstein für 1991-2020 beträgt 571 mm/a.

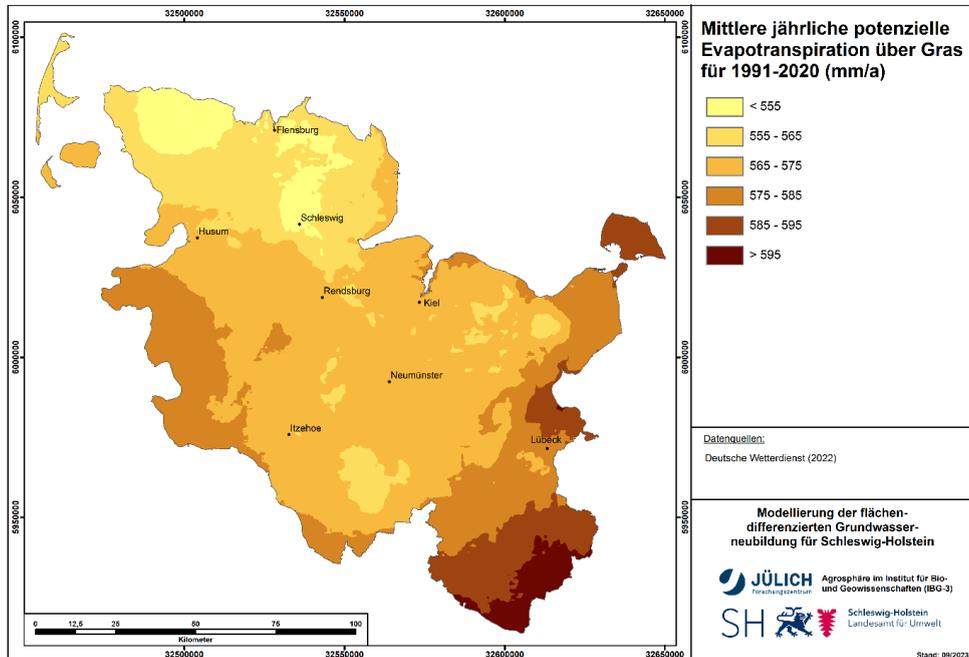


Abbildung 3-4: Mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration für 1991 bis 2020.

### 3.4 Topographische Datengrundlage

Die Topographie ist eine wichtige Einflussgröße bei der Wasserhaushaltsmodellierung mit mGROWA. Als Datengrundlage stand das vorliegende digitale Geländemodell DGM10 mit einer Gitterweite von 10 m zur Verfügung. Auf Basis dieses Höhenmodells ist es möglich, aus der Hangexposition und Hangneigung den für das mGROWA-Modell notwendigen Topographiefaktor abzuleiten. Der Topographiefaktor im mGROWA-Modell beeinflusst die Höhe der tatsächlichen Evapotranspiration, während die Hangneigung eine der Einflussgrößen zur Bestimmung des Anteils der Grundwasserneubildung am Gesamtabfluss ist.

Die Höhengliederung (Abb. 3-5) zeigt das allgemeine Höhengefälle in Schleswig-Holstein, wobei beispielsweise die Elbmarsch fast auf Meereshöhe liegt. Die schleswig-holsteinische Geest hat meist eine geringe Höhenlage bis zu 25 m+NN, und im Östlichen Hügelland können Höhen von über 90 m+NN auftreten. Etwa 6 % der modellierten Fläche liegen unterhalb des Meeresspiegels und 26 % der Gesamtfläche liegen auf einer Höhe von weniger als 5 m über dem Meeresspiegel.

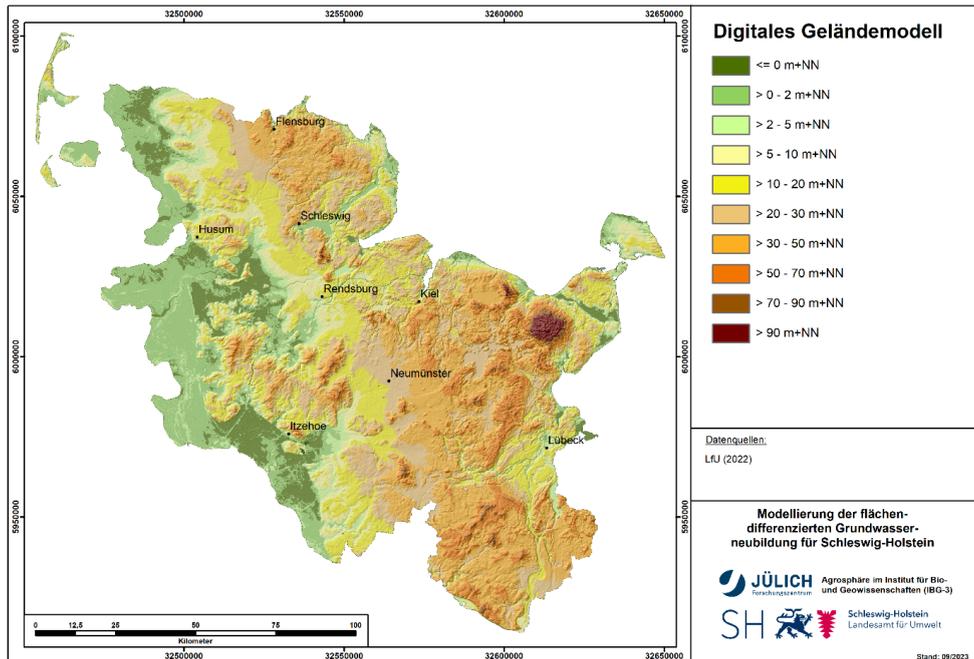


Abbildung 3-5: Topografische Höhe der Geländeoberfläche.

Aus dem DGM10 wurden sowohl die Hangneigung als auch die Hangexposition abgeleitet. Der Topographiefaktor wurde dann, wie in Kap. 2.3 beschrieben, aus der Hangneigung und der Hangexposition berechnet. Das resultierende Raster wurde dann auf eine räumliche Auflösung von 100 m aggregiert, was in Abb. 3-6 dargestellt ist. Die Variation des Topographiefaktors ist in Schleswig-Holstein minimal, wobei 97,9 % der Fläche in den Bereich 0,94 - 1,06 fällt.

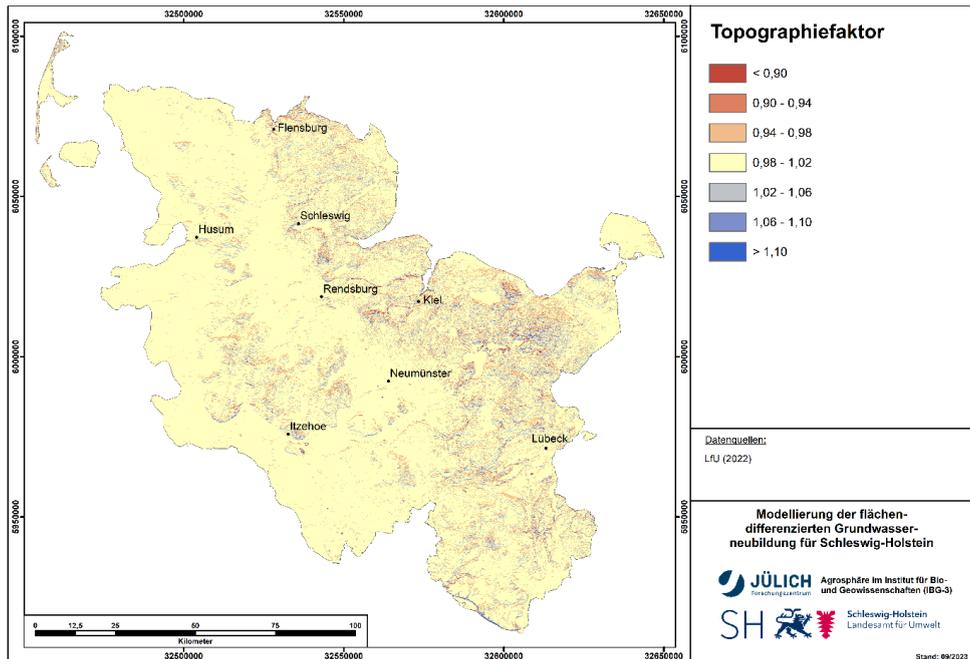


Abbildung 3-6: Topographiefaktor.

### 3.5 Daten zum Versiegelungsgrad

Um den Prozentsatz der versiegelten Fläche für jede Rasterzelle im mGROWA-Modell zu definieren, wurde der von der European Environment Agency („High Resolution Layer: Imperviousness Density (IMD) 2018“) im 10 m-Raster flächendeckend für Europa bereitgestellte Datensatz (Pan-European High Resolution Layer, HRL) verwendet. Der Rasterdatensatz enthält Werte von 0 bis 100, die den prozentualen Anteil der versiegelten Fläche für jede 10 m-Rasterzelle angeben. Dieser Datensatz wurde auf das Modellgitter projiziert und mit einem räumlichen Mittelwert auf die Auflösung von 100 m aggregiert.

Abb. 3-7 zeigt den Versiegelungsgrad für Schleswig-Holstein, wobei 91,4 % der Fläche Werte unter 20 % aufweisen. Der Großteil der Gebiete mit hohem Versiegelungsgrad befindet sich in größeren Städten wie Lübeck und Kiel sowie in deren Umgebung.

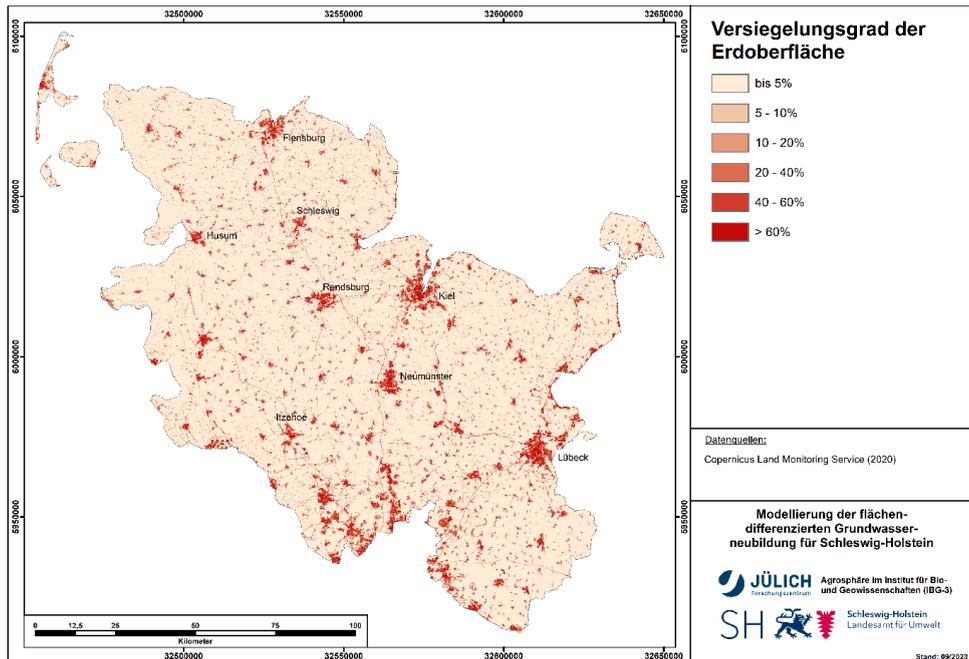


Abbildung 3-7: Versiegelungsgrad der Landoberfläche.

### 3.6 Daten zur Landbedeckung

In dem im mGROWA-Modell implementierten Verfahren zur Berechnung der tatsächlichen Evapotranspiration auf Basis der BOWAB-Methodik (Engel et al., 2012) werden landnutzungsspezifische Verdunstungsfaktoren für die Landnutzungseinheiten unterschieden (z. B. „Grünland“, „Ackerland“, „Laubwald“ und „Wasserflächen“).

Zur Charakterisierung der Landbedeckung in Schleswig-Holstein wird primär ein vorverarbeiteter Datensatz verwendet. Letzterer ist ein kombinierter InVeKoS- und ALKIS-Datensatz (beide aus dem Jahr 2020) mit einer räumlichen Auflösung von 25 m (Tetzlaff et al., 2024). Dieser Datensatz wurde im Rahmen des Projekts „Weiterentwicklung von Modellansätzen zur optimierten Simulation von Nährstoffeinträgen in die Oberflächengewässer Schleswig-Holsteins“ erstellt, das ebenfalls vom FZJ durchgeführt wird. Dieser kombinierte Datensatz weist eine räumliche Differenzierung zwischen Ackerland und Grünland auf.

Wie in Kap. 2.3.2 beschrieben, wird für die Modellierung in mGROWA eine Rasterzelle mit  $n$  % versiegelter Fläche in zwei Teilen modelliert: erstens die  $n$  % mit versiegelter Fläche und zweitens die restlichen  $100 - n$  % mit der Landbedeckung für den Rest dieser Zelle. Daher werden Informationen über die Landbedeckung für den Teil jeder Rasterzelle benötigt, der nicht versiegelt ist. Diese Information ist im kombinierten InVeKoS- und ALKIS-Datensatz für Rasterzellen mit einem Versiegelungsgrad nicht enthalten, weshalb ein zusätzlicher Datensatz erforderlich war, um die Landbedeckung für diese Zellen mit Teilversiegelung zu bestimmen. Zur Definition der nicht versiegelten Teile dieser Rasterzellen wurde der ATKIS-Datensatz von 2021 verwendet.

Abb. 3-8 zeigt die räumliche Verteilung der Landbedeckungstypen in Schleswig-Holstein nach der Übertragung des Datensatzes auf das 100 m x 100 m-Modellgitter von mGROWA. In Tabelle 3-2 sind die Gesamtfläche und der prozentuale Anteil jeder dieser Landbedeckungen aufgeführt. Insgesamt gibt es 19 Landbedeckungstypen: Dazu gehören 15 der 21 Kategorien

aus dem kombinierten InVeKoS- und ALKIS-Datensatz (d. h. nach Entfernen der "Urban-Ver-siegelungsgrad"-Kategorien) und 4 zusätzliche Landbedeckungskategorien, die auf den AT-KIS-Daten basieren. Ebenfalls in Tabelle 3-2 enthalten ist die ursprüngliche Datenquelle, die für die Bestimmung der Flächen der Landbedeckung verwendet wurde.

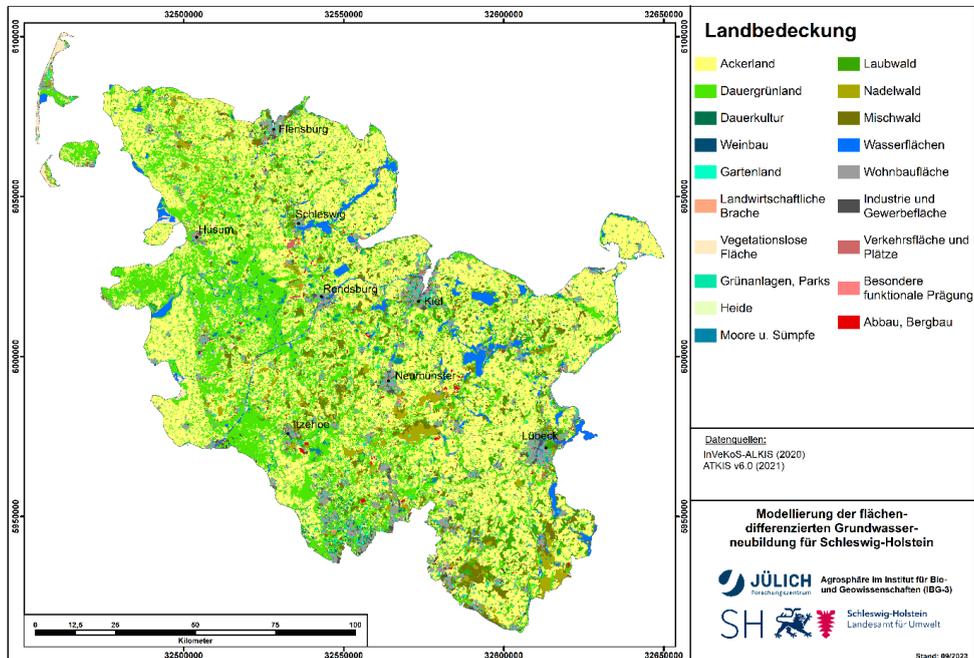


Abbildung 3-8: Landbedeckungskategorien für das mGROWA-Modell.

Fast die Hälfte (47,7 %) der Fläche ist von Ackerland bedeckt, wobei Dauergrünland (25,5 %) die zweithäufigste Landbedeckung ist. Der größte Teil des Dauergrünlands befindet sich in der westlichen Hälfte Schleswig-Holsteins und entspricht den Geest- und Marschgebieten, während Ackerflächen überall auftreten. Wälder (Laubwald, Nadelwald und Mischwald) machen 11,1 % der Landbedeckung aus und befinden sich vor allem im mittleren und südlichen Teil des Landes.

Tabelle 3-2: Gesamtfläche und prozentualer Anteil der Landbedeckungstypen.

Landbedeckung	Fläche (km <sup>2</sup> )	% Anteil	Datenquelle <sup>a</sup>
Ackerland	7436	47,7	InVeKoS und ALKIS
Dauergrünland	3979	25,5	InVeKoS und ALKIS
Dauerkultur	49	0,3	InVeKoS und ALKIS
Weinbau	0,01	0,0	ALKIS
Gartenland	30	0,2	ALKIS und ATKIS
Landwirtschaftliche Brache	10	0,1	ALKIS
Vegetationslose Fläche	184	1,2	ALKIS und ATKIS
Grünanlagen, Parks	485	3,1	ALKIS und ATKIS
Heide	17	0,1	ALKIS
Moore und Sümpfe	113	0,7	ALKIS
Laubwald	572	3,7	ALKIS
Nadelwald	448	2,9	ALKIS
Mischwald	714	4,6	ALKIS
Wasserflächen	516	3,3	ALKIS
Wohnbaufläche	703	4,5	ATKIS
Industrie und Gewerbefläche	161	1,0	ATKIS
Verkehrsfläche und Plätze	56	0,4	ATKIS
Besondere funktionale Prägung	62	0,4	ATKIS
Abbau, Bergbau	43	0,3	ALKIS und ATKIS

a: Die in dieser Spalte aufgeführten Quellen bezeichnen diejenigen, die für die überwiegende Mehrheit der Rasterzellen verwendet wurden.

Im BOWAB-Modell wurden spezielle landnutzungsspezifische Verdunstungsfaktoren ( $k_{LN}$ ) implementiert, mit denen es möglich ist, den Jahresgang der tatsächlichen Verdunstung bei der Wasserhaushaltsmodellierung mit mGROWA zu berücksichtigen. Diese Werte basieren auf den Angaben in Allen et al. (1998), ATV-DVWK (2002), Finch (2007), Groh et al. (2015) und Dietrich et al. (2021). Sie wurden bei Bedarf angepasst, um eine optimale Modelleistung zu erreichen (Tabelle 3-3). Diese  $k_{LN}$ -Faktoren gelten nur für den nicht versiegelten Anteil jeder modellierten Rasterzelle (s. Kap. 2.3.2).

Tabelle 3-3: Landnutzungsspezifische Verdunstungsfaktoren für die Landbedeckungsklassen nach Tabelle 3-2 für die Einzelmonate.

Landbedeckung	$k_{LN}$											
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Ackerland	0,733	0,733	0,774	0,947	1,188	1,181	1,185	1,151	0,974	0,853	0,775	0,733
Dauergrünland	0,804	0,927	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,927
Dauerkultur	0,937	0,937	0,918	0,958	0,975	0,975	0,975	0,997	1,007	0,968	0,937	0,937
Weinbau	0,937	0,937	0,918	0,958	0,975	0,975	0,975	0,997	1,007	0,968	0,937	0,937
Gartenland	0,807	0,807	0,871	0,935	1,030	1,035	1,035	1,057	0,962	0,908	0,847	0,807
Landwirtschaftliche Brache	0,863	0,863	0,863	0,877	0,871	0,864	0,864	0,864	0,864	0,877	0,863	0,863
Vegetationslose Fläche	0,863	0,863	0,863	0,877	0,871	0,864	0,864	0,864	0,864	0,877	0,863	0,863
Grünanlagen, Parks	0,804	0,927	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,927
Heide	0,804	0,927	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,927
Moore und Sümpfe	1,076	1,076	1,051	1,014	1,002	1,002	1,002	1,026	1,026	1,051	1,076	1,076
Laubwald	1,003	1,003	1,053	1,615	1,700	1,700	1,700	1,700	1,670	1,520	1,082	1,003
Nadelwald	1,335	1,335	1,335	1,335	1,307	1,321	1,335	1,335	1,335	1,335	1,335	1,335
Mischwald	1,173	1,173	1,173	1,264	1,416	1,450	1,450	1,450	1,450	1,410	1,238	1,173
Wasserflächen	1,100	1,000	0,950	0,950	0,950	0,950	1,000	1,050	1,050	1,100	1,200	1,200
Wohnbaufläche	0,804	0,927	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,927
Industrie und Gewerbefläche	0,804	0,927	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,927
Verkehrsfläche und Plätze	0,804	0,927	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,927
Besondere funktionale Prägung	0,804	0,927	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,927
Abbau, Bergbau	0,863	0,863	0,863	0,877	0,871	0,864	0,864	0,864	0,864	0,877	0,863	0,863

Da detaillierte Informationen zur Fruchtfolge auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen in der Regel nicht zur Verfügung stehen, wird bei ackerbaulich genutzten Flächen auf eine feldfrucht-spezifische Verdunstungssimulation verzichtet, obwohl diese mit mGROWA möglich ist. Stattdessen wird für die Landnutzungs-kategorie „Ackerflächen“ ein einheitlicher, jedoch monatlich variierender (unspezifischer) Verdunstungsfaktor verwendet.

Eine Ausnahme in Schleswig-Holstein bildet die Kulturart „Mais“. Mais ist eine der am häufigsten angebauten Kulturen in Schleswig-Holstein. Da die  $k_{LN}$ -Faktoren, die die tatsächliche Evapotranspiration steuern, für Mais wesentlich niedriger sind als für andere Kulturen, wurde der Einfluss des Maisanbaus auf die Verdunstung bzw. die Abflussbildung explizit berücksichtigt. Anhand der Shape-Datei „Gesamtparzellen AGRUM\_SH“ aus der InVeKoS-Datenbank wurde hierzu in einem ersten Schritt der prozentuale Anteil der landwirtschaftlichen Flächen, die von Mais bedeckt sind, und der prozentuale Anteil der landwirtschaftlichen Flächen für „unspezifisches Ackerland“ auf der Ebene der Gemeinden ermittelt (Abb. 3-9).

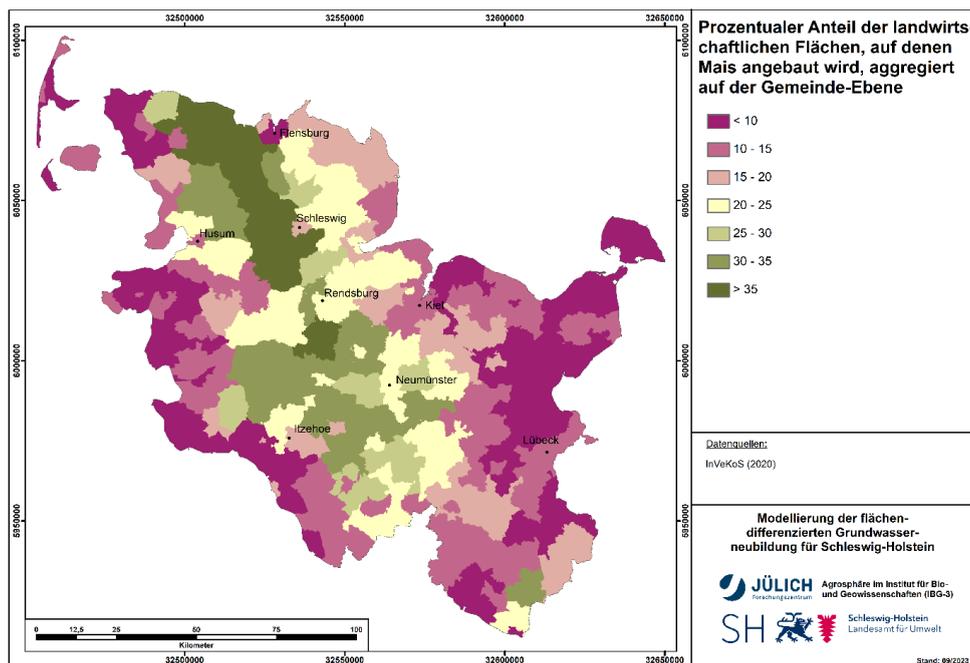


Abbildung 3-9: Prozentualer Anteil der landwirtschaftlichen Flächen, auf denen Mais angebaut wird.

Für jede Gemeinde wurde dann die tatsächliche Evapotranspiration basierend auf den  $k_{LN}$ -Parametern für Mais aus Bug et al. (2020) und für „Ackerland (unspezifisch)“ aus ATV-DVWK (2002) berechnet. Hierzu wurde für den prozentualen Anteil der Maisflächen bzw. den prozentualen Anteil der Ackerflächen (unspezifisch) ein Mittelwert für die Ackerflächen ermittelt. Ein Beispiel für die monatlichen  $k_{LN}$ -Faktoren, die sich auf diese Weise ergeben, ist in Tabelle 3-4 dargestellt. Die oberen beiden Zeilen zeigen die  $k_{LN}$ -Faktoren, mit denen die tatsächliche Evapotranspiration modelliert würde, wenn die ackerbauliche Nutzung in einer Gemeinde zu 100% aus „Mais“ bzw. „Ackerland (unspezifisch)“ bestehen würde. Die untere Zeile zeigt die  $k_{LN}$ -Faktoren für eine beispielhafte Kombination von 30 % Mais und 70 % „anderes Ackerland“.

Tabelle 3-4: Monatliche  $k_{LN}$ -Faktoren für Mais, „anderes Ackerland“ und eine beispielhafte Kombination von Mais und der Landbedeckung „anderes Ackerland“.

Landbedeckung	$k_{LN}$											
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
Mais	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,90	1,15	1,05	0,80	0,65	0,65	0,65
Ackerland (unspezifiziert)	0,733	0,733	0,774	0,947	1,188	1,181	1,185	1,151	0,974	0,853	0,775	0,733
30 % Mais; 70 % anderes Ackerland	0,708	0,708	0,737	0,858	1,027	1,097	1,175	1,121	0,922	0,792	0,738	0,708

## 3.7 Bodenkundliche Datengrundlagen

### 3.7.1 Bodenprofile

Zur Berücksichtigung des Einflusses des Bodens auf die Abflussbildung standen Bodenprofile aus der Bodenübersichtskarte von Schleswig-Holstein 1:250.000 (BÜK250; Stand 2017) zur Verfügung. Vom LfU wurden sowohl ein Shapefile als auch eine Access-Datenbank mit entsprechenden Leit- und Begleitprofilen für die zugehörigen Legendeneinheiten zur Verfügung gestellt. In der BÜK250 sind 9.001 Einzelpolygone ausgewiesen. Jeder Legendeneinheit sind ein Leitboden und bis zu drei Begleitböden zugeordnet. Zusammen summieren sich die Flächenanteile immer zu 100 %. Da jedoch keine räumliche Differenzierung zwischen Leitböden und Begleitböden innerhalb einzelner Polygone vorlag, wurden die Modellparameter für jede Rasterzelle ausschließlich auf Basis der Leitböden abgeleitet. Regional auftretende Unschärfen bei den abgeleiteten Bodenparametern sind dadurch unvermeidbar und setzen sich in der Modellierung fort. Bis zur Einführung einer räumlich höher aufgelösten Bodenkarte (z. B. im Maßstab 1:50.000) ist diese Einschränkung unvermeidbar.

Abb. 3-10 zeigt eine Übersicht über die Verbreitung der in der BÜK250 ausgewiesenen Leitbodentypen in Schleswig-Holstein. Die Böden entlang der Westküste (Elbmarsch) sind überwiegend Marschböden, die in ein zentrales Band von Nordwesten nach Süden des Bundeslandes übergehen, in dem Gleye und Podsole dominieren (Schleswig-Holsteinische Geest). Der nördliche Teil des Hügellandes wird von Pseudogleyen und Parabraunerden dominiert, während im südlichen Teil Pseudogleye, Braunerden und Niedermoore vorherrschen.

Die Shape-Datei mit den Bodenprofilen wurde zunächst in ein Raster mit der Geometrie des mGROWA-Modellrasters transformiert. Für jeden Leitboden gibt es bis zu fünf Bodenprofile, die der jeweiligen Kombination mit den Landbedeckungskategorien „Ackerland“ (A), „Wald und Forst allgemein“ (F), „Grünland allgemein“ (G), „Ödland allgemein“ (O), und „versiegelte und bebaute Fläche“ (V) entsprechen. Unter Verwendung der Informationen aus dem Landbedeckungsraster (Kap. 3.6) wurde dann das endgültige Bodenraster mit Codes erstellt, die sowohl die Boden-ID als auch die Landbedeckung<sup>2</sup> widerspiegeln. Dadurch ergaben sich im fertigen Raster insgesamt 1.459 unterschiedliche Boden-/Landnutzungs-codes.

---

<sup>2</sup> Zuordnung der 19 Landnutzungstypen (Abb. 3-8) zu den 5 Kategorien für die Definition der Leitbodenprofile: Ackerland (A); Dauergrünland (G); Dauerkultur (G); Weinbau (G); Gartenland (G); Landwirtschaftliche Brache (O); Vegetationslose Fläche (O); Grünanlagen, Parks (G); Heide (G); Moore und Sümpfe (G); Laubwald (F); Nadelwald (F); Mischwald (F); Wohnbaufläche (V); Industrie und Gewerbefläche (V); Verkehrsfläche und Plätze (V); Besondere funktionale Prägung (V); Abbau, Bergbau (O).

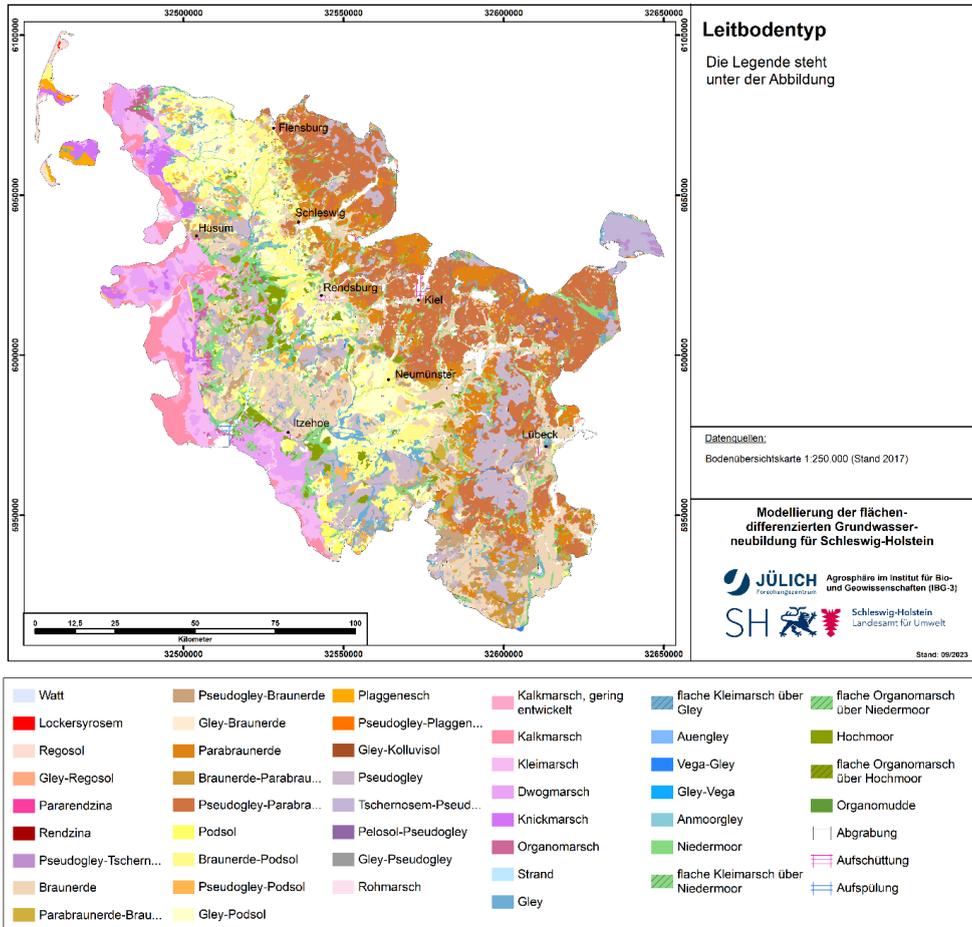


Abbildung 3-10: Leitbodentypen der BÜK250.

### 3.7.2 Grundwasserbeeinflusste Böden

Der Grundwasserstand im Boden ist ein wichtiger Parameter in der Modellierung des Wasserhaushalts. Das oberflächennahe Grundwasser bestimmt wesentlich die Entwicklung und Eigenschaften der Böden und damit deren Nutzungsmöglichkeit oder Meliorationsbedürftigkeit. Der Grundwasserstand schwankt im Jahresverlauf in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf, vom Substrat, von der Geländelage und der Vegetation mehr oder weniger stark.

Der Abstand zwischen effektiver Durchwurzelungstiefe und Grundwasseroberfläche sowie die ungesättigte Wasserleitfähigkeit und Porengrößenverteilung des Bodens in diesem Tiefenabschnitt bestimmen den kapillaren Aufstieg von Grundwasser in den von Wurzeln erschlossenen Bodenraum und damit die Wasserreserve, die der Vegetation während trockenerer Witterungsperioden zusätzlich zur nutzbaren Feldkapazität bereitgestellt wird.

Der Datensatz für grundwasserbeeinflusste Gebiete wurde Tetzlaff und Kuhr (2011) entnommen, die das folgende mehrstufige Verfahren zu seiner Ableitung angewandt haben: Informationen über die Grundwasserstufe waren aus drei Quellen verfügbar: BGK200, BK25 (unvollständige räumliche Abdeckung) und Angaben zur Untergrenze des Go-Horizonts. Für die

Geest und das Hügelland wurde der Reliefparameter  $TCI_{low}$  verwendet, um mehr Informationen ableiten zu können.  $TCI_{low}$  ist ein kombinierter morphometrischer Parameter, der aus der Höhe über der Tiefenlinie und einem modifizierten Bodenfeuchteindex berechnet wird (s. Köthe, 2007). Die Grundwasserstufe aus der BK25 wurde verwendet und mit den Bodentypen und dem  $TCI_{low}$  kombiniert, um typische Grundwasserstufen nach kombinierten Landtypen und  $TCI_{low}$  abzuleiten. Für Marschgebiete wurde die Grundwasserstufe auf Basis der bodenkundlichen Feuchtestufe zugeordnet (Zuordnung nach Verknüpfungsregel 6.5.8 in Müller, 2004). Für Forststandorte konnten Annahmen aus der Forstlichen Standortkartierung übernommen werden. Weitere Informationen zur Ableitung dieses Datensatzes sind in dem Bericht von Tetzlaff und Kuhr (2011) zu finden.

Der Grundwasserstand aus Tetzlaff und Kuhr (2011) steht mit einer räumlichen Auflösung von 25 m und unterschiedlicher Gittergeometrie zur Verfügung und wurde für die mGROWA-Modellierungen auf das 100 m-Raster übertragen. Dies erfolgte über das Dominanzprinzip entsprechend des häufigsten Grundwasserstands in den 100 m-Rasterzellen. Diese werden nach den in Bug et al. (2020) aufgeführten Beziehungen in einen mittleren Hochstand (Abb. 3-11) und in einen mittleren Niedrigstand (Abb. 3-12) des Grundwassers umgerechnet (vgl. Abb. 2-5). In Schleswig-Holstein sind 37,4 % der Landflächen grundwasserbeeinflusst. Der Großteil der grundwasserbeeinflussten Böden befindet sich in der Elbmarsch und in der Schleswig-Holsteinischen Geest.

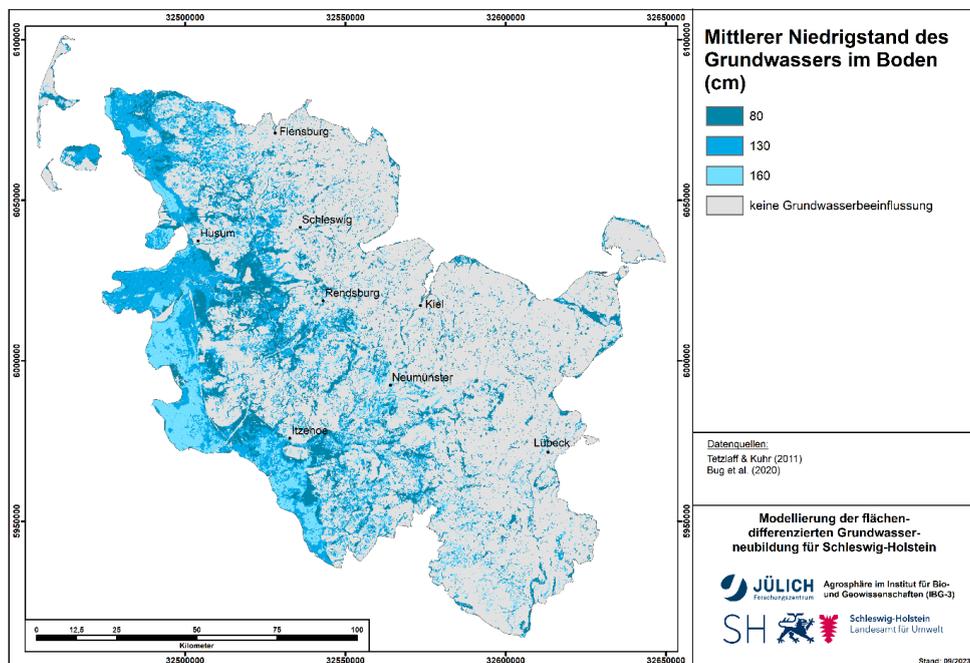


Abbildung 3-11: Mittlerer Niedrigstand des Grundwassers im Boden (MNGW).

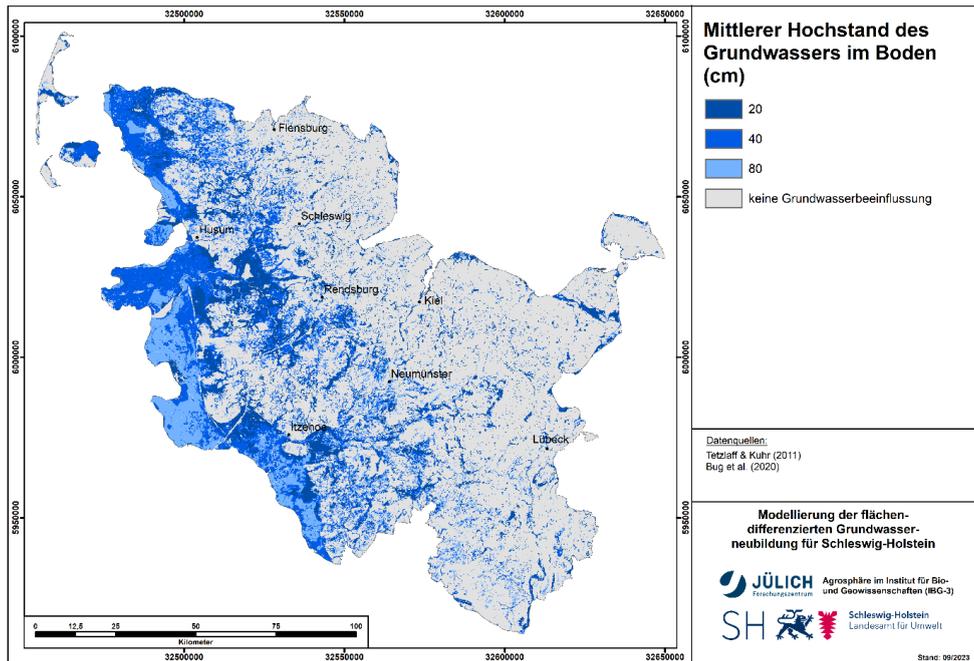


Abbildung 3-12: Mittlerer Hochstand des Grundwassers im Boden (MHGW).

### 3.7.3 Potenziell dränierte Flächen

Zur Ermittlung der Abflüsse aus Dränagen werden Informationen zur Lage künstlich entwässerter landwirtschaftlicher Nutzflächen benötigt. Hierfür wurde die Karte der potenziell dräniereten Flächen von Tetzlaff und Kuhr (2011) verwendet, die Geofaktoren wie Bodenparameter, Landnutzungstyp und Reliefeigenschaften miteinander kombiniert, um dränbedürftige Flächen zu identifizieren. Weitere Informationen zur Ableitung dieses Datensatzes finden sich im Bericht von Tetzlaff und Kuhr (2011). Dieser, in einer räumlichen Auflösung von 25 m vorliegende Datensatz, wurde auf die Rastergeometrie dieses Projektes bezogen. Zusätzlich erfolgte eine Aggregation auf die Rasterzellengröße von 100 m x 100 m nach dem Dominanzprinzip, d. h. eine Rasterzelle wurde dann als potenziell künstlich entwässert angenommen, wenn sich nach der Aggregation der 25 m-Einzelrasterzellen mehr als 50 % der 100 m-Rasterfläche als potenziell künstlich entwässert herausgestellt hatte (Abb. 3-13). Es ergibt sich eine potenziell dränierete Gesamtfläche von ca. 8.270 km<sup>2</sup>, was etwa 55 % der Landfläche entspricht. Als Einbautiefe der Dränagen werden im gesamten Bundesland 80 cm angenommen. Aufgrund der Unterteilung des Modells in 30 cm Bodenschichten wurde die Dränage für die mGROWA-Modellierung auf eine Tiefe von 90 cm gesetzt.

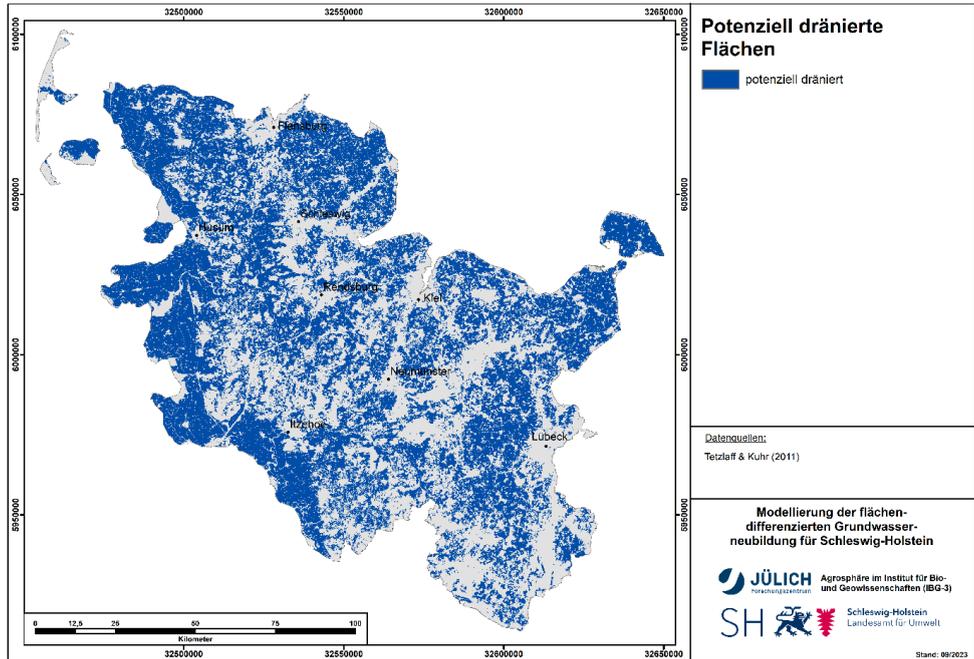


Abbildung 3-13: Potenziell drainierte Flächen.

### 3.7.4 Staunässe

Die Staunässe beschreibt die Art und den Grad der Vernässung stau- und haftwasserbeeinflusster Böden bezogen auf das gesamte Bodenprofil. Im mGROWA-Modell wird auf den staunässebeeinflussten Böden ein Zwischenabfluss berechnet, außer auf Drainageflächen (s. Kap. 2.6).

Der Datensatz für den Staunässegrad wurde aus den 25 m-Rastern für Vernässungsgrad und Grundwasserstufe von Tetzlaff und Kuhr (2011) abgeleitet. Für Rasterzellen, die sowohl einen Vernässungsgrad als auch oberflächennahes Grundwasser aufweisen, wurde kein Staunässegrad zugewiesen. Für die Rasterzellen mit Vernässungsgrad und ohne Grundwassereinfluss wurde der Staunässegrad als äquivalent zum Vernässungsgrad erachtet. Der Datensatz wurde dann auf das 100 m-Modellraster aggregiert (Abb. 3-14). Es zeigt sich, dass die meisten Flächen mit Staunässeböden im Östlichen Hügelland zu finden sind.

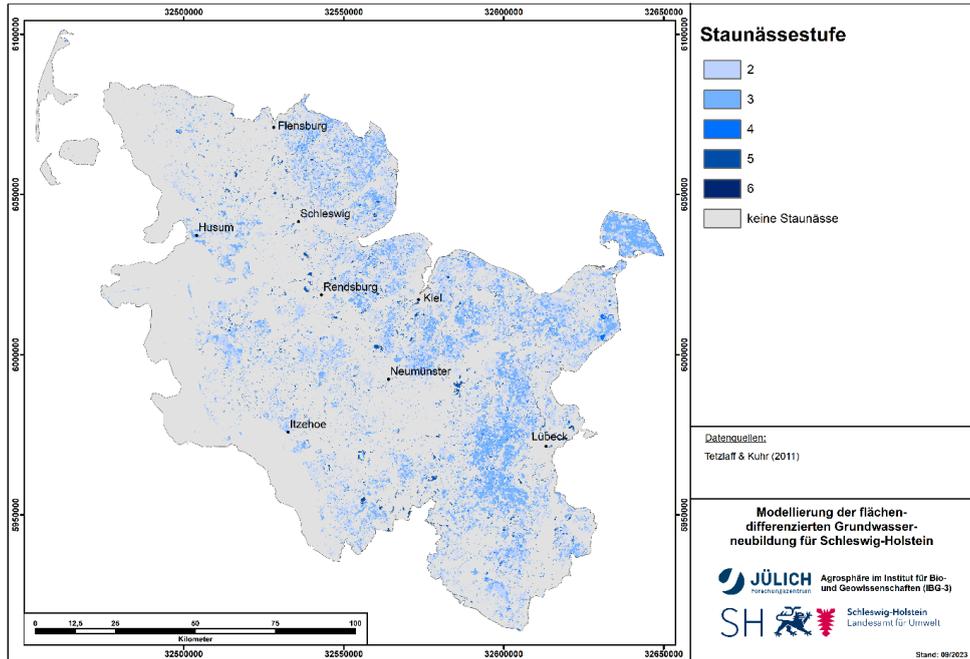


Abbildung 3-14: Stauäsestufe.

### 3.7.5 Feldkapazität

Die Feldkapazität ist bei grundwasser- und stauäsefreien Böden das wesentliche Maß für den Wassergehalt, der zwei bis drei Tage nach einer längeren Niederschlagsperiode gegen die Schwerkraft im Boden gehalten werden kann. Die Höhe der Feldkapazität ist in erster Linie abhängig von der Korngrößenverteilung, dem Bodengefüge sowie dem Gehalt an organischer Bodensubstanz. Die vom LfU für die BÜK250 zur Verfügung gestellte Datenbank enthält die Feldkapazität der Bodenschichten für alle Bodenprofile. Abb. 3-15 zeigt die Karte der Feldkapazitäten, gemittelt über alle sieben modellierten Bodenschichten. Der Einfluss der Bodentypen ist deutlich (vgl. Abb. 3-10), insbesondere die sehr hohen Werte der Feldkapazität in den Marschböden im Westen. In der Schleswig-Holsteinischen Geest sind die Werte etwas niedriger als im Östlichen Hügelland.

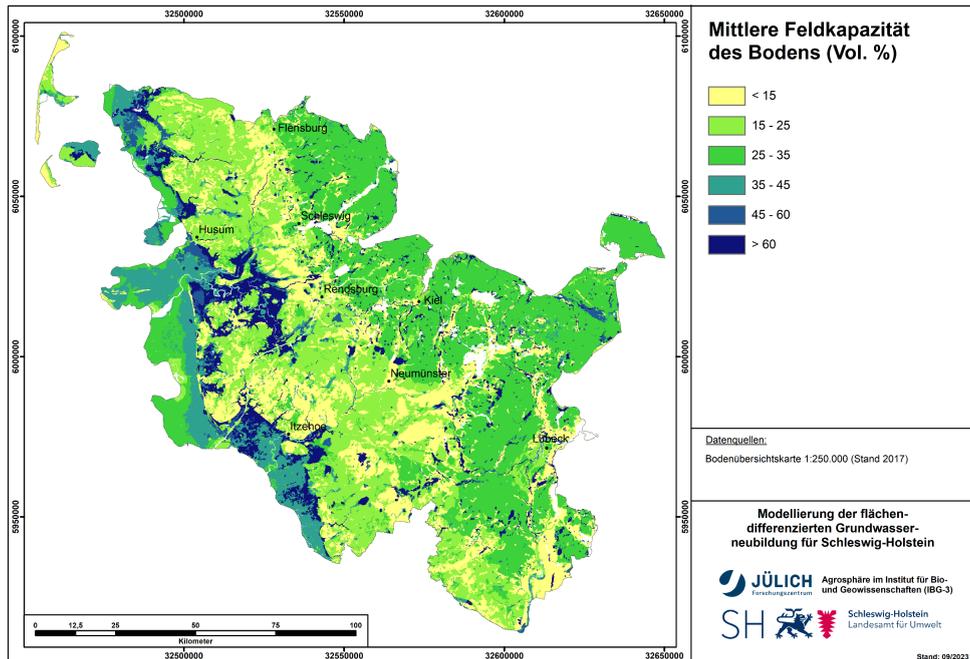


Abbildung 3-15: Mittlere Feldkapazität des Bodens.

### 3.7.6 Nutzbare Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität ist bei grundwasser- und stauanässefreien Böden das wesentliche Maß für den Wassergehalt eines Bodens, der von den Pflanzen genutzt werden kann. Im Hinblick auf den Wasserhaushalt hat die nutzbare Feldkapazität einen großen Einfluss auf die tatsächliche Evapotranspiration von Standorten. Bodenphysikalisch ist die nutzbare Feldkapazität der Teil der Feldkapazität, der für die Vegetation erreichbar ist und im Boden mit Saugspannungen zwischen pF-Werten von ca. 1,8 - 2,5 (Wassersättigung) und ca. 4,2 (permanenter Welkepunkt) gespeichert wird. Sie errechnet sich je Bodenhorizont aus dem Anteil der Bodenarten bei mittlerer Lagerungsdichte, korrigiert durch volumenprozentuale Abschläge für den Skelettanteil bzw. durch Zuschläge für den Humusgehalt.

Die nutzbare Feldkapazität ist bei Lehm- und Schluffböden, d. h. bei Böden, die einen relativ hohen Mittelporenanteil aufweisen, am größten. Bodenporen mit einem Durchmesser von mehr als 10 µm (Groporen) können das Bodenwasser nicht kapillar festhalten. Bei Sandböden wird die nutzbare Feldkapazität deshalb durch die geringen Wassergehalte bei Feldkapazität beschränkt. Bei Tonböden wirken sich die hohen Totwasseranteile negativ auf die nutzbare Feldkapazität aus. Bei einer Porengröße unter 0,2 µm (Feinporen) wird das Wasser im Boden durch Adhäsionskräfte so stark im Boden festgehalten, dass die Pflanzenwurzeln es nicht mehr entnehmen können.

Die vom LfU für die BÜK250 zur Verfügung gestellte Datenbank enthält die nutzbare Feldkapazität der Bodenschichten für alle Bodenprofile. Abb. 3-16 zeigt die Karte der nutzbaren Feldkapazität, gemittelt über alle sieben modellierten Bodenschichten. Wie erwartet, sind die räumlichen Muster ähnlich zu denen der Feldkapazität.

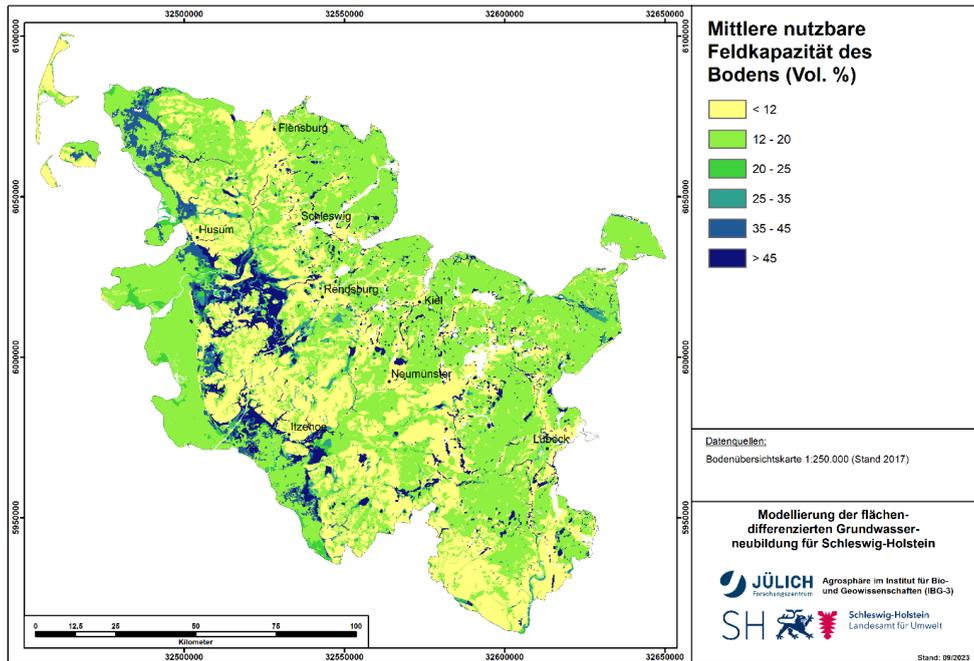


Abbildung 3-16: Mittlere nutzbare Feldkapazität des Bodens.

### 3.8 Bindige Deckschichten

In der bisherigen GROWA-Modellierung für Schleswig-Holstein (Tetzlaff et al., 2017) wurde der Wasserhaushalt in grundwasserfernen Regionen mit bindigen Deckschichten ohne Einbeziehung der Mächtigkeit der bindigen Deckschichten durchgeführt. Dadurch wurde die Grundwasserneubildungshöhe bei der Modellierung überschätzt.

Aus diesem Grunde wurden die Gebiete mit bindigen Deckschichten in diesem Projekt als eigenständige Gebietseinheit ausgewiesen. Ausgehend von der Beobachtung, dass sich mächtige Geschiebemergel bei Bohrungen und Stichen häufig als „trocken“ darstellen - also ähnlich wie undurchlässige Grundwasserdeckschichten in Festgesteinsregionen - wurde für nicht grundwasserbeeinflusste Rasterzellen mit Geschiebemergel eine Abflusseparationsmethode umgesetzt, die bei der mGROWA-Modellierung ansonsten nur in Festgesteinsregionen zur Anwendung kommt. Konkret wird angenommen, dass die Prozesse der Grundwasserneubildung in Gebieten, die durch bindige Deckschichten dominiert werden, ähnlich ablaufen wie in Flächen, die durch Festgesteine dominiert werden. Folglich werden bei diesen Standortbedingungen Base-Flow-Indizes zugewiesen, die angeben, welcher Anteil des Sickerwassers, das die unterste modellierte Bodenschicht passiert hat, zu Dränabfluss bzw. natürlichem Zwischenabfluss wird, und welcher Anteil zur Grundwasserneubildung beiträgt.

Das Raster der BFI-Werte basiert auf einem Datensatz der Mächtigkeit der bindigen Deckschichten in Schleswig-Holstein. Im Rahmen einer Studie zur Ermittlung der Nitratreinträge in das Grundwasser wurde dieser Datensatz vom Kunkel und Wendland (2020) wie folgt abgeleitet: Gebiete mit bindigen Deckschichten wurden aus der vom LfU erstellten WRRL-Karte 2003 „Verbreitung bindiger Deckschichten an der Oberfläche“ entnommen. Die Ermittlung der Sickerstrecke in den Grundwasserdeckschichten bis zur Grundwasseroberfläche erfolgte auf Basis der Differenz der Topographie der Geländeoberfläche und der Oberfläche des Oberen Aquifers aus Tetzlaff et al. (2017). Die effektive Mächtigkeit der Deckschicht (oberhalb des

Grundwasserleiters) wurde dann aus der Mächtigkeit der Deckschicht und der Lage des Grundwasserspiegels abgeleitet. Das aus diesem Projekt abgeleitete Raster der effektiven Mächtigkeit der Deckschicht ist in Abb. 3-17 wiedergegeben.

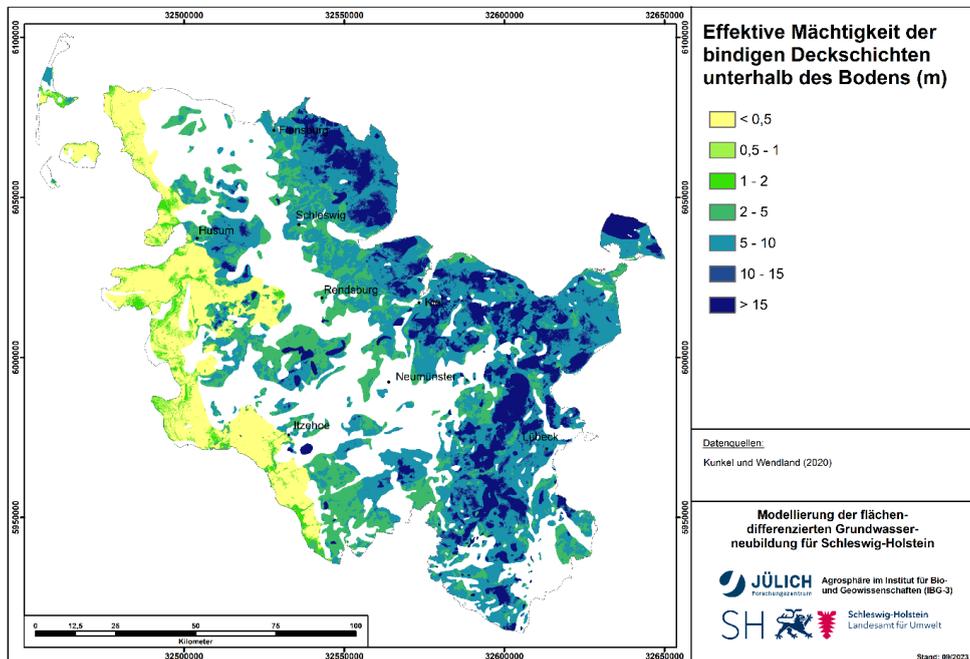


Abbildung 3-17: Effektive Mächtigkeit der bindigen Deckschichten unterhalb des Bodens.

### 3.9 Relevante Standorteigenschaften zur Separation des Gesamtabflusses

Abb. 3-18 zeigt die im Rahmen der mGROWA-Modellierungen verwendete räumliche Verteilung der für die Separation des Gesamtabflusses in die Komponenten des Direktabflusses und der Grundwasserneubildung relevanten Standorteigenschaften (s. Kap. 2.6). Alle abflussrelevanten Standorteigenschaften können generell auch in Kombination mit Versiegelungsgraden vorkommen. Ist der Versiegelungsgrad größer Null, wird vor der weiteren Abflussseparation zunächst anteilig der urbane Direktabfluss abgetrennt (s. Kap. 2.3.2).

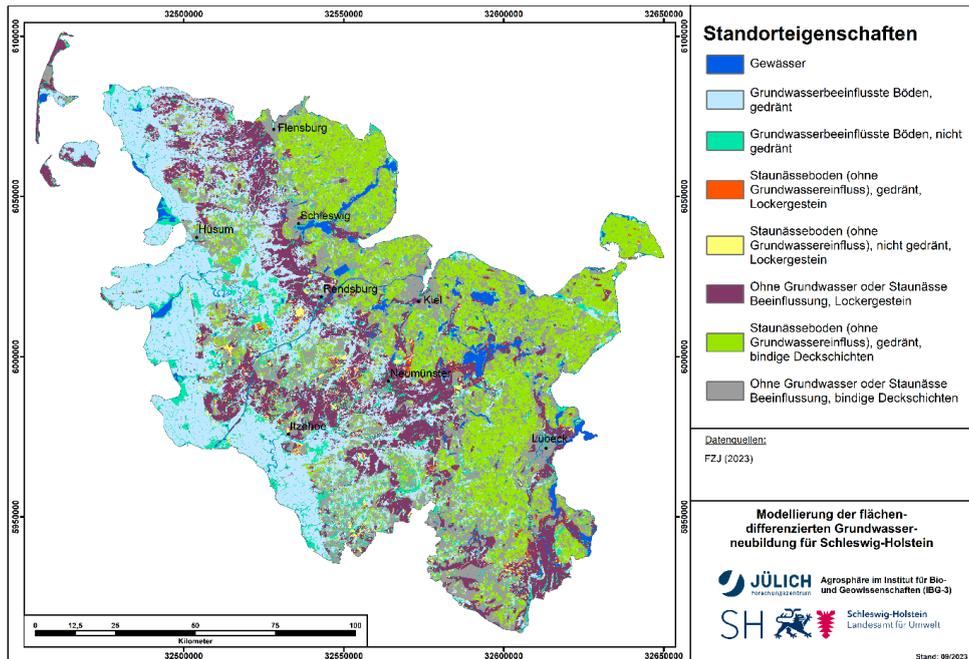


Abbildung 3-18: Für die Separation des Gesamtabflusses in die Direktabflusskomponenten und die Grundwasserneubildung relevante Standortigenschaften.

### 3.10 Abflussdaten und Einzugsgebietsabgrenzungen

Für eine hinreichende Kalibrierung des mGROWA-Modells sowie eine abschließende Validierung der Modellergebnisse ist es notwendig, auf die gemessenen Abflusswerte von möglichst vielen Teileinzugsgebieten zurückgreifen zu können. Um die Eignung des Modells für unterschiedliche Landnutzungen, pedologische und topographische Eigenschaften nachzuweisen, sollte bei der Auswahl der betrachteten Einzugsgebiete eine möglichst große Anzahl angestrebt werden.

Das LfU stellte dem FZJ Abflussdaten für 145 Abflussstationen in Schleswig-Holstein mit täglichen Abflusswerten für den Zeitraum 01.01.1981 - 19.05.2021 zur Verfügung. Um aus diesem Datenpool die für die Validierung des mGROWA-Modells geeigneten pegelbezogenen Einzugsgebiete auszuwählen, wurden in einem ersten Schritt Datenlücken in den Abflusswerten von weniger als 30 Tagen durch lineare Interpolation gefüllt. Dann wurde für jede Station die längste Anzahl von hydrologischen Jahren mit ununterbrochenen Daten ermittelt und die Stationen mit Datenreihen von weniger als 10 Jahren verworfen. Anhand dieser Kriterien wurden 20 Stationen für die Auswertung aussortiert.

Für die übrigen 125 Stationen wurden - sofern vorhanden - bereits abgegrenzte Einzugsgebiete aus Tetzlaff et al. (2017) verwendet. Für die wenigen Pegel, für die bisher kein Einzugs-

gebiet abgegrenzt worden war, wurden die entsprechenden Einzugsgebiete anhand des digitalen Höhenmodells, einer Shape-Datei mit Wasserlinien und Satellitenbildern abgeleitet. In Tabelle 3-5 sind alle Stationen aufgeführt, die im Zuge der Analyse aussortiert wurden.<sup>3</sup>

Tabelle 3-5: Für die Modellvalidierung aussortierte Einzugsgebiete.

Stationen	Grund für den Ausschluss
111057, 111058, 114399, 114416, 114582, 114583, 114593, 114606, 114611, 114614, 114615, 114616, 114621, 114631, 114633, 114634, 114636, 114638, 114644, 114645	Weniger als 10 Jahre kontinuierliche Daten verfügbar.
114126, 114198, 114235	Ein wesentlicher Teil der Einzugsgebiete liegt außerhalb Schleswig-Holsteins.
114383	Die zur Ableitung der Einzugsgebiete verwendeten Datensätze enthielten widersprüchliche Informationen.
114422, 114440	Es besteht eine Flussverzweigung vor der Abflussstation.
114564	Die Station liegt an einem Ende des Oldenburger Grabens, der durch Ost-Holstein fließt und Teile der Ostsee verbindet. Daher ist es schwierig, das Einzugsgebiet zu definieren.
111112	Die Station liegt an einer Spülschleuse.
114079, 114324	Erhebliche Wasserentnahmen in relativ kleinen Einzugsgebieten. Die Hypothese, dass diese Einzugsgebiete stark anthropogen beeinflusst sind, wird durch den geringen „rainfall-runoff“-Koeffizienten in den Einzugsgebieten gestützt.
114105, 114145	Wie in LANU (2002) berichtet fließt ein erheblicher Teil des Netto-Gesamtabflusses unterirdisch aus dem Einzugsgebiet ab.
114246	Ein Vergleich mit benachbarten Einzugsgebieten mit ähnlichen Eigenschaften deutet darauf hin, dass es unwahrscheinlich ist, dass der beobachtete mittlere Abflusswert den simulierten Netto-Gesamtfluss aus dem Einzugsgebiet widerspiegelt.

Für die Auswertung des Gesamtabflusses sind die 112 verbleibenden Stationen und deren zugehörige Einzugsgebiete in Abb. 3-19 dargestellt. Die Einzugsgebiete decken einen guten Teil des Landes ab, jedoch stehen in der westlichen Region deutlich weniger Einzugsgebiete für die Modellvalidierung zur Verfügung.

<sup>3</sup> Für das Einzugsgebiet, das der Station 114564 entspricht, ergab eine Analyse der beobachteten Abflüsse im Vergleich zu den entsprechenden klimatischen Inputs, dass die Abflusswerte für die hydrologischen Jahre 2014 und 2015 als unzuverlässig anzusehen sind. Da dies das größte Einzugsgebiet ist, für das Daten für die Validierung zur Verfügung standen, wird es als wichtiges Einzugsgebiet für die Modellvalidierung angesehen. Daher wurden diese beiden Jahre aus den Zeitreihen entfernt und die Validierung wurde mit den Daten für die 9 hydrologischen Jahre vor und 5 Jahre nach diesem Zeitraum abgeschlossen.

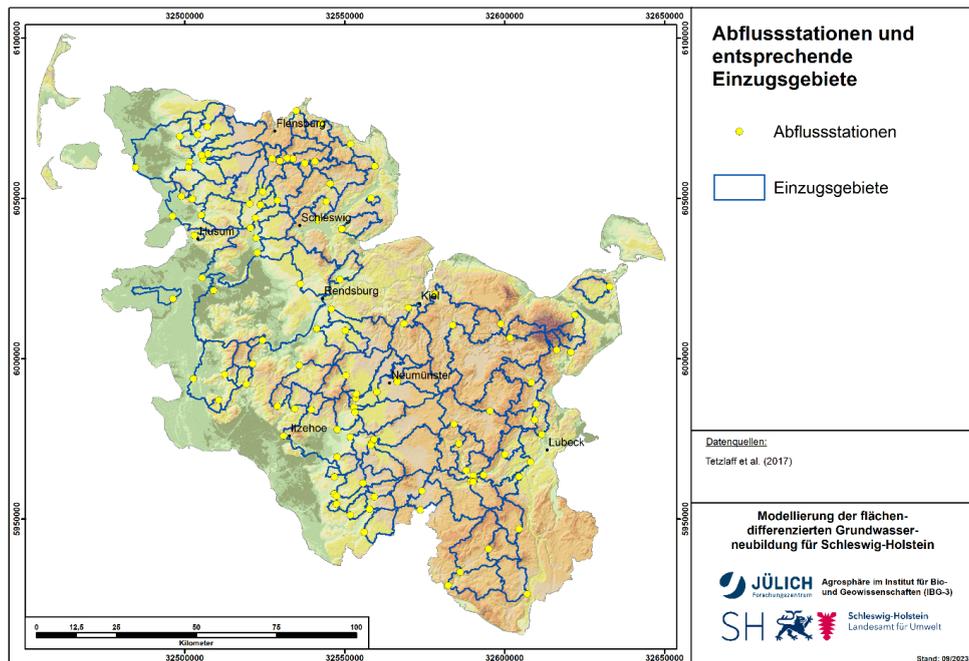


Abbildung 3-19: Zur Abflussvalidierung geeignete pegelbezogene Einzugsgebiete.

## 4 Modellergebnisse

### 4.1 Übersicht zu den Modellergebnissen

Die Modellierung des Wasserhaushalts mit dem Modell mGROWA erfolgte flächendifferenziert nach der in Kap. 2 beschriebenen Vorgehensweise. Quantifiziert wurden die folgenden Wasserhaushaltsgrößen:

- Tatsächliche Evapotranspiration
- Gesamtabfluss
- Sickerwasser
- Direktabfluss:
  - *Oberflächenabfluss*
  - *Direktabfluss aus urbanen Flächen*
  - *Abfluss über Dränagen*
  - *Natürlicher Zwischenabfluss*
- Grundwasserneubildung

mGROWA ermittelt die Wasserhaushaltsparameter für jede der ca. 1,56 Millionen Rasterzellen in täglichen Zeitschritten. Abb. 4-1 zeigt beispielhaft wichtige Eingangs- und Ausgangsgrößen als Zeitreihen im Verlauf eines Jahres für eine Rasterzelle.

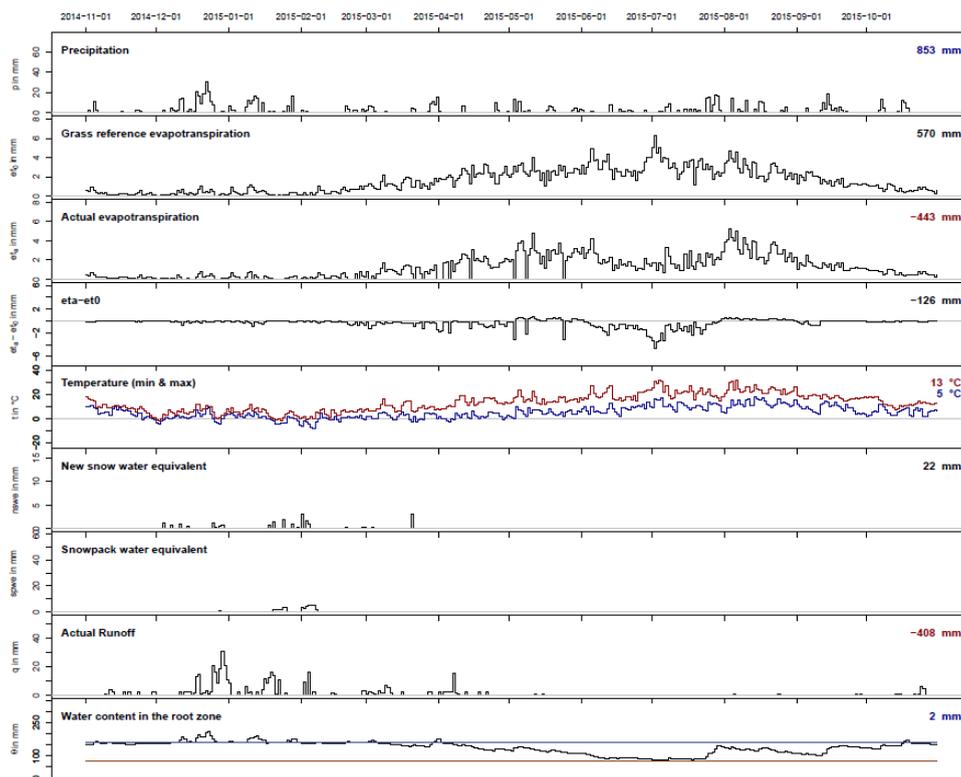


Abbildung 4-1: mGROWA-Ergebnisse für eine beispielhaft ausgewählte Rasterzelle als Zeitreihen in Tagesschritten.

Die mGROWA-Modellerggebnisse in den folgenden Abschnitten werden als langjährige Mittelwerte (1991-2020) dargestellt. Die gleichen Abbildungen für die Zeiträume 1971-2000 und 1981-2010 befinden sich im Appendix A.

## 4.2 Tatsächliche Evapotranspiration

Mit Werten von mehr als 600 mm/a tritt die höchste tatsächliche Evapotranspiration in der Periode 1991-2020 in der Marschregion an der Westküste auf (Abb. 4-2). Hauptgrund dafür ist die Grundwasserbeeinflussung der Marschböden (vgl. Abb. 3-11 und 3-12), die dazu führt, dass durch den kapillaren Aufstieg und die direkte Evapotranspiration aus dem Grundwasser eine hohe Wassermenge für den Verdunstungsprozess zur Verfügung steht. Für die anderen Landschaftsräume Schleswig-Holsteins liegt die tatsächliche Evapotranspiration zwischen 400 und 600 mm/a, wobei regional keine offensichtlichen Trends erkennbar sind. Dies ist dadurch bedingt, dass sich Standortbedingungen, die eine hohe tatsächliche Evapotranspiration begünstigen, und Standortbedingungen, die eine geringe tatsächliche Evapotranspiration begünstigen, in ihrer Wirkung ausgleichen. So ist das Wasserspeichervermögen der Böden im Östlichen Hügelland zwar höher als in der Geest, jedoch sind die Niederschlagshöhen (Abb. 3-3) dort geringer. Kleinstäumige Bereiche mit tatsächlichen Evapotranspirationshöhen unter 400 mm/a zeigen sich landesweit ausschließlich in Gebieten mit einem hohen Anteil an versiegelter Fläche, vor allem in den Städten. Das räumliche Mittel der mittleren jährlichen tatsächlichen Evapotranspiration für die Periode 1991-2020 beträgt 488 mm.

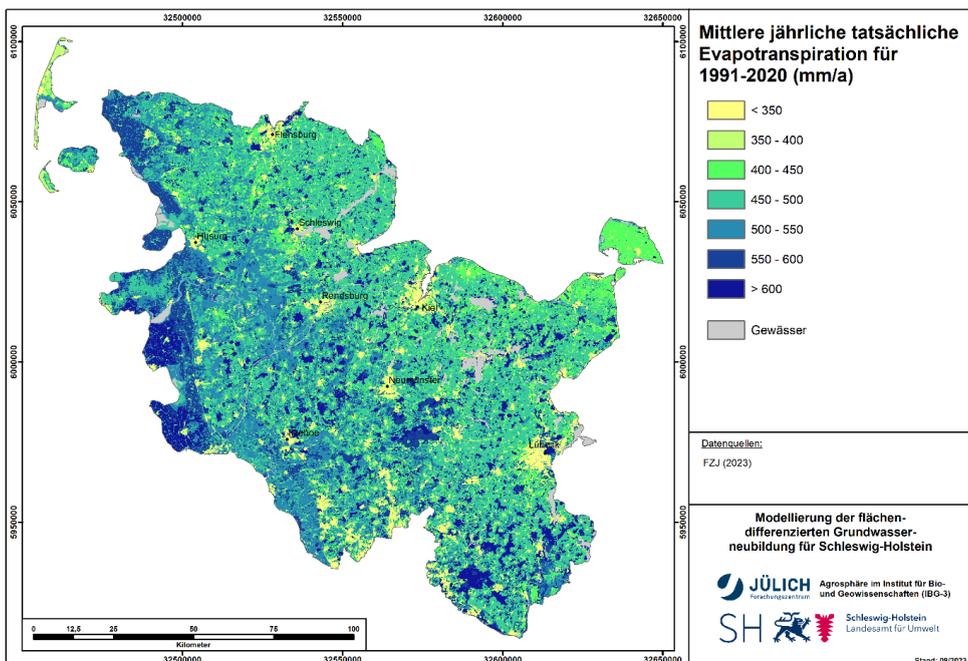
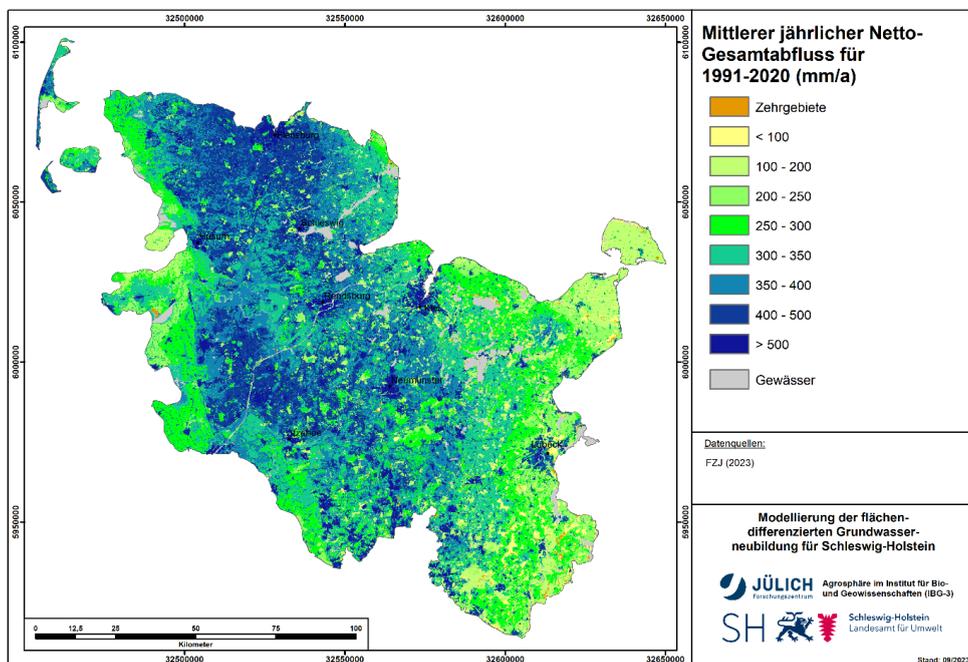


Abbildung 4-2: Mittlere jährliche tatsächliche Evapotranspiration (1991-2020).

### 4.3 Gesamtabfluss

Wie bereits in Kap. 2.6 ausgeführt, wird beim Gesamtabfluss in Netto-Gesamtabfluss und Brutto-Gesamtabfluss unterschieden. Während der Netto-Gesamtabfluss (Abb. 4-3) den gesamten erzeugten Gesamtabfluss abzüglich der dem Modellelement vertikal zufließenden Wassermenge in den Bilanzraum aus dem Grundwasser beschreibt, stellt die Brutto-Gesamtabflusshöhe (Abb. 4-4) den Gesamtabfluss dar, der auf einer Zelle ohne Anrechnung des kapillaren Aufstiegs und der direkten Evapotranspiration aus dem Grundwasser gebildet wird. Während der Netto-Gesamtabfluss für die Validierung des Wasserhaushaltsmodells an Pegeln verwendet wird, ist der Brutto-Gesamtabfluss entscheidend für die Abflusseparation. Die höchsten Werte des Netto-Gesamtabflusses (Abb. 4-3) finden sich mit Werten, die oft mehr als 350 mm/a betragen, in der Schleswig-Holsteinischen Geest. Im Westen, d. h. in der Marschregion, sind die Gesamtabflusshöhen aufgrund der höheren tatsächlichen Evapotranspiration mit Werten zwischen 100 und 300 mm/a geringer. Im Östlichen Hügelland sorgen geringere Niederschlagsmengen und eine höhere tatsächliche Evapotranspiration dafür, dass die Werte für den Netto-Gesamtabfluss häufig unter 200 mm/a liegen. Das räumliche Mittel des mittleren jährlichen Netto-Gesamtabflusses für die Periode 1991-2020 beträgt 330 mm.



*Abbildung 4-3: Mittlerer jährlicher Netto-Gesamtabfluss (1991-2020). Dieser entspricht dem auf einer Zelle gebildeten Abfluss abzüglich der dem Modellelement vertikal zufließenden Wassermenge aus dem Grundwasser ( $q_{e,gw}$ ). Der mittlere jährliche Netto-Gesamtabfluss wird für die Validierung des modellierten Gesamtabflusses an pegelbezogenen Einzugsgebieten verwendet.*

Wie die Karte des Brutto-Gesamtabflusses (Abb. 4-4) zeigt, sind die ausgewiesenen Werte bei grundwasserfernen Standorten identisch mit dem Netto-Gesamtabfluss (Abb. 4-3). Nur bei grundwasserbeeinflussten Flächen (vgl. Kap. 3.7.2) weichen die Werte voneinander ab. So übersteigen die Werte des Brutto-Gesamtabflusses in der Marschregion oftmals 450 mm/a. Das räumliche Mittel des mittleren jährlichen Brutto-Gesamtabflusses für die Periode 1991-2020 beträgt 371 mm.

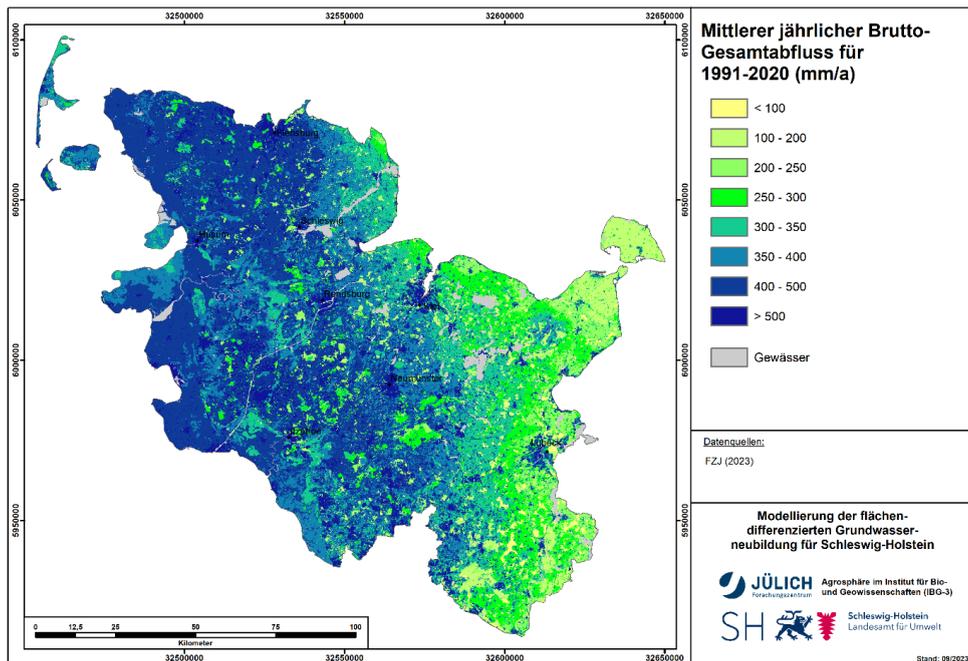


Abbildung 4-4: Mittlerer jährlicher Brutto-Gesamtabfluss (1991-2020). Dieser entspricht dem auf einer Zelle gebildeten Abfluss **ohne** Anrechnung der vertikal zufließenden Wassermenge aus dem Grundwasser. Der mittlere jährliche Brutto-Gesamtabfluss wird für die Separation des Gesamtflusses in die Abflusskomponenten verwendet. Auf grundwasserfernen Standorten entspricht der Brutto-Gesamtabfluss dem Netto-Gesamtabfluss (Abb. 4-3).

#### 4.4 Oberflächenabfluss

Abb. 4-5 zeigt die Rasterzellen, in denen es eine Oberflächenabflusskomponente für Flächen mit einer hydraulischen Anbindung an das Gewässernetz gibt. Die Größenordnung des mittleren jährlichen Oberflächenabflusses auf diesen Flächen liegt meist unter 10 mm/a. Oberflächenabfluss wird nur auf 6,2 % der Fläche Schleswig-Holsteins gebildet, am häufigsten im Östlichen Hügelland aufgrund des höheren Reliefs.

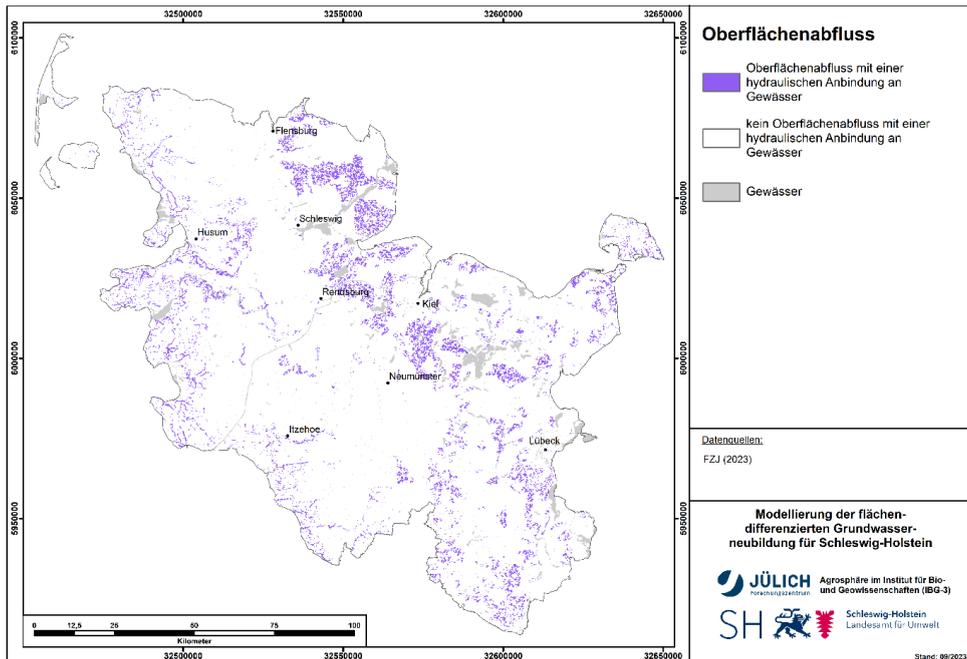


Abbildung 4-5: Oberflächenabfluss von Teilflächen, die an das Gewässernetz angebinden sind (1991-2020).

#### 4.5 Urbaner Direktabfluss

Nach dem in Kap. 2.6 beschriebenen Berechnungsansatz wird die tatsächliche Evapotranspiration bzw. die Abflussbildung in urbanen Flächen mit Hilfe von zwei unterschiedlich definierten Speicherfunktionen simuliert. Zum einen wird die tatsächliche Evapotranspiration bzw. die Abflussbildung für den unversiegelten Anteil (Boden mit Vegetation oder freie Wasseroberfläche) berechnet. Zum anderen wird die tatsächliche Evapotranspiration bzw. die Abflussbildung für versiegelte Flächen berechnet. In der Konsequenz wird der Wasserhaushalt auf einer relativ großen Anzahl von Rasterzellen entsprechend des durch den Versiegelungsgrad vorgegebenen Flächenverhältnisses anteilig aus zwei Teilergebnissen zusammengesetzt.

Abb. 4-6 zeigt den mittleren jährlichen urbanen Direktabfluss nur für den Anteil der Abflussbildung, der von den versiegelten Flächen stammt. Der urbane Direktabfluss kann in einigen stark versiegelten innerstädtischen Gebieten mehr als 300 mm/a erreichen, in den für Schleswig-Holstein typischen schwach versiegelten ländlichen Gebieten liegt er jedoch in der Regel unter 100 mm/a.

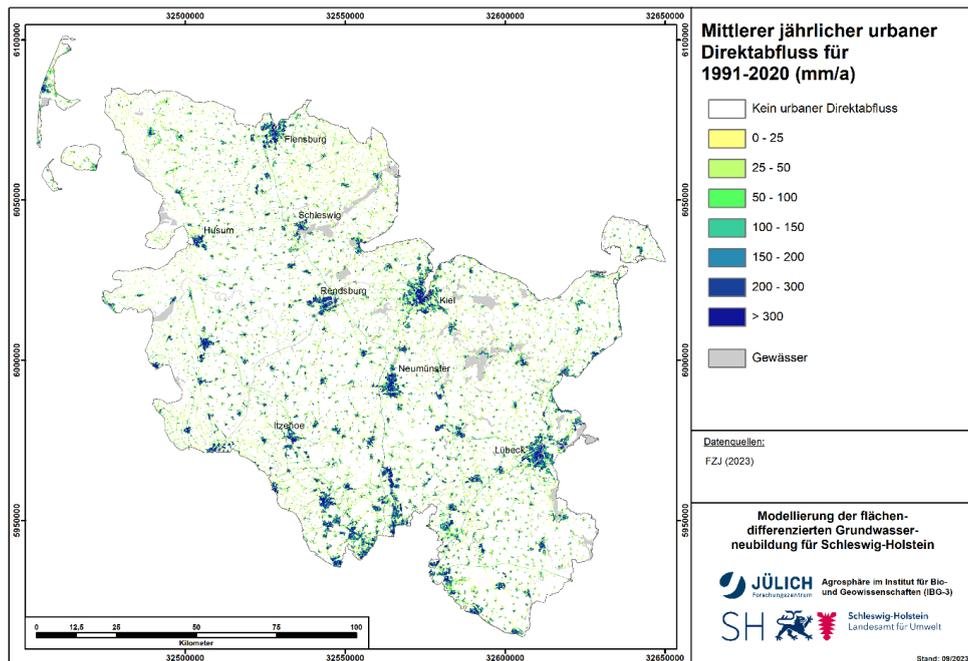


Abbildung 4-6: Mittlerer jährlicher urbaner Direktabfluss (1991-2020).

## 4.6 Sickerwasserhöhe

Die Sickerwasserhöhe errechnet sich aus dem Brutto-Gesamtabfluss (Abb. 4-4) minus dem Oberflächenabfluss (Kap. 4.3) und dem urbanen Direktabfluss (Abb. 4-6). Da die Werte für den mittleren jährlichen Oberflächenabfluss und den urbanen Direktabfluss in den meisten Gebieten Schleswig-Holsteins im Vergleich zum Brutto-Gesamtabfluss gering sind, weicht die mittlere jährliche Sickerwasserhöhe nur leicht vom Brutto-Gesamtabfluss ab. Aus diesem Grund wird auf eine Karte und Beschreibung der räumlichen Verteilung der Sickerwasserhöhe in diesem Bericht verzichtet.

## 4.7 BFI-Werte

Wie in Kap. 2.3 beschrieben, wird im mGROWA-Modell in der gesamten ungesättigten Zone die Wasserbewegung in vertikaler Richtung bilanziert. Per Definition trägt in diesem Fall das gesamte Sickerwasser, das die unterste Modellschicht verlässt, zur Grundwasserneubildung bei, wenn die Grundwasseroberfläche erreicht wurde. Für eine Reihe von Standortbedingungen wird der Gesamtabfluss jedoch anhand von BFI-Werten in die Direktabflusskomponenten und die Grundwasserneubildung separiert.

### 4.7.1 BFI-Werte für bindige Deckschichten

Wie in Kap. 2.6 ausgeführt, wurde die Modellierung des Wasserhaushalts in bindigen Deckschichten so modifiziert, dass die Abflussseparation basierend auf BFI-Werten erfolgte, die den prozentualen Anteil der Brutto-Grundwasserneubildung am Brutto-Gesamtabfluss angeben. Die Ausweisung der BFI-Werte erfolgte auf der Grundlage der effektiven Mächtigkeit der

bindigen Deckschichten (vgl. Abb. 3-17), wobei der BFI-Wert mit abnehmender Mächtigkeit der bindigen Deckschicht zunimmt (d. h., es ergibt sich ein höherer Anteil der Grundwasserneubildung am Gesamtabfluss). Die BFI-Werte der bindigen Deckschichten wurden in der Modellierung mit dem Ziel kalibriert, bei der Validierung der modellierten Grundwasserneubildungshöhen eine möglichst gute Modellanpassung an den Basisabfluss sicherzustellen (vgl. Kap. 4.10.2).

Bei der Kalibrierung auf der Grundlage der effektiven Mächtigkeit der bindigen Deckschichten ergaben sich die in Abb. 4-7 dargestellten BFI-Werte. Flächen mit einer Mächtigkeit der Deckschichten von weniger als 2 m wurde kein BFI zugewiesen. Bei Mächtigkeiten von 2 – 5 m wurde ein BFI von 0,60, bei Mächtigkeiten von 5 - 20 m ein BFI von 0,42 und bei Mächtigkeiten > 20 m wurde ein BFI von 0,25 zugewiesen. Flächen mit oberflächennahem Grundwasser (vgl. Abb. 3-11 und 3-12) wurden keine BFI-Werte zugewiesen. Die Fläche in Schleswig-Holstein, auf der BFI-Werte für bindige Deckschichten definiert wurden entspricht - nach Ausschluss der vom Grundwasser beeinflussten Flächen - 43 % der gesamten Landesfläche.

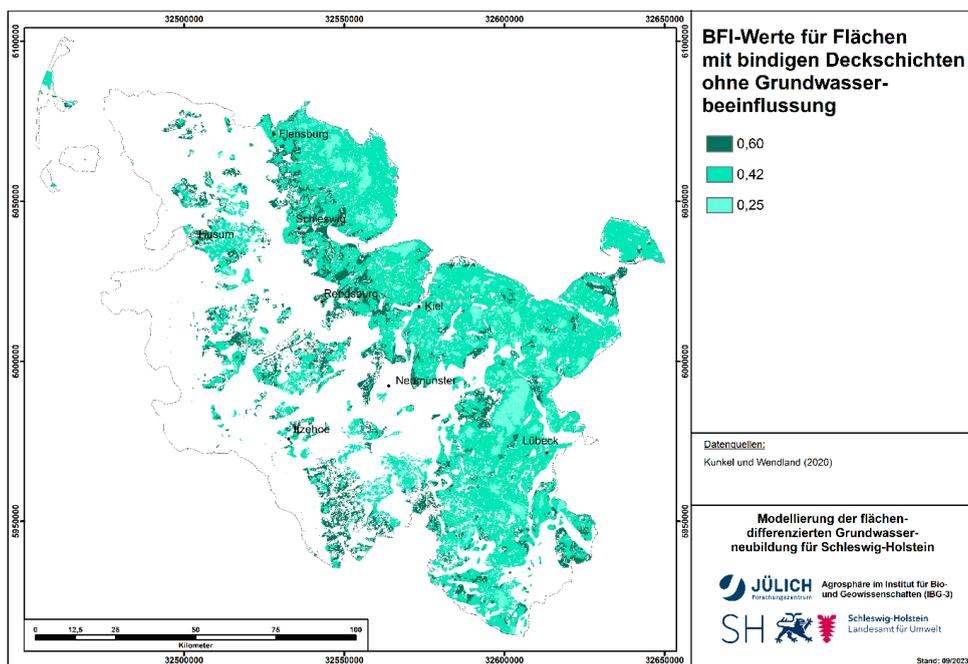


Abbildung 4-7: Zugewiesene BFI-Werte für Flächen mit bindigen Deckschichten ohne Grundwasserbeeinflussung.

#### 4.7.2 BFI-Werte für sonstige Flächen

Für die Flächen ohne bindige Deckschichten wurden BFI-Werte für undrained Standorte mit Staunässeeinfluss sowie für grundwasserferne Standorte mit einer Hangneigung auf der Grundlage des Staunässegrades und des Neigungsgrades ausgewiesen. Die räumliche Verteilung dieser BFI-Werte ist in Abb. 4-8 dargestellt.

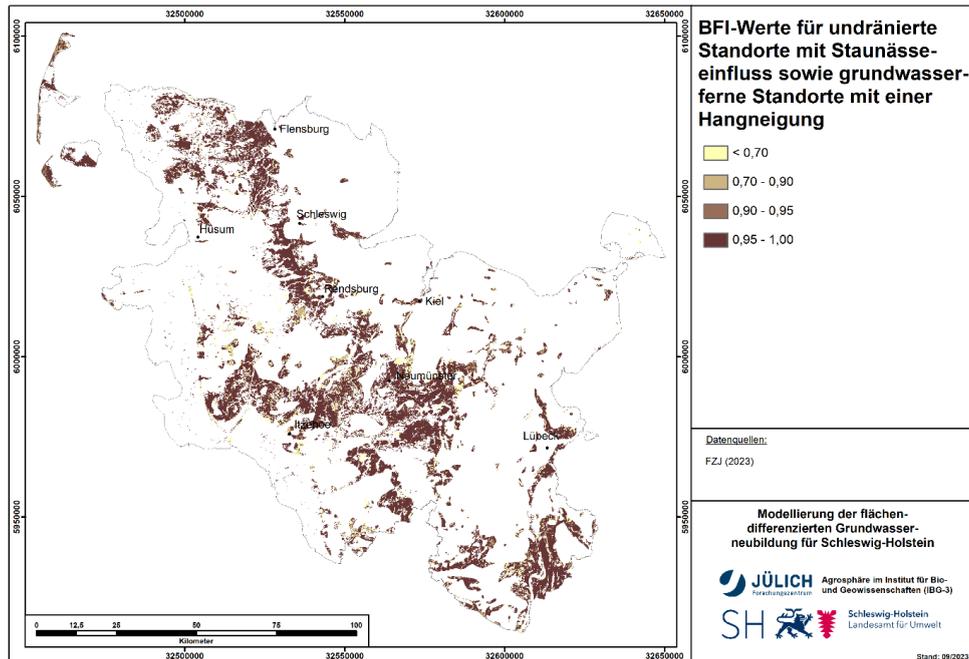


Abbildung 4-8: Base-Flow-Index (BFI) für Flächen ohne bindige Deckschichten und ohne Grundwasserbeeinflussung.

#### 4.8 Grundwasserneubildung

Basierend auf den Standorteigenschaften (Abb. 3-18) und den damit einhergehenden BFI-Werten (Abb. 4-7 und 4-8) wird der Gesamtabfluss in verschiedene Direktabflusskomponenten und die Grundwasserneubildung separiert.

Auf grundwasserbeeinflussten Standorten können in der Jahresbilanz negative Grundwasserneubildungshöhen auftreten, d. h. es findet eine Grundwasserzehrung statt, wenn die hauptsächlich im Winterhalbjahr stattfindende Sickerwasserbewegung geringer ist als der hauptsächlich im Sommerhalbjahr stattfindende kapillare Aufstieg in die Wurzelzone und die direkte Evapotranspiration aus dem Grundwasser. Viele der grundwasserbeeinflussten Standorte sind dräniert. In der langjährigen Jahresbilanz kann die verdunstende Wassermenge auch dort durch kapillaren Aufstieg die Niederschlagshöhe übersteigen.

Dies bedeutet aber nicht, dass es auf grundwasserbeeinflussten Standorten im Jahresverlauf nicht doch phasenweise zu einer Grundwasserneubildung kommen kann, speziell wenn der Grundwasserstand in den Sommermonaten abgesunken ist. Aus diesem Grund wird bei der Grundwasserneubildung bei grundwasserbeeinflussten Standorten in Netto-Grundwasserneubildung und Brutto-Grundwasserneubildung unterschieden (vgl. Kap. 2.6).

In die Berechnung der Netto-Grundwasserneubildung (Abb. 4-9) wird der kapillare Aufstieg und die direkte Evapotranspiration aus dem Grundwasser auf grundwasserbeeinflussten Standorten einbezogen. Die Brutto-Grundwasserneubildung (Abb. 4-10) entspricht der Wassermenge, die dem Grundwasser tatsächlich zufließt. Der kapillare Aufstieg und die direkte Evapotranspiration aus dem Grundwasser sind auf grundwasserbeeinflussten Standorten in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Zu beachten ist, dass keine Modellierung der Grundwasserneubildungsraten für Rasterzellen, die Gewässern entsprechen, durchgeführt wurde.

Die mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung ist in der Schleswig-Holsteinischen Geest am höchsten. Dies liegt vor allem daran, dass in dieser Region weniger oberflächennahes Grundwasser vorhanden ist und die BFI-Werte aufgrund des Fehlens flächenhaft verbreiteter bindiger Deckschichten relativ hoch sind. In der westlichen Elbmarsch ist der Brutto-Gesamtabfluss zwar am höchsten (vgl. Abb. 4-4), aber die Netto-Grundwasserneubildung ist aufgrund der Verdunstung aus oberflächennahem Grundwasser und aufgrund der künstlichen Entwässerung eines wesentlichen Teils des erzeugten Gesamtabflusses reduziert. Im Östlichen Hügelland ist der Gesamtabfluss aufgrund der klimatischen Bedingungen mit geringeren Jahresniederschlägen und höherer potenzieller Evapotranspiration generell geringer als in der Geest. Außerdem trägt ein kleinerer Teil des Sickerwassers in dieser Region wegen der geringeren Durchlässigkeit der bindigen Deckschichten zur Grundwasserneubildung bei. Das räumliche Mittel der mittleren jährlichen Netto-Grundwasserneubildung für 1991-2020 beträgt 151 mm/a, während die Brutto-Grundwasserneubildung 192 mm/a beträgt.

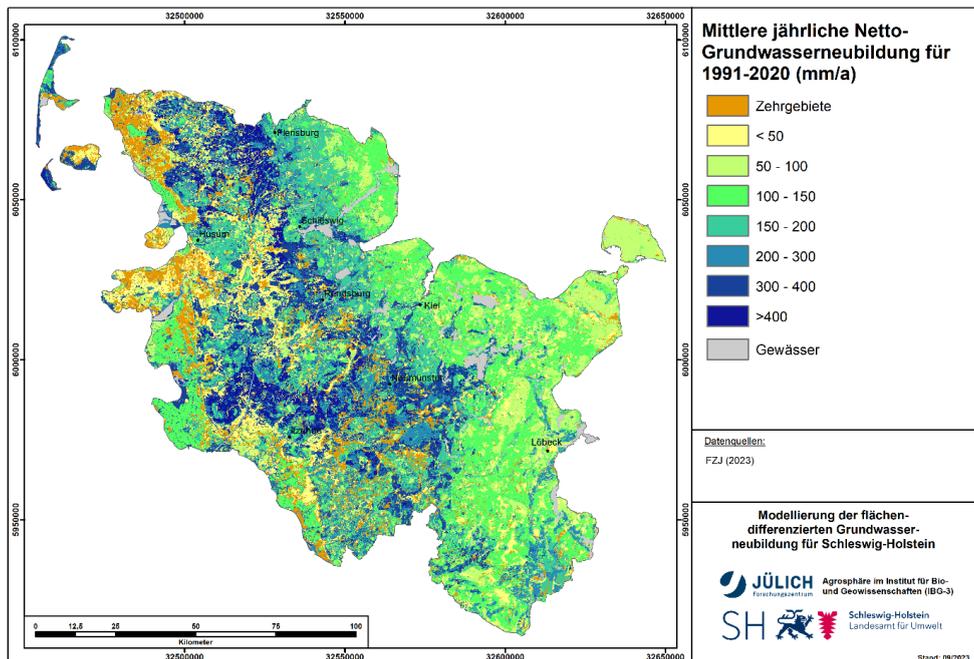


Abbildung 4-9: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung (1991-2020). Diese entspricht der auf einer Zelle gebildeten Grundwasserneubildung abzüglich der dem Modellelement vertikal zufließenden Wassermenge aus dem Grundwasser ( $q_{e,gw}$ ). Die mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung wird für die Validierung der modellierten Grundwasserneubildung an pegelbezogenen Einzugsgebieten verwendet.

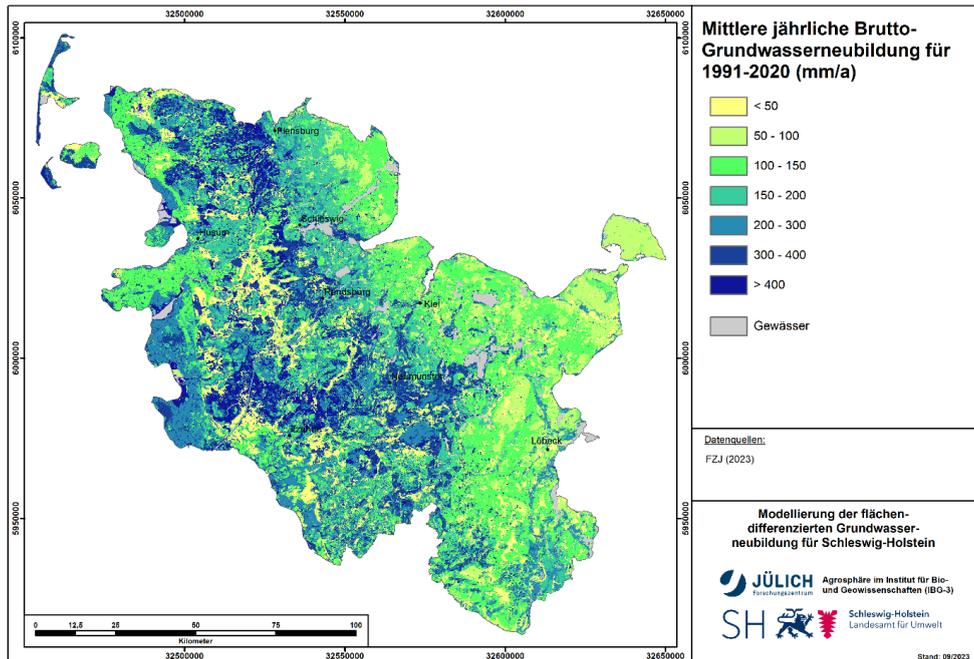


Abbildung 4-10: Mittlere jährliche Brutto-Grundwasserneubildung (1991-2020). Diese entspricht der auf einer Zelle gebildeten Grundwasserneubildung **ohne** Anrechnung der vertikal zufließenden Wassermenge aus dem Grundwasser. Auf grundwasserfernen Standorten entspricht die Brutto-Grundwasserneubildung der Netto-Grundwasserneubildung (Abb. 4-9).

#### 4.9 Natürlicher Zwischenabfluss und Drainageabfluss

Im mGROWA-Modell werden die über die Bodenpassage entwässernden Direktabflussanteile getrennt für die Abflusskomponenten „natürlicher Zwischenabfluss“ und „Abfluss aus Dränagesystemen“ ausgewiesen. In Abb. 4-11 und Abb. 4-12 werden die berechneten mittleren Direktabflüsse über den natürlichen Zwischenabfluss bzw. über Dränagen einander vergleichend gegenübergestellt.

Zur Bildung von natürlichem Zwischenabfluss kommt es dort, wo das Sickerwasser vor Erreichen des Grundwasserleiters eine wasserundurchlässige Schicht erreicht, so dass es lateral in der ungesättigten Zone abfließt bis es ein Oberflächengewässer erreicht. Dieser Zwischenabfluss entsteht nur auf Flächen, die nicht künstlich entwässert sind. Wie in Abb. 4-11 zu sehen ist, tritt natürlicher Zwischenabfluss hauptsächlich in den von bindigen Deckschichten dominierten Flächen auf. Die Werte des natürlichen Zwischenabflusses liegen zumeist unter 200 mm/a. Natürlicher Zwischenabfluss tritt auf insgesamt 27 % der Landfläche auf, mit einem Mittelwert von 129 mm/a für die entsprechenden Rasterzellen.

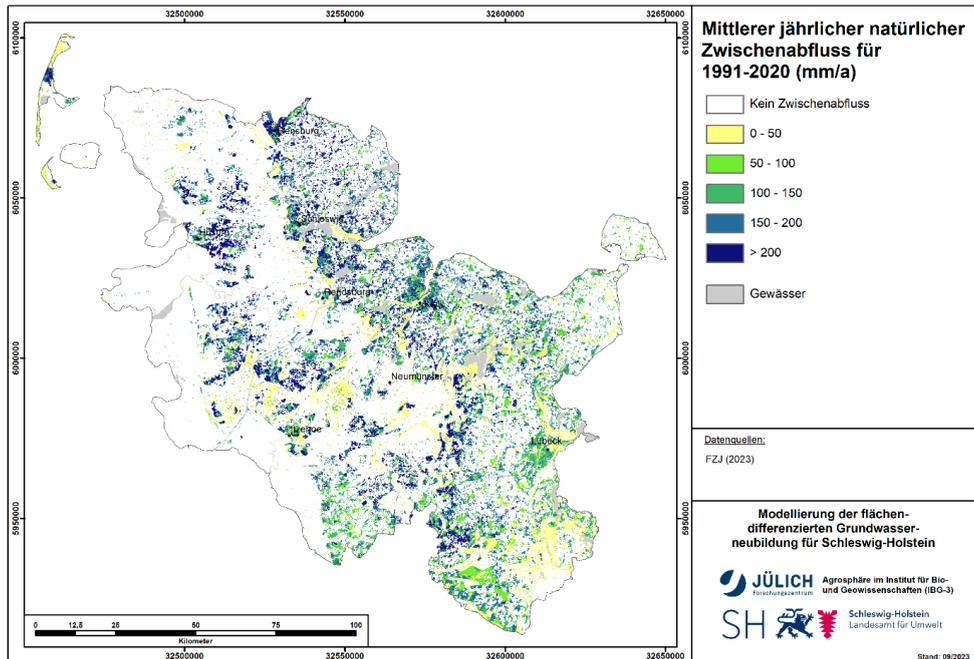


Abbildung 4-11: Mittlerer jährlicher natürlicher Zwischenabfluss (1991-2020).

Unter dem Oberbegriff „*Dränageabfluss*“ werden alle durch anthropogene Eingriffe geschaffenen künstlichen Abflusswege (Grabendränage, Rohrdränage) bezeichnet. Hydraulisch wirkt diese Abflusskomponente ähnlich wie der Zwischenabfluss, d. h. ein Vorfluter wird mit nur geringer Zeitverzögerung nach einem abflussauslösenden Niederschlagsereignis erreicht.

In der Marschregion führen hohe Niederschläge und ein hoher Grundwasserspiegel zu sehr hohen Werten des Dränageabflusses von manchmal mehr als 300 mm/a. Im Östlichen Hügelland, wo ein wesentlich geringerer Brutto-Gesamtabfluss auftritt, reduziert sich der Dränageabfluss auf Werte bis 200 mm/a. Für Flächen, die gedränt werden, liegt der räumliche Mittelwert bei 238 mm/a.

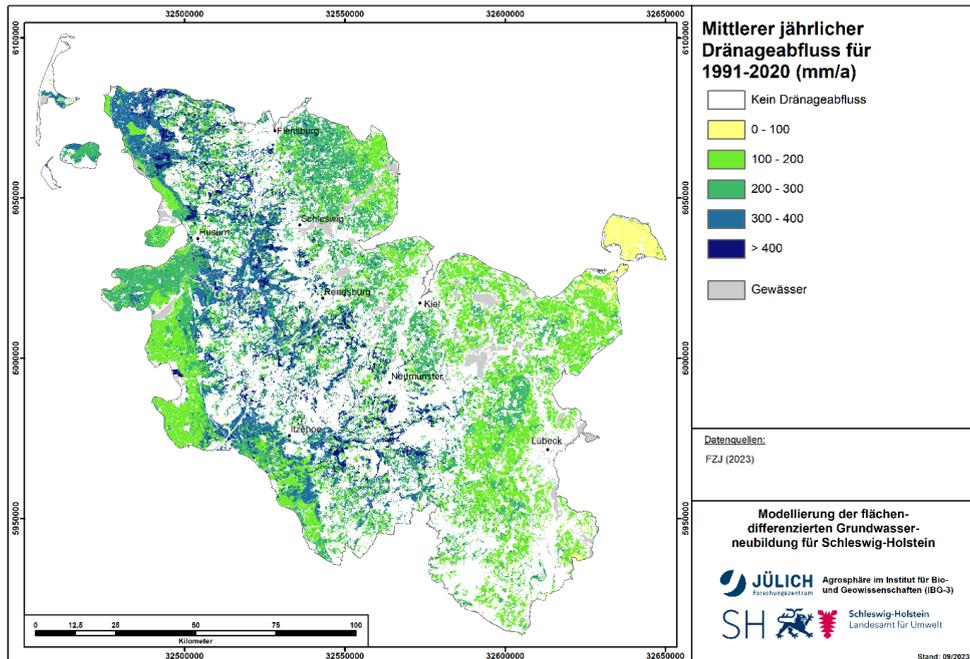


Abbildung 4-12: Mittlerer jährlicher Drainageabfluss (1991-2020).

## 4.10 Ergebnisvalidierung

Um Aussagen darüber treffen zu können, inwiefern die berechneten Wasserhaushaltsgrößen den tatsächlich vorliegenden Abflussverhältnissen entsprechen, wurde eine Validitätsüberprüfung durchgeführt. Die Zuverlässigkeit der mit mGROWA berechneten Abflusshöhen wurde durch einen Vergleich mit den an Pegeln gemessenen Abflüssen überprüft. Wie in Kap. 3.10 beschrieben, wurden Abflussdaten von 112 Stationen für den Zeitraum 1981 - 2021 und räumliche Informationen über deren zugehörige Einzugsgebiete für die Modellevaluation verwendet.

### 4.10.1 Überprüfung des berechneten Netto-Gesamtabflusses

Die Validierung wird immer für das gesamte Einzugsgebiet des jeweiligen Pegels durchgeführt. Zunächst wird eine Verschneidung der pegelbezogenen Einzugsgebiete mit den vom mGROWA-Modell flächendifferenziert berechneten Netto-Gesamtabflusshöhen vorgenommen. Die einzelnen Werte der Rasterzellen werden dann über die jeweiligen Einzugsgebiete integriert und mit den gemessenen Abflusshöhen verglichen. Wenn sich für eine hinreichend große Anzahl von Einzugsgebieten eine befriedigende Übereinstimmung ergibt, kann man davon ausgehen, dass mit dem zugrundeliegenden Modell repräsentative Aussagen erzielt werden.

Die für die Zeitreihe 1982-2020 berechneten Netto-Gesamtabflüsse wurden zunächst mit den Mittelwerten der mittleren Tagesabflüsse (MQ) der gleichen Zeitreihe<sup>4</sup> für alle 112 pegelbezogenen Einzugsgebiete verglichen (Abb. 3-19). Die Ergebnisse der Validierung sind in Abb.

<sup>4</sup> Beobachtete Abflussdaten sind für den Zeitraum vom 01.01.1981 bis zum 19.05.2021 verfügbar, d. h. mittlere Abflüsse für ganze hydrologische Jahre konnten nur für die Periode 1982 - 2020 berechnet werden.

4-13 dargestellt. Auf der linken Seite sind die Abflusswerte in m<sup>3</sup>/s dargestellt, während auf der rechten Seite die Werte in mm/a angegeben sind, gemittelt über das entsprechende Einzugsgebiet. An dieser Stelle ist es wichtig zu erwähnen, dass für jede Messstation der genaue Zeitraum, für den die beobachteten mittleren jährlichen Abflussdaten berechnet wurden, auch dem Zeitraum entspricht, für den der modellierte Netto-Gesamtabfluss für das entsprechende Einzugsgebiet berechnet wurde. Die gestrichelten Linien zeigen eine Abweichung von ±20 % von der 1:1-Linie. Für die meisten Teileinzugsgebiete liegen die Differenzen von berechneten und gemessenen Werten bei weniger als 20 %.

Um die Modellgüte zu quantifizieren, wurde eine Auswahl von Performance-Indizes verwendet. Das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ; Gl. 4-1) beschreibt die Abweichung der modellierten Werte von der Regressionslinie. Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen 0 und 1 einnehmen, wobei 1 eine perfekte Übereinstimmung mit der Regressionslinie entspricht. Das „Nash-Sutcliffe Efficiency“ ( $NSE$ ; Gl. 4-2) wurde für die hydrologische Bewertung entwickelt und misst, wie gut die modellierten Werte mit den beobachteten Werten übereinstimmen (Nash und Sutcliffe, 1970). Der  $NSE$ -Koeffizient kann zwischen negativen Werten und maximal 1 schwanken, wobei 1 einer perfekten Übereinstimmung entspricht. Ein Wert von 0 besagt, dass die modellierten Werte gleichwertig durch den Mittelwert der beobachteten Werte abgebildet werden können. Im Gegensatz zu  $R^2$  beschreibt der  $NSE$ -Koeffizient die Abweichung zur 1:1-Linie. Somit wird bei einer systematischen Über- oder Unterschätzung der beobachteten Werte niemals ein  $NSE$ -Wert von 1 erreicht, wohingegen dies für  $R^2$  durchaus der Fall sein kann. Zuletzt beschreibt  $pBIAS$  (*percent bias*; Gl. 4-3) die mittlere systematische Abweichung zwischen modellierten und beobachteten Werten. Ein positiver  $pBIAS$ -Wert bedeutet, dass die simulierten Werte eine Überschätzung darstellen, während ein negativer Wert auf eine Unterschätzung hindeutet.  $pBIAS$  sollte nahe bei 0 liegen.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^j (Q_{reg,i} - \bar{Q}_{mod})^2}{\sum_{i=1}^j (Q_{mod,i} - \bar{Q}_{mod})^2} \quad \text{Gl. 4-1}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^j (Q_{obs,i} - Q_{mod,i})^2}{\sum_{i=1}^j (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad \text{Gl. 4-2}$$

$$pBIAS = \frac{\sum_{i=1}^j (Q_{mod,i} - Q_{obs,i})}{\sum_{i=1}^j Q_{obs,i}} \cdot 100 \quad \text{Gl. 4-3}$$

Die Ergebnisse für diese drei Performance-Indizes sind in Abb. 4-13 enthalten, wobei alle drei Indikatoren eine sehr gute Modelleistung bestätigen.

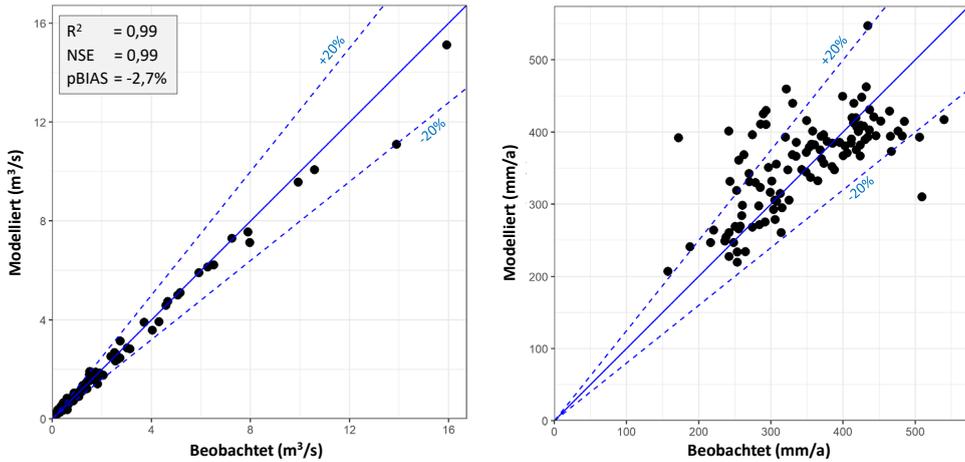


Abbildung 4-13: Plausibilitätsüberprüfung der berechneten mittleren Netto-Gesamtabflusshöhen für die 112 Einzugsgebiete in  $m^3/s$  (links) und in  $mm/a$  (rechts).

Während das Streudiagramm (Abb. 4-13) die allgemeine Leistung des Modells zeigt, liefert es keine Informationen über die räumliche Leistung des mGROWA-Modells landesweit. Um dies zu ermöglichen, zeigt Abb. 4-14 die prozentuale Abweichung für jedes Einzugsgebiet, aufgetragen am Flächenschwerpunkt des entsprechenden Einzugsgebiets. Die prozentuale Abweichung gibt an, um wie viel Prozent die mit mGROWA modellierten Gesamtabflüsse den beobachteten Gesamtabfluss überschätzt (positive Werte) oder unterschätzt (negative Werte). Die Größe der Kreise stellt die Größe des betreffenden Einzugsgebiets dar.

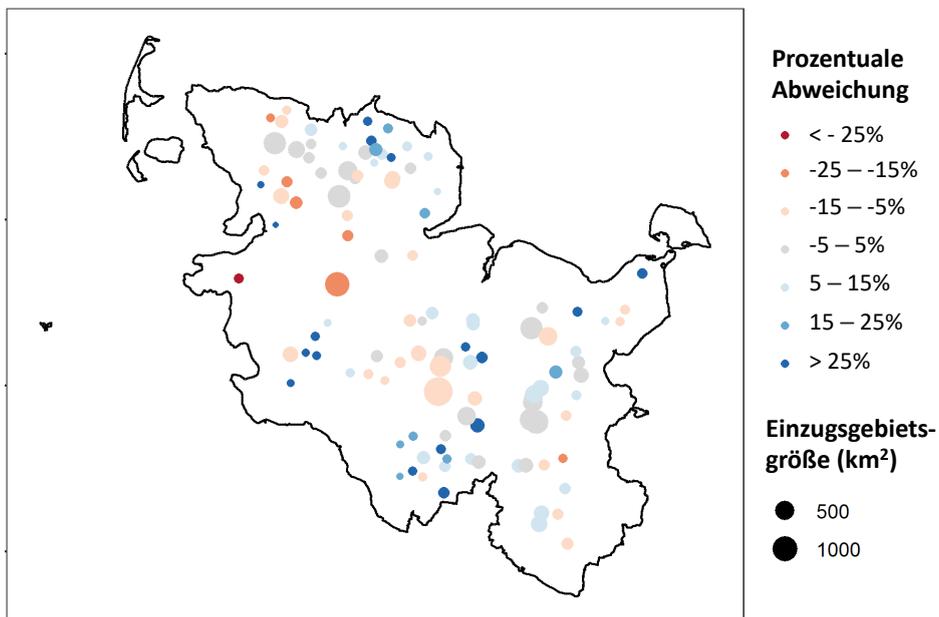


Abbildung 4-14: Räumliche Darstellung der prozentualen Abweichung der modellierten Gesamtabflusshöhen von den beobachteten pegelbezogenen MQ-Werten für die 112 Einzugsgebiete, die für die Plausibilitätsprüfung verwendet wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell in keiner Region zu einer systematischen Über- oder Unterschätzung des Gesamtabflusses neigt. Abweichungen von über 25 % wurden nur vereinzelt beobachtet und treten vor allem in kleinen Einzugsgebieten auf. Bei kleinen Einzugsgebieten sind die Ergebnisse oft mit einer größeren Unsicherheit behaftet. Dies kann daran liegen, dass die verfügbaren Eingabedaten mit den Eigenschaften des Einzugsgebiets im kleinen Maßstab nicht übereinstimmen, so dass sich die Unterschiede in den Eingangsdaten bei der Modellevaluation stärker bemerkbar machen. Den gleichen Effekt können kleine Abweichungen in der Ausdehnung der ober- und unterirdischen Einzugsgebiete haben. Von Tazioli (2011) wurde zudem festgestellt, dass Abflussmessungen in kleineren Flüssen häufig weniger zuverlässig sind.

#### 4.10.2 Überprüfung der berechneten Netto-Grundwasserneubildung

Für die Plausibilitätsüberprüfung der modellierten Grundwasserneubildung werden die mittleren Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ-Werte) verwendet. Dahinter steht die Annahme, dass die Grundwasserneubildung bei Betrachtung längerer Zeiträume dem Basisabfluss gleichgesetzt werden kann. Da dem Aquifer bei grundwassernahen Standorten durch den kapillaren Aufstieg und die direkte Evapotranspiration aus dem Grundwasser ein Teil des Grundwassers verloren geht, erfolgt die Plausibilitätsüberprüfung anhand der berechneten Netto-Grundwasserneubildungshöhen (Abb. 4-9).

Ausgehend von der Überlegung, dass in Schleswig-Holstein ausschließlich Lockergesteine anstehen, erfolgte die Plausibilitätsüberprüfung der modellierten Netto-Grundwasserneubildungshöhe in Tetzlaff et al. (2017) ausschließlich mit Hilfe der Methode von Wundt (1958). Wie bereits in Kap. 2.6 erwähnt, kam es dabei jedoch zu einer systematischen Überschätzung der Grundwasserneubildung in den östlichen Landesteilen.

Die Modellierung der Grundwasserneubildung für bindige Deckschichten erfolgte deshalb in diesem Projekt ähnlich wie in Regionen, die durch Festgestein dominiert werden (vgl. Kap. 4.7.1). Dies bedeutet, dass die Abtrennung der Grundwasserneubildung vom Gesamtabfluss für diese Gebiete über BFI-Werte erfolgte. Dementsprechend erfolgte die Plausibilitätsüberprüfung der mit mGROWA modellierten Netto-Grundwasserneubildung in den Einzugsgebieten, in den bindige Deckschichten mehr als 50 % der Einzugsgebietsfläche darstellen (73 der 112 Einzugsgebiete) über die Methode von Demuth (1993). Die Plausibilitätsüberprüfung nach der Wundt-Methode wurde für Einzugsgebiete mit weniger als 50 % bindigen Deckschichten (39 der 112 Einzugsgebiete) verwendet.

Die Ableitung des Basisabflusses mit der Methode von Demuth (1993) ist jedoch nur in den Fällen zulässig, in denen die Kurve, die das geordnete monatliche Minimum des beobachteten Abflusses abbildet, eine „S-Form“ aufweist. Die linke Grafik in Abb. 4-15 zeigt ein Beispiel für das Auftreten dieser „S-Form“ für eine Station, während die Kurve auf der rechten Seite diese „S-Form“ nicht aufweist und daher der Basisfluss für diese Station nicht abgeleitet wurde.

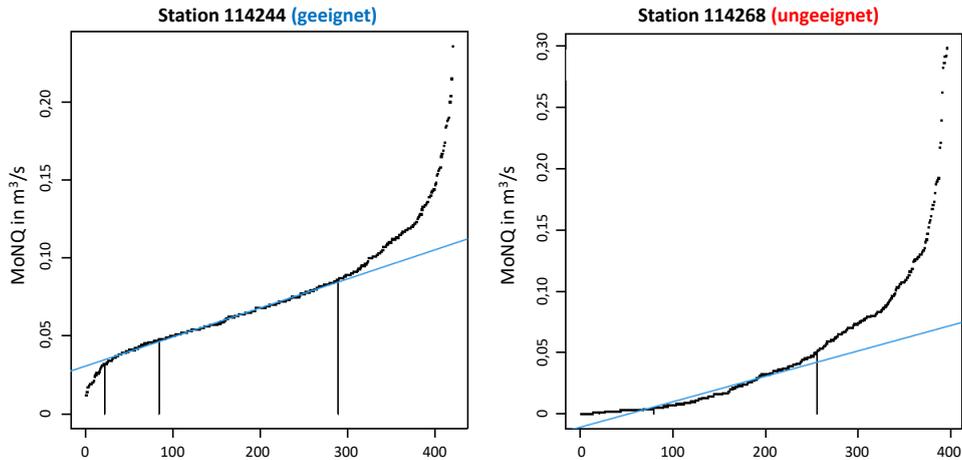


Abbildung 4-15: Illustration der Kurvenformen der geordneten monatlichen Minimumwerte mit Beispielen für eine geeignete Station (links, Station 114244) und eine ungeeignete Station (rechts, Station 114268) für die Ableitung des Basisabflusses mit der Methode von Demuth (1993).

Aus den für die Modellvalidierung verwendeten 112 Stationen (vgl. Abb. 3-19) wurden 28 Stationen aus der Analyse entfernt, weil die „S-Form“ nicht vorhanden war (nur ausgewertet für die 73 Einzugsgebiete mit > 50 % bindiger Deckschichten). In Tabelle 4-1 sind diese Stationen sowie weitere sechs Stationen aufgeführt, die aus den für die Validierung der Grundwasserneubildung verwendeten Stationen aussortiert wurden.

Tabelle 4-1: Für die Modellvalidierung anhand des Basisabflusses aussortierte Einzugsgebiete.

Stationen	Grund für den Ausschluss
114007, 114014, 114018, 114056, 114079, 114087, 114151, 114153, 114188, 114224, 114234, 114246, 114249, 114252, 114268, 114291, 114372, 114376, 114413, 114423, 114424, 114431, 114453, 114454, 114459, 114523, 114524, 114540	Nicht verwendbar für die Demuth-Methode wegen der Form der Kurve, die das geordnete monatliche Minimum des beobachteten Abflusses zeigt.
112251, 114546	Negative Abflusswerte in Zeitreihen aufgrund von Tideeinfluss.
111111, 114438, 114461	Negative Werte des Abflusses in Zeitreihen. Ursache ist unklar.
111015	Negative Werte des Abflusses in Zeitreihen in den ersten Jahren. Danach scheinen die Mindestabflusswerte bei Null begrenzt zu sein.

In Abb. 4-16 sind die 78 verbleibenden Abflussstationen und die entsprechenden Einzugsgebiete dargestellt, die für die Validierung anhand des Basisabflusses verwendet wurden. Für 36 dieser Einzugsgebiete wurde die Wundt-Methode und für 42 die Demuth-Methode verwendet. Obwohl die Auswahl kleiner ist als die 112 Stationen, die für die Validierung des Gesamtabflusses verwendet wurden (s. Abb. 3-19), ist die Gesamtzahl der Stationen und die räumliche Abdeckung weiterhin ausreichend für eine umfassende Bewertung der Modellleistung.

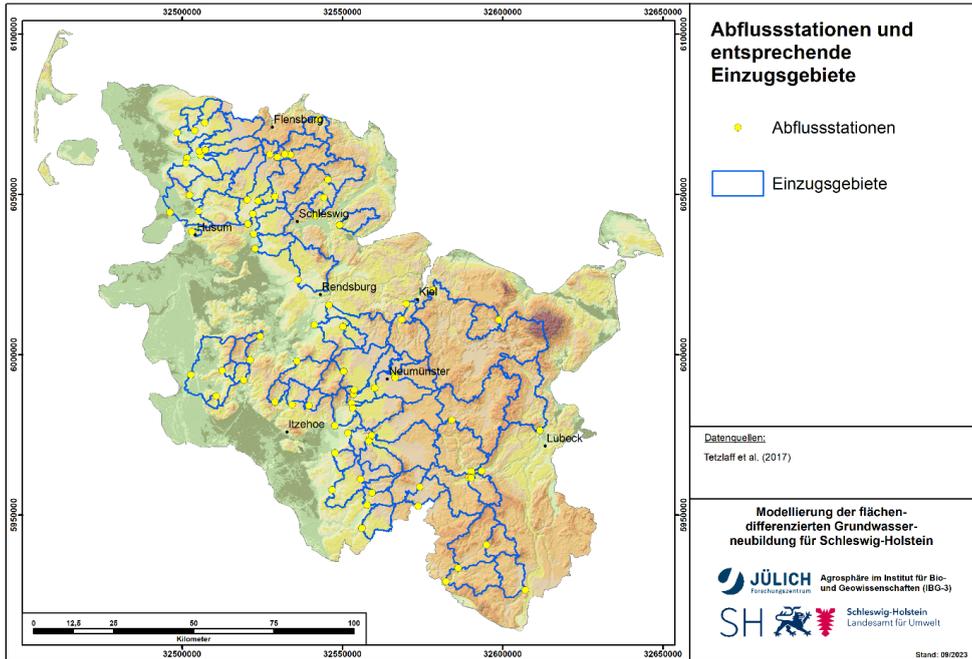


Abbildung 4-16: Auswahl der Abflussstationen und der entsprechenden Einzugsgebiete, die für die Validierung der Grundwasserneubildung verwendet wurden.

Abb. 4-17 zeigt das Ergebnis der Validierung der Netto-Grundwasserneubildungshöhen für die 78 pegelbezogenen Einzugsgebiete mit einer farblichen Kennzeichnung, um anzuzeigen, welche Methode zur Abtrennung des Basisabflusses verwendet wurde. Generell ist die Modellleistung gut, wobei die meisten Einzugsgebiete eine Abweichung von weniger als 20 % aufweisen. Wie zuvor sind auch die Performance-Indizes  $R^2$ ,  $NSE$  und  $pBIAS$  angegeben. Diese bestätigen die ebenfalls gute Leistung des Modells bei der Simulation der Grundwasserneubildung.

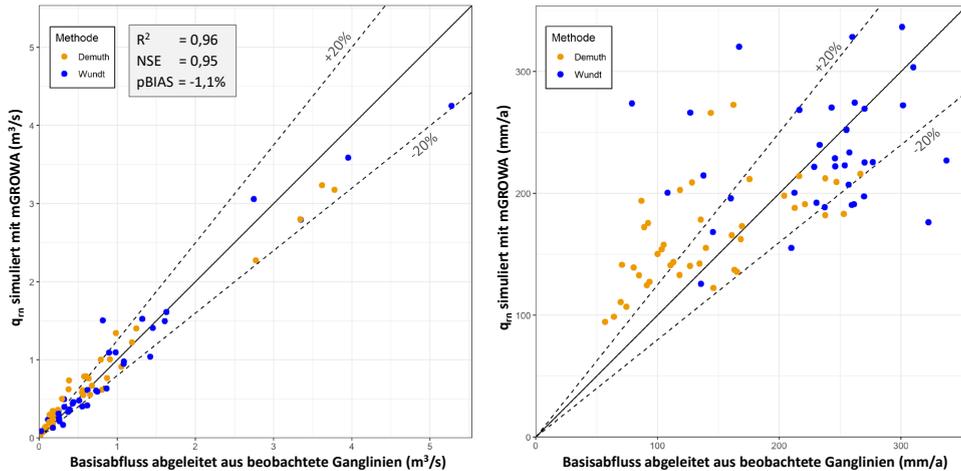


Abbildung 4-17: Plausibilitätsüberprüfung der berechneten mittleren Netto-Grundwasserneubildung für die 78 Einzugsgebiete.

Bei der Validierung der Grundwasserneubildung ist zu beachten, dass sich die Streubeträge von Fehlern zweier Teilmodelle (Gesamtabfluss, Separation der Abflusskomponenten) überlagern. Die Validierung der mit mGROWA ermittelten jährlichen Grundwasserneubildung zeigt, dass die simulierte Grundwasserneubildung mit den gemessenen MoMNQ-Werten etwas weniger gut übereinstimmt als die berechneten Gesamtabflusshöhen mit den gemessenen MQ-Werten. Diese erhöhte Streuung ist jedoch gering.

## 5 Weitergehende Auswertungen zur modellierten Grundwasserneubildung

### 5.1 Auswertung der jährlichen Grundwasserneubildung

In diesem Kapitel erfolgt eine weitergehende Auswertung der Ergebnisse zur modellierten Netto-Grundwasserneubildung. Da mit dem mGROWA-Modell für Gewässerflächen keine Grundwasserneubildung simuliert wird, beziehen sich alle nachfolgenden Statistiken ausschließlich auf die Landfläche Schleswig-Holsteins.

Im oberen Teil von Abb. 5-1 sind die jährlichen Werte des landesweiten räumlichen Mittelwerts der Netto-Grundwasserneubildung dargestellt. Die Werte schwanken zwischen einem Maximum von 252 mm, das im Jahr 2002 modelliert wurde, und einem Minimum von nur 5 mm, das für 1996 modelliert wurde. Die rote Linie zeigt den gleitenden 10-Jahres-Mittelwert, der in der entsprechenden Mitte der jeweiligen Zeitspanne aufgetragen ist (z. B. wird der Mittelwert für 2005-2014 an der x-Koordinate von 2009,5 aufgetragen). Eine überdurchschnittlich trockene Periode in den 1970er Jahren führt zu den niedrigsten 10-Jahres-Mittelwerten der Grundwasserneubildung. Von 1992 bis 2012 liegt die Grundwasserneubildung relativ gleichförmig zwischen 147 mm/a und 170 mm/a. In den letzten vier modellierten Jahren (2018-2021) liegt die modellierte Grundwasserneubildung durchweg unterhalb von 115 mm, was den letzten starken Abfall des gleitenden Mittelwerts erklärt. Schließlich zeigen die vier gestrichelten Linien die 30-Jahres-Mittelwerte für die Perioden 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020. Da die Mittelwertbildung über einen längeren Zeitraum erfolgt, ist die Variabilität zwischen den einzelnen Perioden nicht so groß wie beim gleitenden 10-Jahres-Mittelwert. Die 30-Jahres-Mittelwerte sind ähnlich, was bedeutet, dass noch keine Auswirkungen des Klimawandels auf die langfristige mittlere Grundwasserneubildung zu erkennen sind. Ob zukünftig andere Entwicklungen zu erwarten sind, muss noch untersucht werden. Die Jahreswerte des räumlichen Mittelwertes der Netto-Grundwasserneubildung sind im Appendix B tabellarisch aufgeführt.

Der untere Teil der Abb. 5-1 zeigt eine Zeitreihendarstellung der monatlichen Grundwasserneubildung für alle modellierten Monate von 1961-2021. Jedes farbige Feld kennzeichnet den räumlichen Mittelwert der Netto-Grundwasserneubildung im entsprechenden Monat. Monate mit einer negativen Grundwasserneubildung (bedingt durch Zehrgebiete) sind in Grau dargestellt. Über den gesamten Zeitraum von 1961-2021 liegen Monate ohne einen positiven räumlichen Mittelwert der Grundwasserneubildung gehäuft in den Monaten Mai bis September. Die höchsten Grundwasserneubildungsraten wurden für die Monate November bis Februar berechnet. Ein Trend oder eine Verschiebung ist nicht zu erkennen.

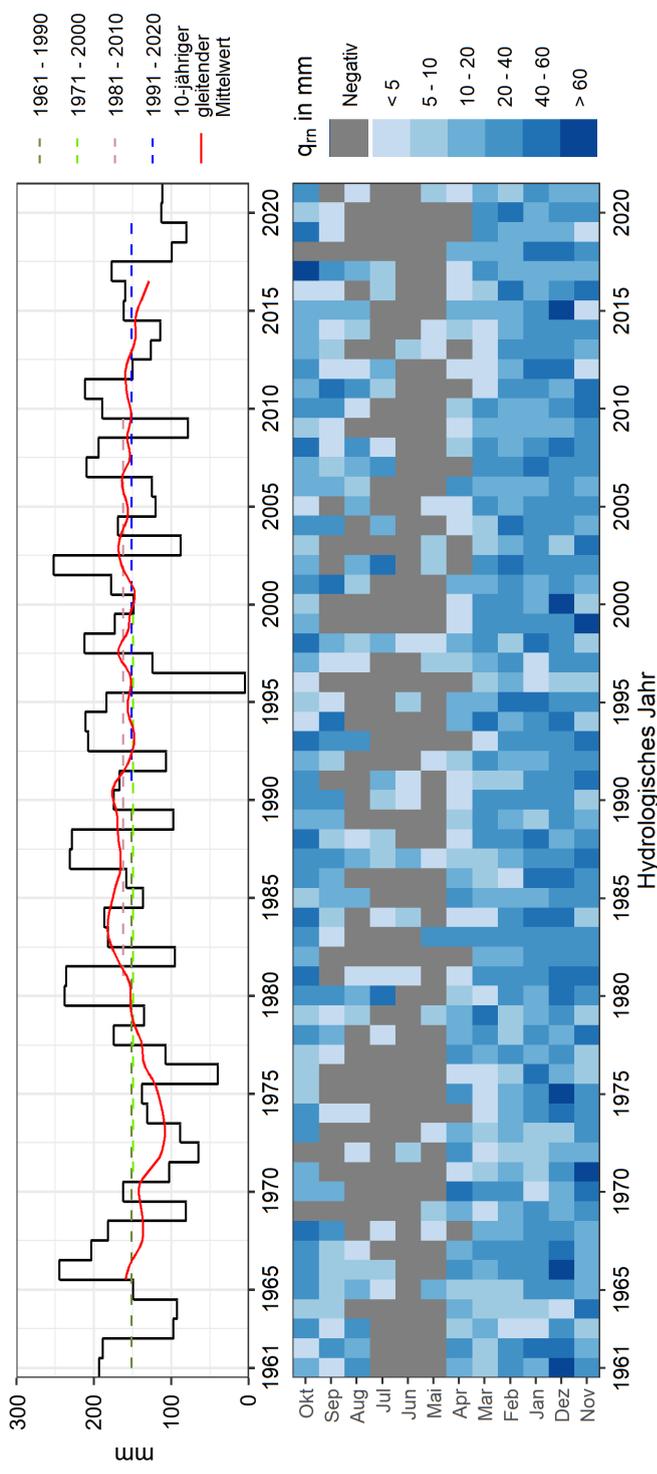


Abbildung 5-1: Oben: Jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung für 1961-2021 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten. Unten: Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung.

Um die in Abb. 5-1 dargestellten Ergebnisse weiter zu disaggregieren, wurde die jährliche Grundwasserneubildung in die im Winterhalbjahr (November - April) und im Sommerhalbjahr (Mai - Oktober) auftretenden Mengen unterteilt. Abb. 5-2 stellt die räumlichen Mittelwerte der Netto-Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr für den Zeitraum 1961-2021 dar, während Abb. 5-3 dies für das Sommerhalbjahr zeigt. Wie zuvor sind ein gleitender 10-jähriger Mittelwert sowie die 30-jährigen Mittelwerte für vier Zeiträume dargestellt.

Die Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr schwankt zwischen einem Maximum von 217 mm im Jahr 1966 und 33 mm im Jahr 1996, während die Grundwasserneubildungsrate im Sommerhalbjahr zwischen 104 mm im Jahr 1980 und -63 mm im Jahr 2018 schwankt. Im Sommerhalbjahr wurden in 19 der 61 modellierten Jahre negative Mittelwerte simuliert. Die 10-jährigen gleitenden Mittelwerte im Winterhalbjahr sind über den gesamten Zeitraum relativ gleichförmig und liegen zwischen ca. 120 mm/a und 150 mm/a. Bei den 10-jährigen gleitenden Mittelwerten im Sommerhalbjahr zeigt sich dagegen im Zeitraum von 1970 bis 1980 mit Werten zwischen -10 und 20 mm eine Dekade mit signifikant geringerer Grundwasserneubildung als in den Folgedekaden, in denen Werte zwischen 20 und 40 mm auftreten. Interessanterweise sind trotz der höheren Gesamtwerte im Winterhalbjahr die absoluten Differenzen zwischen dem maximalen und dem minimalen gleitenden 10-Jahres-Mittelwert im Sommerhalbjahr mit einer Spanne von -8 bis 40 mm höher als im Winterhalbjahr (113 bis 146 mm). Wie bei den jährlichen Akkumulationswerten weichen auch die 30-Jahres-Mittelwerte über die verschiedenen Zeiträume nicht stark voneinander ab.

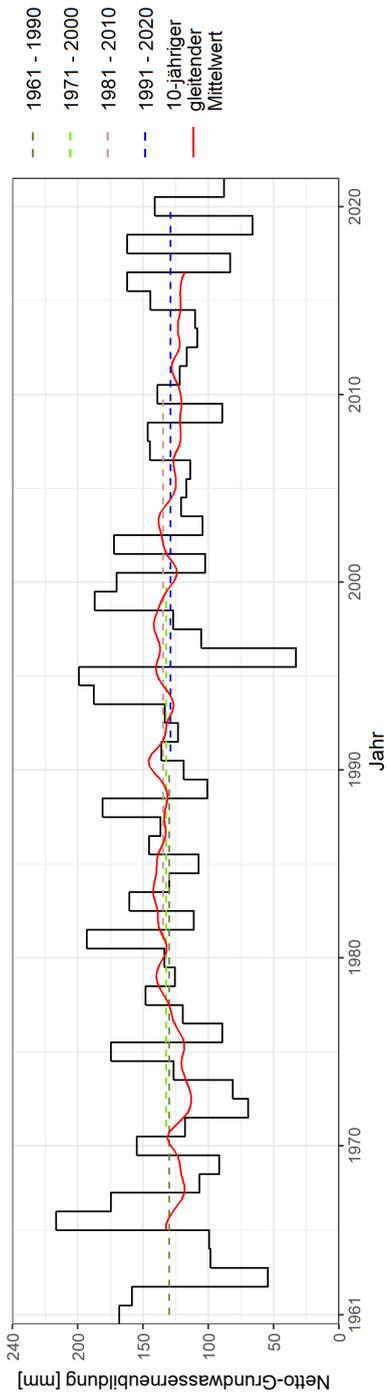


Abbildung 5-2: Räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr für 1961-2021.

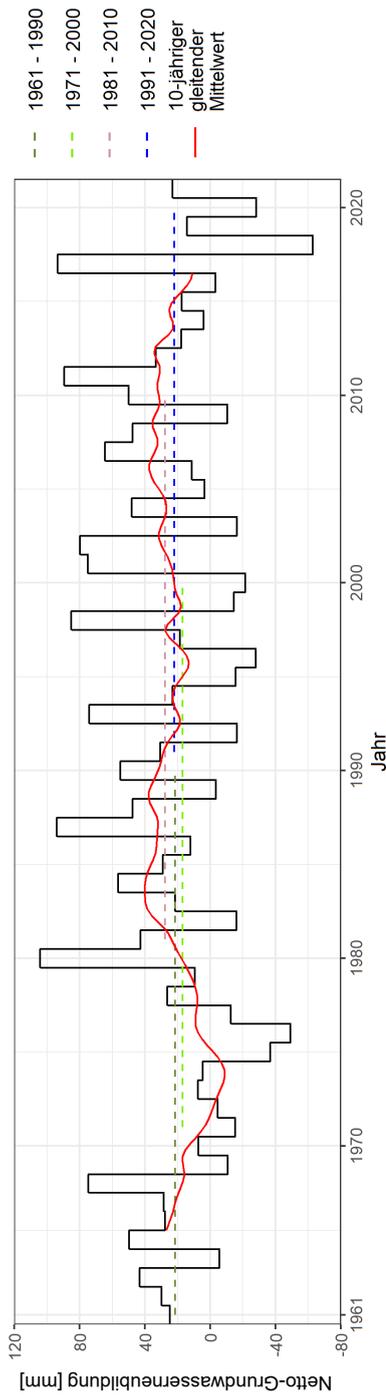


Abbildung 5-3: Räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung im Sommerhalbjahr für 1961-2021.

Wie in der Karte der langjährigen mittleren Netto-Grundwasserneubildung (vgl. Abb. 4-9) dargestellt, besteht eine große räumliche Heterogenität in den Größen der simulierten Grundwasserneubildung. In Abb. 5-4 sind Boxplots dargestellt, die diese Variation der jährlichen Netto-Grundwasserneubildungswerte in den einzelnen Rasterzellen zeigen. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median, die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist, und die Punkte stellen die Ausreißer dar.

Da das mGROWA-Modell insgesamt mehr als 1,5 Millionen modellierte Rasterzellen umfasst, wäre eine Darstellung aller Zellenwerte in einem Boxplot schwer zu interpretieren. Selbst wenn in einem Jahr beispielsweise nur 1 % der Werte Ausreißer sind (d. h. sie sind mehr als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt), müssten für dieses Jahr mehr als 15.000 Einzelpunkte aufgetragen werden. Daher wird in Abb. 5-4 nur jeweils ein Punkt dargestellt, um die Ausreißer mit niedrigen und hohen Werten für jedes Jahr zu repräsentieren. Diese Punkte stellen den Mittelwert aller Ausreißer dar, die unterhalb bzw. oberhalb des entsprechenden Whiskers liegen.

Für alle Jahre außer dem sehr trockenen Jahr 1996 schwankt der Quartilsabstand (Q3 minus Q1) zwischen 108 mm und 241 mm, was die hohe Heterogenität der Grundwasserneubildung verdeutlicht, die u. a. auf die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen, die Landbedeckung, die Bodenverhältnisse und die hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrundes zurückzuführen ist.

## **5.2 Räumliche Verteilung der monatlichen Grundwasserneubildung im Zeitraum 1991-2020**

In Abb. 5-5 ist die mittlere monatliche Netto-Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1991-2020 dargestellt. Wie erwartet ist die Grundwasserneubildung in den Wintermonaten wesentlich höher als in den Sommermonaten. Auffallend sind die Gebiete in der Elbmarsch, die in den Sommermonaten Zehrgebiete aufweisen und in denen in mehreren Wintermonaten keine Grundwasserneubildung stattfindet. Diese Gebiete entsprechen Rasterzellen mit sowohl oberflächennahem Grundwasser als auch mit künstlicher Entwässerung. In den Monaten, in denen die Dräntiefe unterhalb des Grundwasserspiegels liegt, wird davon ausgegangen, dass das gesamte in der Bodensäule versickernde Wasser in das Dränsystem gelangt und somit nicht zur Grundwasserneubildung beiträgt. Für solche Rasterzellen ist eine Grundwasserneubildung daher nur in den Monaten möglich, in denen die Tiefe des Grundwasserspiegels unter die Dräntiefe fällt.

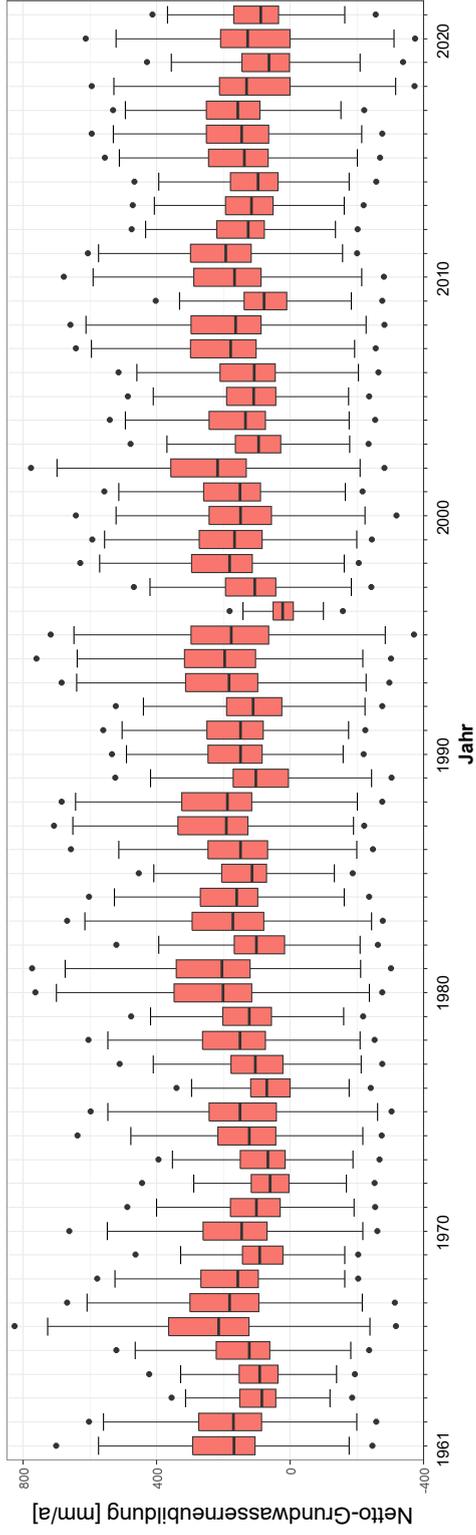


Abbildung 5-4: Boxplots der jährlichen Netto-Grundwasserneubildung für modellierte Rasterzellen.

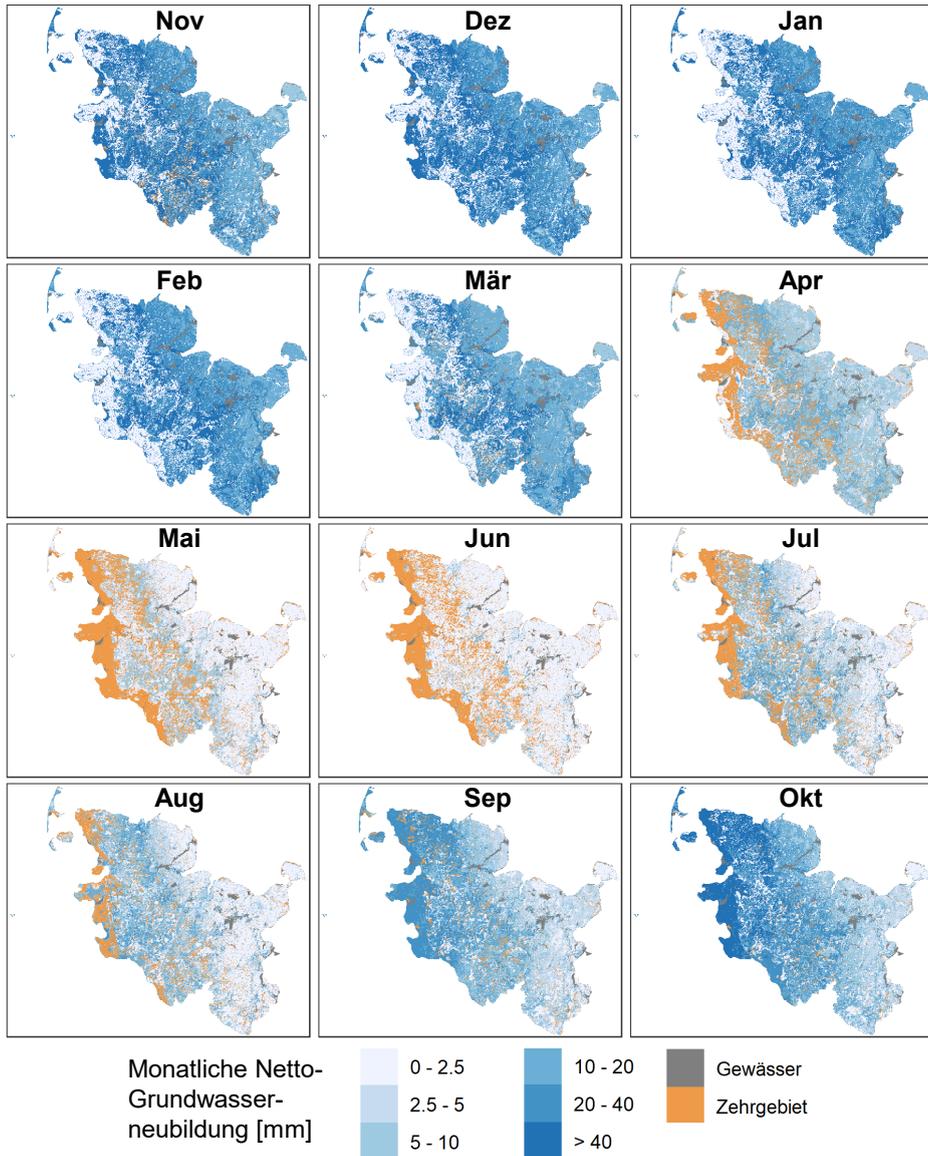


Abbildung 5-5: Mittlere monatliche Netto-Grundwasserneubildung für 1991-2020.

In Abb. 5-6 ist ein Boxplot der monatlichen mittleren Netto-Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1991-2020 dargestellt. In jeder der Säulen sind 30 Werte dargestellt, d. h. es wird die räumliche mittlere Netto-Grundwasserneubildung für den entsprechenden Monat für jedes Jahr der 30-Jahres-Periode visualisiert. Die Grundwasserneubildung variiert im Jahresverlauf, wobei die Monate November bis Januar die höchste Grundwasserneubildung aufweisen und die Monate Mai bis Juli die geringste. Teilweise ist die Grundwasserneubildung in den Sommermonaten sogar negativ. Im Appendix B ist der räumliche Mittelwert der simulierten monatlichen Netto-Grundwasserneubildung für alle 61 modellierten Jahre (1961-2021) in Tabellenform dargestellt.

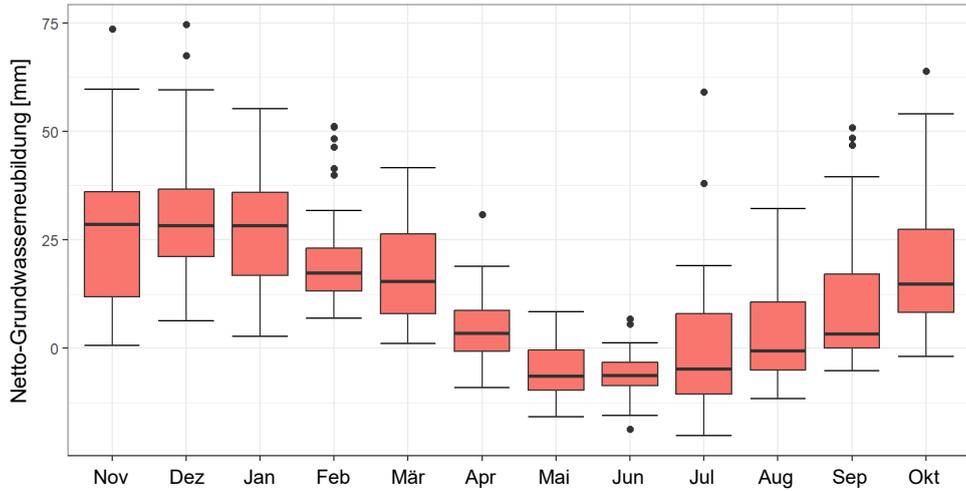


Abbildung 5-6: Boxplots der monatlichen räumlichen mittleren Netto-Grundwasserneubildung für 1991-2020. Im Unterschied zu den Boxplots in Abb. 5-4 ist hier jeder Datenpunkt das räumliche Mittel der monatlichen Grundwasserneubildung für ein bestimmtes Jahr. Daher repräsentiert jede Datensäule nur 30 Einzelwerte.

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Für eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung sind zuverlässige Schätzungen der Wasserhaushaltskomponenten sowohl im Hinblick auf langfristige Mittelwerte als auch im Hinblick auf jährliche Schwankungen und Trends äußerst wichtig. In Schleswig-Holstein stammt die Trinkwassergewinnung zu 100 % aus dem Grundwasser, weshalb detaillierte Schätzungen der Grundwasserneubildung von zentraler Bedeutung sind. In diesem Projekt wurde die Wasserhaushaltsmodellierung für Schleswig-Holstein gegenüber der bisherigen Modellierung (Tetzlaff et al., 2017) in zweierlei Hinsicht verändert. Zum einen wurde das Mehrschichtmodell mGROWA verwendet, welches eine repräsentativere Konzeptualisierung der hydrologischen Prozesse in der Bodensäule auf einer täglichen Zeitskala bietet. Zum anderen wurden verschiedene aktualisierte Eingabedatensätze verwendet. Alle Modellrechnungen zur Grundwasserneubildung sowie zu den anderen Wasserhaushaltskomponenten erfolgten über den Zeitraum 1961-2021 in einer räumlichen Auflösung von 100 m x 100 m. Zur Definition der Rasterzellen wurde das amtliche geodätische Bezugssystem ETRS98/UTM mit führender 32 im East-Wert (EPSG-Code 4647) als einheitliche Geokodierung verwendet.

Als klimatische Datengrundlagen für die Modellierung wurden Niederschlagsdaten und klimatische Parameter des Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) der Periode 1961-2021 verwendet.

Eine wichtige Komponente der mGROWA-Modellierung sind landnutzungsspezifischen Evapotranspirationsparameter, die die Höhe der tatsächlichen Evapotranspiration maßgeblich beeinflussen. Als Landnutzung wurde ein kombinierter InVeKoS- und ALKIS-Datensatz aus dem Jahr 2020 (Tetzlaff et al., 2024) verwendet. Um den Einfluss der Evapotranspiration von Maispflanzen im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Feldfrüchten zu berücksichtigen, wurde der Prozentsatz der landwirtschaftlichen Fläche, auf der Mais angebaut wird, explizit einbezogen.

Die bodenphysikalischen Kennwerte (z. B. Bodenart, Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität), die in die Modellierung eingegangen sind, entstammen der Bodenübersichtskarte von Schleswig-Holstein 1:250.000 (BÜK250). Die in der BÜK250 angegebenen Bodenhorizonte wurden dabei mit der Landnutzung kombiniert, um in den Bodenprofilen landnutzungsabhängige relevante Eingangsparameter für jede Rasterzelle abzuleiten. Hierzu wurden sieben repräsentative Bodenschichten mit einer Tiefe von jeweils 30 cm definiert.

Das Vorhandensein von oberflächennahem Grundwasser, künstlicher Drainage und/oder Staunässe spielt eine wichtige Rolle für den Wasserhaushalt. Diese Datensätze wurden alleamt aus Tetzlaff und Kuhr (2011) übernommen und in das 100 m-Raster übertragen. Die potenziell drainierte Fläche umfasst ca. 8.270 km<sup>2</sup>, was etwa 55 % der Landesfläche entspricht. Drainierte Flächen spielen somit eine wichtige Rolle im Landschaftswasserhaushalt Schleswig-Holsteins.

Im Rahmen der Studie wurden bindige Deckschichten (Geschiebemergel) erstmals für Schleswig-Holstein als eigenständige Gebietseinheit ausgewiesen. Sofern keine Grundwasserbeeinflussung vorlag, erfolgte die Abtrennung der Grundwasserneubildung über eine Abflussseparationsmethode, die ansonsten nur in Festgesteinsregionen zur Anwendung kommt. Konkret wurden den Regionen mit bindigen Deckschichten in Abhängigkeit von deren Mächtigkeit Base-Flow-Indizes (BFI) zugewiesen. Die BFI-Werte geben an, welcher Anteil des Sickerwassers, das die unterste modellierte Bodenschicht passiert hat, zu Dränabfluss bzw. natürlichem Zwischenabfluss wird und welcher Anteil zur Grundwasserneubildung beiträgt. Die Fläche in Schleswig-Holstein, auf der BFI-Werte für bindige Deckschichten definiert wurden entspricht - nach Ausschluss der vom Grundwasser beeinflussten Flächen - 43 % der gesamten Landesfläche.

Die Modellergebnisse für die Wasserhaushaltskomponenten wurden als 30-Jahres-Mittelwerte für den Zeitraum 1991-2020 dargestellt. Zusätzlich sind im Appendix A die 30-Jahres-Mittelwerte für die Zeiträume 1971-2000 und 1981-2010 dargestellt. Die Modellergebnisse zeigen eine große räumliche Heterogenität, welche auf die starken räumlichen Variationen der Klimadaten, der Landbedeckung, der Bodeneigenschaften, des oberflächennahen Grundwassers und der Entwässerung usw. zurückzuführen ist.

Der wassermengenwirtschaftlich relevante Netto-Gesamtabfluss liegt meist zwischen 190 und 450 mm/a, mit einem räumlichen Mittelwert von 330 mm/a. Die Werte sind in der Schleswig-Holsteinischen Geest am höchsten und liegen meist oberhalb von 350 mm/a. Trotz der hohen Niederschläge in der Elbmarsch ist der Netto-Gesamtabfluss dort aufgrund der erhöhten tatsächlichen Evapotranspiration etwas geringer (ca. 100 – 300 mm/a). Im Östlichen Hügelland ist der Gesamtabfluss in der nördlichen Region höher als im Süden, wo die Werte oft unterhalb von 200 mm/a liegen. Einige Flächen mit oberflächennahem Grundwasser stellen Zehrgebiete dar, was bedeutet, dass die mittlere jährliche tatsächliche Evapotranspiration hier den mittleren jährlichen Niederschlag übersteigt.

Der Brutto-Gesamtabfluss wurde in die Komponenten Oberflächenabfluss, urbaner Direktabfluss, natürlicher Zwischenabfluss, Drainage und Grundwasserneubildung aufgeteilt. Der Oberflächenabfluss wird für Gebiete ausgewiesen, die eine hydraulische Anbindung an das Gewässernetz haben, und tritt vor allem im Östlichen Hügelland auf, allerdings mit durchweg geringen Absolutwerten. Der urbane Direktabfluss kann in einigen stark versiegelten innerstädtischen Gebieten Werte oberhalb von 300 mm/a erreichen, in den für Schleswig-Holstein typischen, schwach versiegelten ländlichen Gebieten liegt er jedoch in der Regel unter 100 mm/a.

Im mGROWA-Modell werden die über die Bodenpassage entwässernden Direktabflussanteile getrennt in die Abflusskomponenten „natürlicher Zwischenabfluss“ und „Abfluss aus Drainagesystemen“. Zur Bildung von natürlichem Zwischenabfluss kommt es dort, wo das Sickerwasser vor Erreichen des Grundwasserleiters eine wasserundurchlässige Schicht erreicht, so dass es lateral in der ungesättigten Zone abfließt, bis es ein Oberflächengewässer erreicht. Natürlicher Zwischenabfluss tritt hauptsächlich in grundwasserunbeeinflussten bindigen Deckschichten auf und liegt zumeist unter 200 mm/a.

Unter dem Oberbegriff „Drainageabfluss“ werden alle durch anthropogene Eingriffe geschaffenen künstlichen Abflusswege (Grabendrainage, Rohrdrainage) bezeichnet. In der Marschregion führen hohe Niederschläge und ein hoher Grundwasserspiegel zu sehr hohen Werten des Drainageabflusses von bis zu 300 mm/a. Im Hügelland reduziert sich der Drainageabfluss auf Werte bis 200 mm/a. Im Mittel liegt der Dränabfluss für die Rasterzellen, in denen er auftritt, bei 238 mm/a

Die mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung weist ein räumliches Mittel von 151 mm/a auf. Die höchsten Werte finden sich in Gebieten der Schleswig-Holsteinischen Geest, in denen kein oberflächennahes Grundwasser vorhanden ist. Dort liegen die Werte verbreitet bei mehr als 300 mm/a. In Gebieten, in denen oberflächennahes Grundwasser ansteht, ist die Grundwasserneubildung geringer und liegt zumeist bei weniger als 150 mm/a, manchmal sogar im negativen Bereich (Grundwasserzehrgebiete), wenn der Grundwasserspiegel sehr nahe an der Oberfläche liegt. Tendenziell ist die Grundwasserneubildung auch im Östlichen Hügelland, wo bindige Deckschichten vorherrschen, geringer und liegt meist zwischen 50 und 150 mm/a.

Zur Modellkalibrierung und Validierung des mGROWA-Modells wurden vom Landesamt für Umwelt (LfU) tägliche Abflussdaten von 145 Stationen mit Zeitreihen von 1981 bis 2021 zur Verfügung gestellt, von denen insgesamt 112 Stationen und die zugehörigen Einzugsgebiete für die Modellvalidierung des Gesamtabflusses verwendet werden konnten. Die Einzugsgebiete decken den größten Teil der Fläche Schleswig-Holsteins ab; Ausnahmen bilden die Elbmarsch und die Nordfriesischen Inseln. Die Übereinstimmung zwischen den beobachteten MQ-Werten und den modellierten Werten des Netto-Gesamtabflusses war, wie durch den *NSE* von 0,99 und die *pBIAS* von -2,7 % belegt, sehr gut. Für die Überprüfung der Netto-Grund-

wasserneubildung konnten 78 Einzugsgebiete verwendet werden. Die Ergebnisse der Validierung waren auch hier sehr gut, wobei die statistischen Kenngrößen nur geringfügig unter den für den Gesamtabfluss erzielten Werten liegen ( $NSE = 0,95$ ,  $pBIAS = -1,1 \%$ ).

Die durch die Anwendung des mGROWA-Modells erzielten Ergebnisse zeigen, wie stark die Jahreswerte der Grundwasserneubildung von Jahr zu Jahr variieren. Die Maximal- und Minimalwerte des räumlichen Mittelwerts der jährlichen Grundwasserneubildung betragen 252 mm im Jahr 2002 und nur 5 mm für das Jahr 1996. Die 30-Jahres-Mittelwerte der Grundwasserneubildung sind über die Zeiträume 1961-2021 relativ konstant und liegen zwischen 145 und 157 mm/a. Im Gegensatz dazu zeigt das gleitende 10-Jahres-Mittel in den letzten Jahren einen deutlichen Abwärtstrend, da für die letzten vier modellierten Jahre (2018-2021) eine unterdurchschnittliche Netto-Grundwasserneubildung modelliert wurde. Es bleibt Gegenstand zukünftiger Untersuchungen, ob sich dieser Trend fortsetzen wird und möglicherweise bereits Auswirkungen des Klimawandels anzeigt.

Die monatlichen Muster der Netto-Grundwasserneubildung sind in Schleswig-Holstein sehr ausgeprägt, wobei die meiste Grundwasserneubildung erwartungsgemäß in den Wintermonaten stattfindet. In den Sommermonaten ist die räumliche mittlere Grundwasserneubildung wesentlich geringer und häufig treten sogar negative Werte auf. Für eine Reihe von wasserwirtschaftlichen Fragestellungen ist es von Bedeutung zu analysieren, ob sich die innerjährlichen Grundwasserneubildungsmuster zukünftig verschieben werden, z. B. im Hinblick auf ein früheres Ende der Grundwasserneubildungsperiode.

Um die Planung einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels zu unterstützen, sollte das etablierte mGROWA-Modell in einem Folgeprojekt eingesetzt werden, um Simulationen auf der Grundlage eines Ensembles von Klimaprojektionen durchzuführen. Auf diese Weise kann bewertet werden, wie sich die Grundwasserneubildung in Zukunft voraussichtlich verändern wird.

## **TEIL 2:**

**Grundwasserneubildung unter dem Einfluss des Klimawandels in Schleswig-Holstein - Simulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA**

## 1 Einleitung

Durch den Klimawandel verursachte Veränderungen des Wasserkreislaufs sind bereits weltweit zu erkennen, und es ist zu erwarten, dass deren Auswirkungen auf den Wasserkreislauf im Laufe dieses Jahrhunderts zunehmen werden (Arias et al., 2021). Auch wenn die Modellierungsergebnisse mit mGROWA, getrieben durch beobachtete klimatologische Eingangsdaten, bisher keine wesentlichen Änderungen der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung in Schleswig-Holstein zeigen (vgl. Teil 1, Kap. 5.1), sind die Auswirkungen des Klimawandels im Laufe des 21. Jahrhunderts auf die Grundwasserneubildung noch nicht bekannt.

Der Klimawandel kann sich saisonal und regional auf den gesamten Wasserhaushalt in einer Region auswirken, so z. B. auf die Grundwasserneubildung sowie Wasserdefizite oder -überschüsse in den Böden. Die Wasserversorger müssen sich langfristig auf möglicherweise veränderte Grundwasserneubildungshöhen und einen erhöhten Trinkwasserbedarf in den Sommermonaten einstellen. Unmittelbar betroffen hiervon ist auch die Landwirtschaft, z. B. durch einen erhöhten Bewässerungsbedarf in der Vegetationsperiode. Um die Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen rechtzeitig auf die zu erwartenden Folgen des Klimawandels anzupassen, sind regional differenzierte Kenntnisse über die Grundwasserneubildung und ihre zeitliche Änderung von entscheidender Bedeutung.

Ziel der in diesem Teil 2 beschriebenen Studie ist, die Grundwasserneubildung mit dem mGROWA-Modell durch Ensemblesimulationen flächendifferenziert für das Land Schleswig-Holstein bis zum Jahr 2100 zu projizieren. Das in Teil 1 dieses Berichtes beschriebene mGROWA-Modell soll hierzu mit dem DWD-Referenz-Ensembles v2018 als klimatischer Modellinput betrieben werden (DWD, 2023a). Bis auf die klimatischen Eingangsdaten sollen alle in Teil 1 beschriebenen Datengrundlagen für die projizierten Grundwasserneubildungsdaten herangezogen werden. Im Ergebnis sollen regionale Unterschiede und zeitliche Entwicklungen in der Grundwasserneubildung herausgearbeitet und abgebildet werden. Dabei werden die 30-jährigen Klimaperioden 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 sowie kürzerer Zeiträume betrachtet.

Im Rahmen des Projekts wurden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Berechnungen der Netto-Grundwasserneubildung für alle 44 Mitglieder des DWD-Referenz-Ensembles bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit dem mGROWA-Modell;
- Vergleich der berechneten Grundwasserneubildungsraten für die Referenzperiode 1971-2000 mit den Ergebnissen der Klimaprojektionen;
- Berechnung und Analyse der Änderungssignale und Trends der jährlichen Grundwasserneubildung;
- Bewertung der Robustheit der Änderungssignale der Grundwasserneubildung;
- Quantifizierung der wahrscheinlichen klimawandelbedingten Veränderungen der Grundwasserneubildung anhand des Konzepts der „klimatischen Leitplanken“ (Linke et al., 2024);
- Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung auf verschiedenen räumlichen Skalen;
- Bewertung, wie sich die zeitliche Variabilität der Grundwasserneubildung entwickeln wird; und
- Überprüfung der Aussagekraft des Einsatzes von Kern-Ensembles anstelle des vollständigen DWD-Referenz-Ensembles für hydrologische Untersuchungen der Auswirkungen des Klimawandels in Schleswig-Holstein.

In dem hier vorgelegten Teil 2 des Endberichts wurden die wesentlichen Verfahrensschritte, alle Datengrundlagen sowie alle Ergebnisse zusammengefasst.

## 2 Erläuterungen wichtiger Begriffe in der Klimamodellierung

### Klimamodelle

Klimamodelle beruhen auf physikalischen Gleichungen zur Impuls-, Energie- und Massenerhaltung und werden verwendet, um die mögliche künftige Entwicklung des Klimasystems zu projizieren (DWD, 2021; Hennemuth et al., 2021). Ein Klimamodell liefert klimatische Variablen (z. B. Niederschlag, Lufttemperatur) zu diskreten Zeitpunkten (z. B. täglich) über ein Gitternetz.

### Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)

Das „*Coupled Model Intercomparison Project*“ (CMIP) ist ein Gemeinschaftsprojekt, organisiert durch die „*World Climate Research Programme*“ (WCRP), zur Verbesserung der Kenntnisse über den Klimawandel (Touzé-Peiffer et al., 2020). Das Projekt wird in Phasen durchgeführt und dient der Analyse des Klimawandels auf nationaler und internationaler Ebene, wobei die Phasen nun mit den „*Assessment Reports*“ des „*Intergovernmental Panel on Climate Change*“ (IPCC) korrespondieren. Die CMIP5-Simulationen (Taylor et al., 2012) der globalen Klimamodelle wurden 2013 abgeschlossen, die CMIP6-Simulationen (O'Neill et al., 2016) im Jahr 2022.

### Representative Concentration Pathways (RCP)

Die RCP-Szenarien (engl. *Representative Concentration Pathways*) bilden die möglich erscheinende globale Erwärmung bis ins Jahr 2100 ab (Moss et al., 2010). Hinter den RCP stehen Annahmen über eine zukünftig veränderte Strahlungsbilanz der Erdatmosphäre, die aus steigenden Treibhausgaskonzentrationen resultiert. Die für dieses Projekt verwendeten Klimamodelle stammen aus dem CMIP5-Ensemble (s. Abschnitt „DWD-Referenz-Ensembles v2018“, unten). Für das CMIP5-Experimentdesign wurden insgesamt vier RCP formuliert: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5 (Taylor et al., 2012). Die prognostizierte Zunahme der durchschnittlichen globalen Temperatur über der Landoberfläche für diese Pfade ist in Abb. 2-1 dargestellt (IPCC, 2013a). Die Antriebe mit den RCP (engl. „*forcings*“) für die CMIP5-Simulationen beginnen im Jahr 2006 (Taylor et al., 2012).

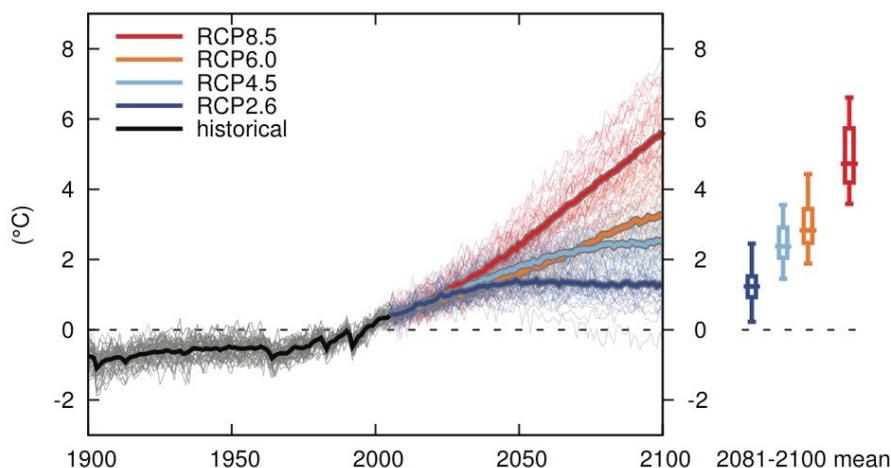


Abbildung 2-1: Veränderung der globalen Mitteltemperatur über Land für die verschiedenen RCP-Szenarien (Quelle: IPCC, 2013a).

RCP2.6 impliziert einen Strahlungsantrieb von maximal  $3 \text{ W/m}^2$  vor 2050 und nach diesem Maximum einen Rückgang auf  $2,6 \text{ W/m}^2$ , der aus einem Rückgang der Treibhausgaskonzentrationen resultiert. Sowohl RCP4.5 als auch RCP6.0 sind Stabilisierungsszenarien. Im RCP4.5

wird eine Stabilisierung des Strahlungsantriebs bei  $4,5 \text{ W/m}^2$  angenommen, wobei die Treibhausgaskonzentrationen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts dauerhaft auf einem erhöhten Niveau verbleiben. Im RCP6.0 wird der maximale Strahlungsantrieb von  $6,0 \text{ W/m}^2$  und die Zeit der Stabilisierung erst im Jahr 2100 erreicht. Das RCP8.5 steht für einen weiterhin kontinuierlich ansteigenden Strahlungsantrieb bis auf  $8,5 \text{ W/m}^2$  am Ende des Jahrhunderts, der aus relativ ungebremst steigenden Treibhausgaskonzentrationen resultiert (IPCC, 2013b).

### **General Circulation Models (GCM) und Regional Climate Models (RCM)**

Die RCP-Szenarien liefern Randbedingungen für globale Klimamodelle (GCM, *General Circulation Models*). Die GCM können die Auswirkung großräumiger Antriebe auf die globale Zirkulation abbilden, aber aufgrund ihrer groben räumlichen Auflösung (etwa 120 bis 400 km; Kreienkamp et al., 2017) können diese globalen Modelle Einflussfaktoren wie die regionale Topografie und die regionale Landbedeckung sowie Küstenlinien und Binnengewässer nicht ausreichend berücksichtigen (Giorgi, 2019). Die GCM werden als Randbedingungen für räumlich höher auflösende regionale Klimamodelle (RCM, *Regional Climate Models*) verwendet, die solche Einflussfaktoren berücksichtigen können. Der Prozess der Verbesserung der räumlichen und/oder zeitlichen Auflösung von gröberen Modellen zu feineren Modellen wird als „Downscaling“ bezeichnet.

### **EURO-CORDEX und ReKliEs-De**

Die europäische Initiative „*Coordinated Regional Downscaling Experiment*“ (EURO-CORDEX; Jacob et al., 2014) liefert RCM für den europäischen Raum mit einer räumlichen Auflösung von 50 km (EUR-44) und 12,5 km (EUR-11). Konkret liefert die EURO-CORDEX-Initiative regionale Klimamodelldaten für drei der vier in CMIP5 betrachteten RCP-Szenarien: RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (EURO-CORDEX, 2018). Im Rahmen des Verbundprojekts „*Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland*“ (ReKliEs-De; Hübener et al., 2017a), wurden weitere RCM für die RCP-Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 in einer räumlichen Auflösung von 12,5 km als Ergänzung zu den Klimamodellen aus der EURO-CORDEX-Initiative (EUR-11) erstellt<sup>5</sup>.

Die Veröffentlichung der RCM der EURO-CORDEX-Initiative erfolgt wegen der damit verbundenen organisatorischen und rechentechnischen Herausforderungen mit einer mehrjährigen Verzögerung gegenüber der Veröffentlichung der GCM (Wohland, 2022).

### **DWD-Referenz-Ensembles v2018**

Das Ziel der DWD-Referenz-Ensembles v2018 ist, einen Satz von separaten Klimamodellen, der die Spannweite möglicher Veränderungen des Klimasystems abdeckt, vorzulegen. Auf diese Weise wird eine möglichst konsistente Datenbasis für die Berechnung von Klimaindikatoren oder als Eingangsdaten für Wirkungsmodelle gewährleistet (DWD, 2021). Das DWD-Referenz-Ensembles besteht aus Modellen der Initiativen EURO-CORDEX und ReKliEs-De. Es wurde nach Mindeststandards (z. B. verfügbare Ausgangsparameter, Verwendung des EUR-11-Gitters) ausgewählt und die Klima-Outputs wurden einer Qualitätsprüfung unterzogen. Das DWD-Referenz-Ensembles v2018 besteht aus insgesamt 44 Klimamodellen, die 11 RCP2.6-Simulationen, 12 RCP4.5-Simulationen und 21 RCP8.5-Simulationen umfassen (DWD, 2021, 2023a).

### **Kern-Ensembles**

Obwohl es keine definitive Angabe darüber gibt, wie viele Klimamodelle für eine robuste Analyse der Auswirkungen des Klimawandels erforderlich sind, ist die Einbeziehung mehrerer einzelner Klimamodelle in ein Ensemble vorteilhaft für die Bestimmung einer Auswirkung auf den Klimawandel und insbesondere für die Quantifizierung der internen Modellvariabilität (Milinski et al., 2020). Aufgrund des hohen Zeit- und Rechenaufwands für die Bewertung vollständiger

<sup>5</sup> In DWD (2023a) wird für alle Klimamodelle angegeben, ob sie aus dem EURO-CORDEX-Projekt oder dem ReKliEs-De-Projekt stammen.

Klima-Ensembles könnte es jedoch vorteilhaft sein, Kern-Ensembles zu verwenden (DWD, 2021). Damit sollten die Redundanzen aus sehr ähnlichen Klimaprojektionen aus den Gesamtensembles entfernt werden, aber es wird dennoch die gesamte Bandbreite der projizierten Klimavariablen erfasst (DWD, 2023b). Diesbezüglich werden zwei Kern-Ensembles empfohlen, die auch in diesem Bericht ausgewertet wurden (s. Kap. 4.8):

1. Das **DWD-Kern-Ensembles**, das aus fünf RCP2.6-Klimamodellen, sechs RCP4.5-Klimamodellen und sechs RCP8.5-Klimamodellen besteht (Dalelane, 2021; DWD, 2023b); und
2. das **Bayern-Ensemble\_v1**, das aus acht RCP2.6-Klimamodellen, sechs RCP4.5-Klimamodellen und zwölf RCP8.5-Klimamodellen besteht (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2020).

### 3 Vorverarbeitung der Klima-Eingabedaten

#### 3.1 Zusammenfassung der Klimamodelle

Eine Übersicht über die 44 Mitglieder<sup>6</sup> des DWD-Referenz-Ensembles v2018 (DWD, 2023a) ist in Tabelle 3-1 aufgeführt. Es besteht aus 11 RCP2.6-Simulationen, 12 RCP4.5-Simulationen und 21 RCP8.5-Simulationen. Für jedes dieser Klimamodelle sind tägliche Klimadaten vom 01.01.2006, d. h. dem Beginn des RCP-Antriebs in den CMIP5-Klimamodellen, bis zum Ende des Jahres 2100 verfügbar. Die für die RCP-Pfade verwendeten Farben folgen den Empfehlungen von Linke et al. (2024). Der Einfachheit halber wird jedem Klimamodell eine Abkürzung zugewiesen, in Anlehnung an die in Hübener et al. (2017b) vorgestellten Abkürzungen. Die vollständigen Namen aller GCM- und RCM-Akronyme in Tabelle 3-1 sind in Appendix C aufgeführt.

GCM können mehrfach durchgeführt werden, jedoch mit kleinen (und zufälligen) Änderungen in den physikalischen Ausgangsbedingungen für jeden Modelllauf. Diese verschiedenen Modellläufe werden als Realisierungen eines GCM bezeichnet, die Zahl mit 'r' in der GCM-Spalte in Tabelle 3-1 steht für die verwendete Realisierungsnummer. Die Klimadaten wurden vom Portal des Deutschen Klimarechenzentrums heruntergeladen: <https://esgf-metagrid.cloud.dkrz.de/>.

Tabelle 3-1: Übersicht über die 44 Mitglieder (Klimaprojektionen) des DWD-Referenz-Ensembles v2018.

RCP	GCM	RCM	Abkürzung
2.6	ICHEC-EC-EARTH (r12)	CLMcom-CCLM4-8-17	R26-E12-CLM
	ICHEC-EC-EARTH (r12)	SMHI-RCA4	R26-E12-RCA
	ICHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E	R26-E12-RAC
	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	SMHI-RCA4	R26-HG2-RCA <sup>a, b</sup>
	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	KNMI-RACMO22E	R26-HG2-RAC <sup>a, b</sup>
	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	R26-MP1-CLM
	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	UHOH-WRF361H	R26-MP1-WRF <sup>c</sup>
	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	SMHI-RCA4	R26-MP1-RCA
	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	MPI-CSC-REMO2009	R26-MP1-R09
	MIROC-MIROC5 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	R26-MI5-CLM
	MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	MPI-CSC-REMO2009	R26-MP2-R09
	4.5	ICHEC-EC-EARTH (r12)	CLMcom-CCLM4-8-17
ICHEC-EC-EARTH (r12)		SMHI-RCA4	R45-E12-RCA
ICHEC-EC-EARTH (r12)		KNMI-RACMO22E	R45-E12-RAC
MOHC-HadGEM2-ES (r1)		CLMcom-CCLM4-8-17	R45-HG2-CLM <sup>b, d</sup>
MOHC-HadGEM2-ES (r1)		SMHI-RCA4	R45-HG2-RCA <sup>b, d</sup>
MOHC-HadGEM2-ES (r1)		KNMI-RACMO22E	R45-HG2-RAC <sup>b, d</sup>
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)		CLMcom-CCLM4-8-17	R45-MP1-CLM
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)		SMHI-RCA4	R45-MP1-RCA
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)		MPI-CSC-REMO2009	R45-MP1-R09
IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1)		SMHI-RCA4	R45-IP5-RCA

<sup>6</sup> Zum Zeitpunkt dieses Projekts besteht das DWD-Referenz-Ensemble aus 44 Klimamodellen. Diese Anzahl könnte sich künftig allerdings noch ändern.

RCP	GCM	RCM	Abkürzung
4.5	MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	MPI-CSC-REMO2009	R45-MP2-R09
4.5	ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E	R45-E01-RAC
8.5	ICHEC-EC-EARTH (r12)	CLMcom-CCLM4-8-17	R85-E12-CLM
8.5	ICHEC-EC-EARTH (r12)	GERICS-REMO2015	R85-E12-R15
8.5	ICHEC-EC-EARTH (r12)	UHOH-WRF361H	R85-E12-WRF <sup>c</sup>
8.5	ICHEC-EC-EARTH (r12)	SMHI-RCA4	R85-E12-RCA
8.5	ICHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E	R85-E12-RAC
8.5	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	R85-HG2-CLM <sup>a, b</sup>
8.5	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	GERICS-REMO2015	R85-HG2-R15 <sup>a, b</sup>
8.5	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	UHOH-WRF361H	R85-HG2-WRF <sup>a, b, c</sup>
8.5	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	SMHI-RCA4	R85-HG2-RCA <sup>a, b</sup>
8.5	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	KNMI-RACMO22E	R85-HG2-RAC <sup>a, b</sup>
8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	R85-MP1-CLM
8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	UHOH-WRF361H	R85-MP1-WRF <sup>c</sup>
8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	SMHI-RCA4	R85-MP1-RCA
8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	MPI-CSC-REMO2009	R85-MP1-R09
8.5	CCCma-CanESM2 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	R85-CA2-CLM
8.5	CCCma-CanESM2 (r1)	GERICS-REMO2015	R85-CA2-R15
8.5	MIROC-MIROC5 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	R85-MI5-CLM
8.5	MIROC-MIROC5 (r1)	GERICS-REMO2015	R85-MI5-R15
8.5	IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1)	SMHI-RCA4	R85-IP5-RCA
8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	MPI-CSC-REMO2009	R85-MP2-R09
8.5	ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E	R85-E01-RAC

a: Projektionen nur bis 2099 verfügbar.

b: Verwendet ein 360-tägiges Jahr, wobei alle Monate 30 Tage haben.

c: Die Hargreaves-Samani-Methode wurde in dieser Studie verwendet (s. Kap. 3.3).

d: Projektionen nur bis 2095 verfügbar.

Für jedes der in Tabelle 3-1 aufgelisteten Klimamodelle sind auch Daten für den historischen Teil des Klimamodells vorhanden, der den Zeitraum 01.01.1951 - 31.12.2005 umfasst. Für die historischen Teile werden beobachtete Konzentrationen von Atmosphärenstoffen in den Modellen vorgegeben (Hennemuth et al., 2021). Diese historischen Modellteile sind in Tabelle 3-2 aufgeführt. Die historischen und zukünftigen Modellteile derselben GCM-RCM-Kombination werden miteinander zu kontinuierlichen Zeitreihen kombiniert. Zum Beispiel wird der erste Eintrag in Tabelle 3-2 (HIS-E12-CLM) als historischer Teil aller entsprechenden Klimamodelle in Tabelle 3-1 (R26-E12-CLM, R45-E12-CLM und R85-E12-CLM) verwendet.

*Tabelle 3-2: Entsprechende historische Teile der Klimaprojektionen des DWD-Referenz-Ensembles v2018.*

GCM	RCM	Abkürzung
ICHEC-EC-EARTH (r12)	CLMcom-CCLM4-8-17	HIS-E12-CLM
ICHEC-EC-EARTH (r12)	GERICS-REMO2015	HIS-E12-R15
ICHEC-EC-EARTH (r12)	UHOH-WRF361H	HIS-E12-WRF <sup>a</sup>
ICHEC-EC-EARTH (r12)	SMHI-RCA4	HIS-E12-RCA
ICHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E	HIS-E12-RAC
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	HIS-HG2-CLM <sup>b</sup>

GCM	RCM	Abkürzung
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	GERICS-REMO2015	HIS-HG2-R15 <sup>b</sup>
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	UHOH-WRF361H	HIS-HG2-WRF <sup>a, b</sup>
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	SMHI-RCA4	HIS-HG2-RCA <sup>b</sup>
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	KNMI-RACMO22E	HIS-HG2-RAC <sup>b</sup>
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	HIS-MP1-CLM
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	UHOH-WRF361H	HIS-MP1-WRF <sup>a</sup>
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	SMHI-RCA4	HIS-MP1-RCA
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	MPI-CSC-REMO2009	HIS-MP1-R09
CCCma-CanESM2 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	HIS-CA2-CLM
CCCma-CanESM2 (r1)	GERICS-REMO2015	HIS-CA2-R15
MIROC-MIROC5 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	HIS-MI5-CLM
MIROC-MIROC5 (r1)	GERICS-REMO2015	HIS-MI5-R15
IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1)	SMHI-RCA4	HIS-IP5-RCA
MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	MPI-CSC-REMO2009	HIS-MP2-R09
ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E	HIS-E01-RAC

a: Die Hargreaves-Samani-Methode wurde in dieser Studie verwendet (s. Kap. 3.3).

b: Verwendet ein 360-tägiges Jahr, wobei alle Monate 30 Tage haben.

Für die in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten wurde mGROWA mit den Eingaben jedes der historischen Klimamodelle über den Zeitraum vom 01.11.1970 (entspricht dem Beginn des hydrologischen Jahres 1971) bis zum 31.12.2005 betrieben. mGROWA wurde dann mit den Eingaben jedes der künftigen Klimamodelle vom 01.01.2006 bis zum 31.10.2100 durchgeführt, was dem Ende des hydrologischen Jahres 2100 entspricht. Daher wird für die Analyse der modellierten Auswirkungen des Klimawandels der 30-jährige Referenzzeitraum der hydrologischen Jahre 1971-2000 verwendet. Dies entspricht der Empfehlung der World Meteorological Organization (WMO), den letzten 30-Jahres-Zeitraum mit einem Jahr, das mit 0 endet, zu verwenden (World Meteorological Organization, 2017), da die RCP-Antriebe für die CMIP5-Klimamodelle im Jahr 2006 beginnen.

Das in Teil 1 dieses Berichts beschriebene kalibrierte und validierte mGROWA-Modellsetup wurde für alle mGROWA-Modellläufe verwendet.

### 3.2 Niederschlagsdaten

Klimamodelle haben systematische Fehler (Bias) in ihren Ergebnissen. So werden beispielsweise in der Regel zu viele Regentage modelliert und extreme Niederschläge unterschätzt (Copernicus Climate Change Service, 2021). Der Niederschlag weist eine viel komplexere räumliche und zeitliche Variabilität auf als die Temperatur, und seine Reaktion auf die globale Erwärmung hängt entscheidend von der Entwicklung der regionalen Zirkulationen ab (Giorgi, 2010). Aus diesem Grund wurde eine Bias-Korrektur der Niederschlagsdaten für alle Klimamodelle vorgenommen.

Für die Korrektur von Niederschlagsdaten wurde eine Reihe von Methoden zur Bias-Korrektur entwickelt (Teutschbein und Seibert, 2012). Für dieses Projekt wurde die „Local Intensity Scaling“-Methode (LOCI) eingesetzt (Schmidli et al., 2006). Die LOCI-Methode korrigiert die Niederschlagsfrequenz und -intensität durch die Anwendung eines Schwellenwerts für die Niederschlagsintensität und auf der Grundlage von beobachteten Niederschlagsdaten über den historischen Zeitraum (Schmidli et al., 2006).

Die Implementierung der LOCI-Methode erfolgt in zwei Schritten: Zunächst wird aus den täglichen Niederschlagszeitreihen des Klimamodells für jeden Monat ein Schwellenwert für die nassen Tage bestimmt, so dass die Überschreitung des Schwellenwerts mit der Häufigkeit der nassen Tage in den beobachteten Zeitreihen übereinstimmt. Anschließend wird der Skalierungsfaktor anhand dieser Nasstage-Intensitäten bestimmt (Gl. 3-1):

$$sL = \frac{\langle p^o : p^o \geq p_{WDT}^o \rangle - p_{WDT}^o}{\langle p^m : p^m \geq p_{WDT}^m \rangle - p_{WDT}^m} \quad \text{Gl. 3-1}$$

mit:	$sL$	=	berechneter Skalierungsfaktor nach LOCI-Methode	(-)
	$p^o$	=	tägliche Niederschlagswerte der Beobachtungen	(mm/T)
	$p^m$	=	tägliche Niederschlagswerte des Klimamodells	(mm/T)
	WDT	=	„wet day threshold“	(mm)

Die Winkelklammern bezeichnen langjährige Mittelwerte. Die Zeitreihe des Modells wird dann entsprechend Bias-korrigiert (Gl. 3-2):

$$\hat{p}(t) = \max(p_{WDT}^o + sL(p^m(t) - p_{WDT}^m), 0) \quad \text{Gl. 3-2}$$

Hierbei bezeichnet  $\hat{p}$  die korrigierten Niederschlagswerte.

Tägliche Niederschlagsdaten sind für alle Klimamodelle an RCM-Gitterpunkten verfügbar (vgl. Kap. 3.4). Diese LOCI-Niederschlagskorrektur wurde für die Daten an jedem Gitterpunkt für jedes Klimamodell durchgeführt. Die monatlichen Schwellenwerte und Skalierungsfaktoren wurden anhand beobachteter Niederschlagsdaten für den Zeitraum 1971-2000 berechnet, wobei die Beobachtungsdaten auf die RCM-Gitterpunkte projiziert wurden. Diese Schwellenwerte und Skalierungsfaktoren werden dann auf die gesamte Zeitreihe angewendet.

### 3.3 Potenzielle Evapotranspirationsdaten

Während die täglichen Niederschlagswerte als Direktoutput für alle Klimamodelle des DWD-Referenz-Ensembles zur Verfügung stehen, ist dies bei den potenziellen Evapotranspirationswerten nicht der Fall. Die für das mGROWA-Modell erforderlichen Eingaben zur potenziellen Evapotranspiration müssen daher aus den verfügbaren Variablen der Klimamodelle abgeleitet werden.

Eine Standardmethode für die Ableitung der potenziellen Evapotranspirationswerte in Deutschland ist die in ATV-DVWK (2002) vorgestellte Methode, die auf der Penman-Monteith-Methode (Monteith, 1965) basiert und in Gl. 3-3 dargestellt ist. Diese Methode berücksichtigt viele Variablen, die die potenzielle Evapotranspiration beeinflussen (z. B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Oberflächendruck, Windgeschwindigkeit und Nettoeinstrahlung) und wird - falls diese Variablen vorliegen - bevorzugt verwendet.

$$et_o = \frac{s}{s + \gamma^*} \cdot Rn^* + \frac{90 \cdot \gamma}{s + \gamma^*} \cdot \frac{e_s(T)}{T_{mean} + 273} \cdot \left(1 - \frac{U}{100}\right) \cdot v_2 \quad \text{Gl. 3-3}$$

mit:	$et_o$	=	Gras-Referenzevapotranspiration	(mm/T)
	$T_{mean}$	=	Lufttemperatur als Tagesmittel	(°C)
	$e_s(T)$	=	Sättigungsdampfdruck	(hPa)
	$s$	=	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve über Wasser	(hPa/K)
	$\gamma$	=	psychrometrische Konstante (0,65 hPa/K)	(hPa/K)

$\gamma^*$	=	modifizierte psychrometrische Konstante (s. Gl. 3-4)	(hPa/K)
$Rn^*$	=	Nettostrahlung	(W/m <sup>-2</sup> )
$U$	=	relative Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe	(%)
$v_2$	=	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe (Tagesmittel)	(m/s)

Die modifizierte psychrometrische Konstante wird nach Gl. 3-4 berechnet.

$$\gamma^* = \gamma (1 + 0,34 \cdot v_2) \quad \text{Gl. 3-4}$$

Alle Formeln, die für die Anwendung dieser Methode zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration erforderlich sind, sind im Anhang C der ATV-DVWK (2002) zu finden.

Für vier der Klimamodelle (ein RCP2.6-Modell und drei RCP8.5-Modelle) stehen nicht genügend Variablen zur Verfügung, um die Methode nach ATV-DVWK (2002) zur Ableitung der potenziellen Evapotranspiration anzuwenden. Für diese vier Klimamodelle wurde die Hargreaves-Samani-Methode verwendet, die nur die Temperatur als Ausgabe des Klimamodells zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration erfordert (Hargreaves & Samani, 1985; Gl. 3-5). Diese Klimamodelle sind mit Fußnoten in Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 aufgeführt.

$$et_0 = 0,0023 \cdot (T_{mean} + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot R_a \quad \text{Gl. 3-5}$$

mit:	$T_{mean}$	=	Lufttemperatur als Tagesmittel	(°C)
	$T_{max}$	=	maximale Tageslufttemperatur	(°C)
	$T_{min}$	=	minimale Tageslufttemperatur	(°C)
	$R_a$	=	mittlere extraterrestrische Strahlung	(mm/T)

Der mittlere extraterrestrische Strahlungsterm wird auf täglicher Basis und anhand des Breitengrades berechnet.

### 3.4 Räumliche Interpolation der klimatischen Eingaben aus Gitterpunkten

Nach Anwendung der in Kap. 3.2 und Kap. 3.3 beschriebenen Verfahren stehen die täglichen Bias-korrigierten Niederschlagsdaten und täglichen potenziellen Evapotranspirationsdaten an den Gitterpunkten des entsprechenden RCM zur Verfügung. Abb. 3-1 zeigt beispielhaft, wie die Gitterpunkte eines der RCM-Modelle (CLMcom-CCLM4-8-17) die Höhenkarte überlagern (vgl. Teil 1, Abb. 3.5). Alle verwendeten RCM haben die gleiche räumliche Auflösung (12,5 km), aber einige Raster sind gegenüber dem in dieser Abbildung gezeigten Raster versetzt.

Zur Erzeugung von Klima-Inputdaten mit der räumlichen Auflösung des 100 m mGROWA-Modellrasters wurde eine bilineare Interpolation verwendet. Die bilineare Interpolation ist die Erweiterung einer linearen Interpolation auf einen zweidimensionalen Raum (Rechteck). Innerhalb eines solchen Rechtecks, bei dem die Werte an allen vier Ecken (Gitterpunkte des RCM, vgl. Abb. 3-1) bekannt sind, wird die Interpolation sowohl in x- als auch in y-Richtung durchgeführt. Auf diese Weise werden die neuen Werte für alle Rasterzellen (100 m x 100 m) ermittelt.

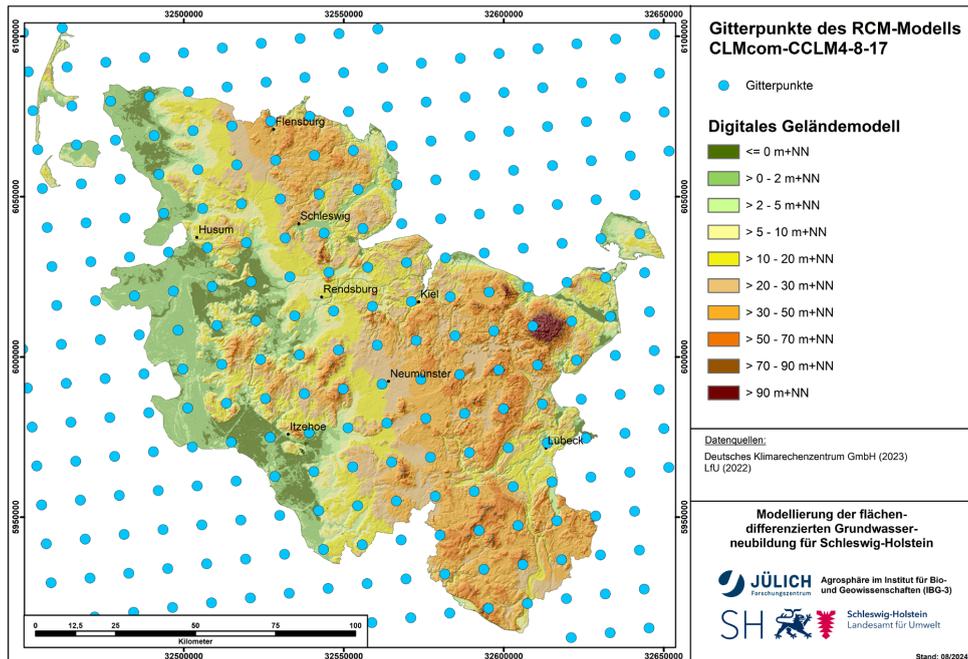


Abbildung 3-1: Gitterpunkte des RCM-Modells CLMcom-CCLM4-8-17.

### 3.5 Vergleich der Änderungen bei Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration

Für alle 44 Klimamodelle (vgl. Tabelle 3-1) wurde das räumliche Mittel der langjährigen mittleren Jahresniederschläge und der potenziellen Evapotranspiration für jeden der drei Auswertungszeiträume berechnet: 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100. Diese Werte wurden dann mit den räumlichen Mittelwerten des mittleren Jahresniederschlags und der potenziellen Evapotranspiration für 1971-2000 für jeden der entsprechenden historischen Teile der Klimamodelle (Tabelle 3-2) verglichen, um die Veränderungen der klimatischen Eingaben für jedes der Klimamodelle zu quantifizieren<sup>7</sup>.

Die Abb. 3-2 bis Abb. 3-4 zeigen die mittleren jährlichen Veränderungen des Niederschlags (y-Achse) gegenüber den mittleren jährlichen Veränderungen der potenziellen Evapotranspiration (x-Achse). Für jede Abbildung zeigen die drei Diagramme die mittleren jährlichen Änderungen über die drei 30-Jahres-Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971-2000. Abb. 3-2 stellt die 11 RCP2.6-Klimamodelle dar, Abb. 3-3 die 12 RCP4.5-Klimamodelle und Abb. 3-4 die 21 RCP8.5-Klimamodelle.

<sup>7</sup> Obwohl die Klimamodelle den Zeitraum vor den RCP-Antrieben abdecken, unterscheiden sich die mittleren jährlichen Niederschlags- und potenziellen Evapotranspirationswerte aus den Klimamodellen trotzdem von den beobachteten Niederschlags- und potenziellen Evapotranspirationswerten über diesen Zeitraum (vgl. Abb. A-1 und Abb. A-3). Für die Evaluierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung werden die Veränderungen der Grundwasserneubildung für jedes Klimamodell im Vergleich zur historischen Komponente des jeweiligen Modells verwendet anstatt der absoluten Werte der Grundwasserneubildung (s. Kap. 4.3). Aus diesem Grund werden Niederschlag und potenzielle Evapotranspiration hier in Form von Änderungen im Vergleich zum historischen Teil desselben Klimamodells und nicht im Vergleich zu den beobachteten Werten dargestellt.

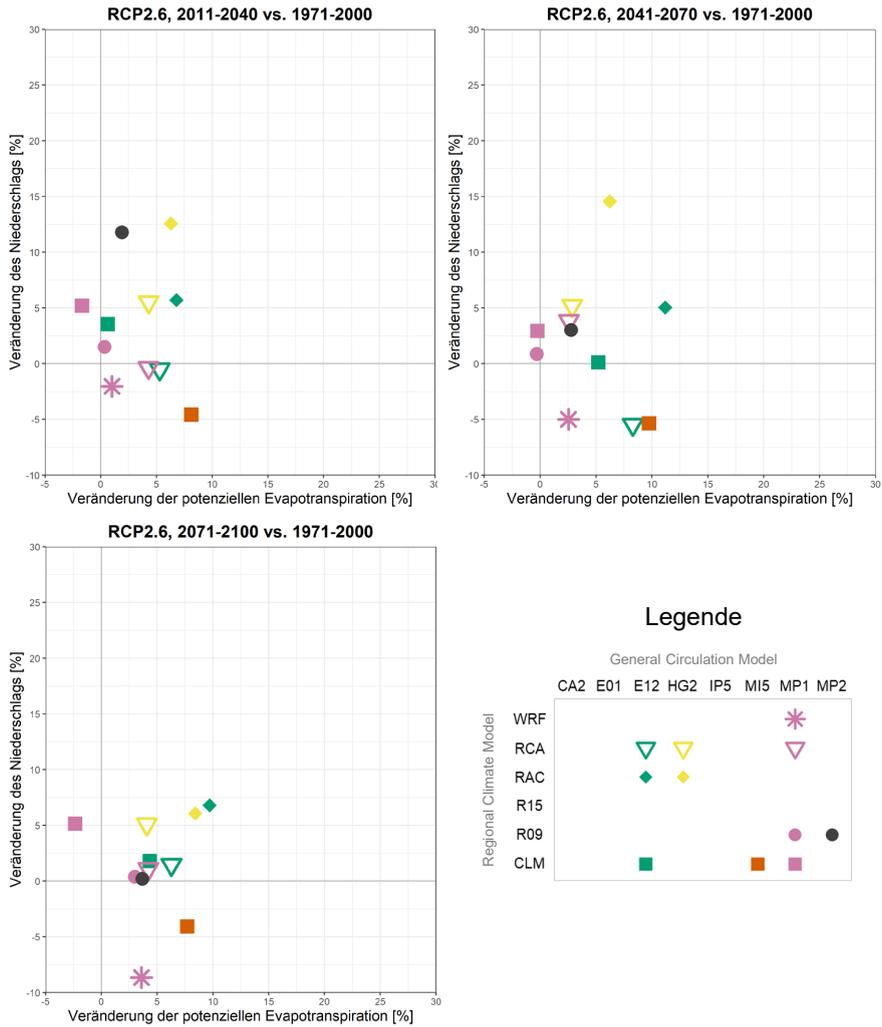


Abbildung 3-2: Mittlere jährliche Veränderungen der potenziellen Evapotranspiration und des Niederschlags im Vergleich zum entsprechenden Referenzzeitraum 1971-2000 für alle RCP2.6-Klimamodelle.

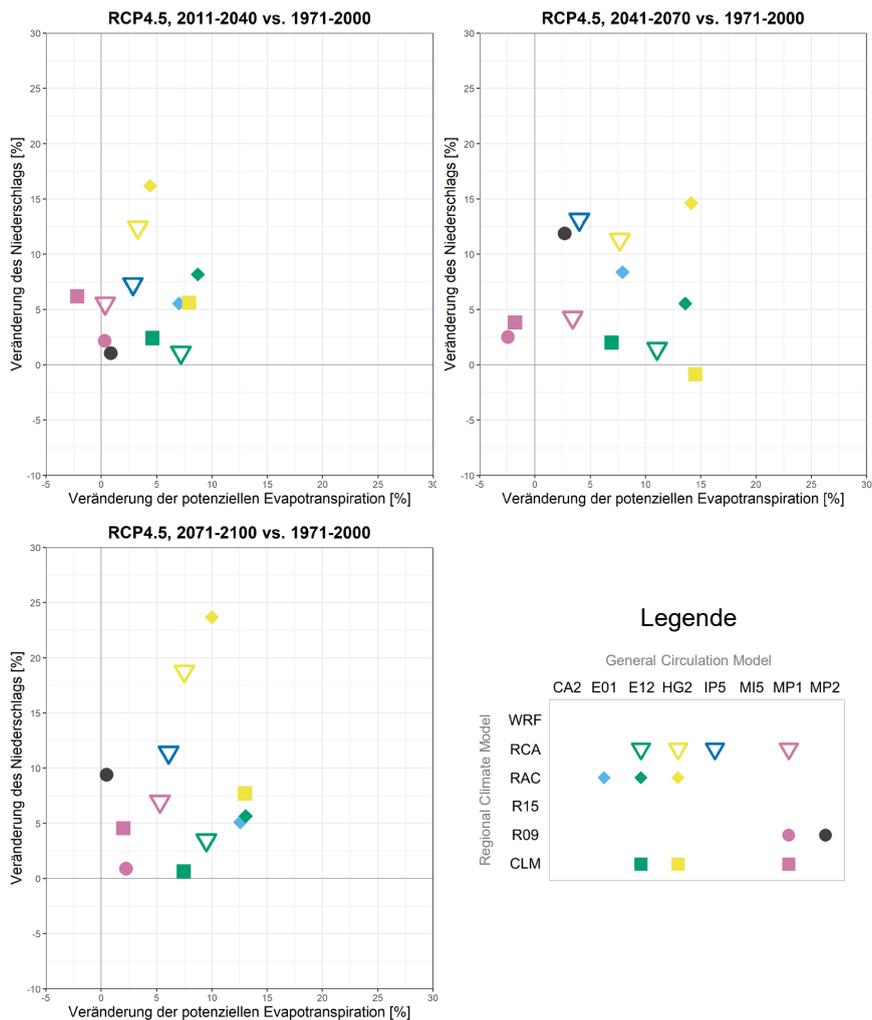


Abbildung 3-3: Mittlere jährliche Veränderungen der potenziellen Evapotranspiration und des Niederschlags im Vergleich zum entsprechenden Referenzzeitraum 1971-2000 für alle RCP4.5-Klimamodelle.

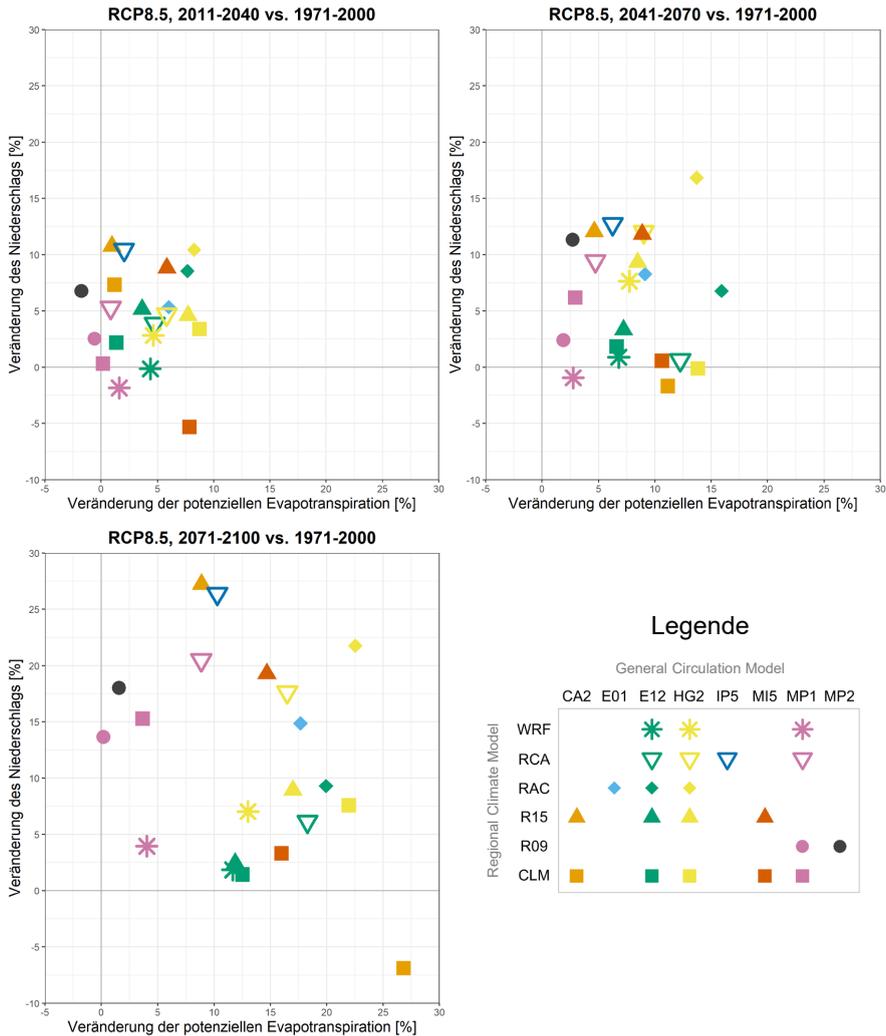


Abbildung 3-4: Mittlere jährliche Veränderungen der potenziellen Evapotranspiration und des Niederschlags im Vergleich zum entsprechenden Referenzzeitraum 1971-2000 für alle RCP8.5-Klimamodelle.

Wie erwartet, zeigen fast alle Klimamodelle einen Anstieg der potenziellen Evapotranspiration, der durch einen Temperaturanstieg bedingt ist. Die stärksten Zunahmen sind in den späteren Perioden der RCP8.5-Szenarien zu verzeichnen. Bezüglich der Niederschlagsveränderungen zeigen die meisten Modelle eine Zunahme der Niederschläge in zukünftigen Zeiträumen. Für den Zeitraum 2071-2100 zeigen nur drei Klimamodelle (zwei RCP2.6-Modelle und ein RCP8.5-Modell) eine Abnahme des Niederschlags. Für fast alle RCP und Zeiträume ist die Spanne der langjährigen mittleren prozentualen Veränderung der potenziellen Evapotranspiration bei allen Klimamodellen geringer als die Spanne der langjährigen mittleren prozentualen Veränderung des Niederschlags.

Ähnlich wie bei den obigen Abbildungen werden die mittleren Veränderungen der potenziellen Evapotranspiration und des Niederschlags für das Winterhalbjahr (November bis April) und das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) in Appendix D dargestellt.

## 4 Grundwasserneubildung unter dem Einfluss des Klimawandels bis 2100

### 4.1 Referenzniveau der Netto-Grundwasserneubildung basierend auf beobachteten Klimaeingaben

Der für die Analyse der Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels verwendete 30-jährige Referenzzeitraum umfasst die hydrologischen Jahre 1971-2000. Dies entspricht der Empfehlung der WMO, den letzten 30-Jahres-Zeitraum mit einem Jahr, das mit 0 endet, zu verwenden (World Meteorological Organization, 2017), da die RCP-Antriebe im Jahr 2006 beginnen. Die Abb. 4-1 wiederholt die in Teil 1 dieses Berichts (Abb. A-13) dargestellten Ergebnisse, in denen die mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung über den Zeitraum 1971-2000 dargestellt ist. Sie wurde in Teil 1 dieses Berichtes unter Verwendung der beobachteten klimatologischen Inputs simuliert. Die mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung für diesen Zeitraum, die nur über Landflächen berechnet wird, beträgt 150 mm/a. Wie in Teil 1 dieses Berichts beziehen sich alle in diesem Kapitel dargestellten Jahresergebnisse auf die hydrologischen Jahre (November bis Oktober).

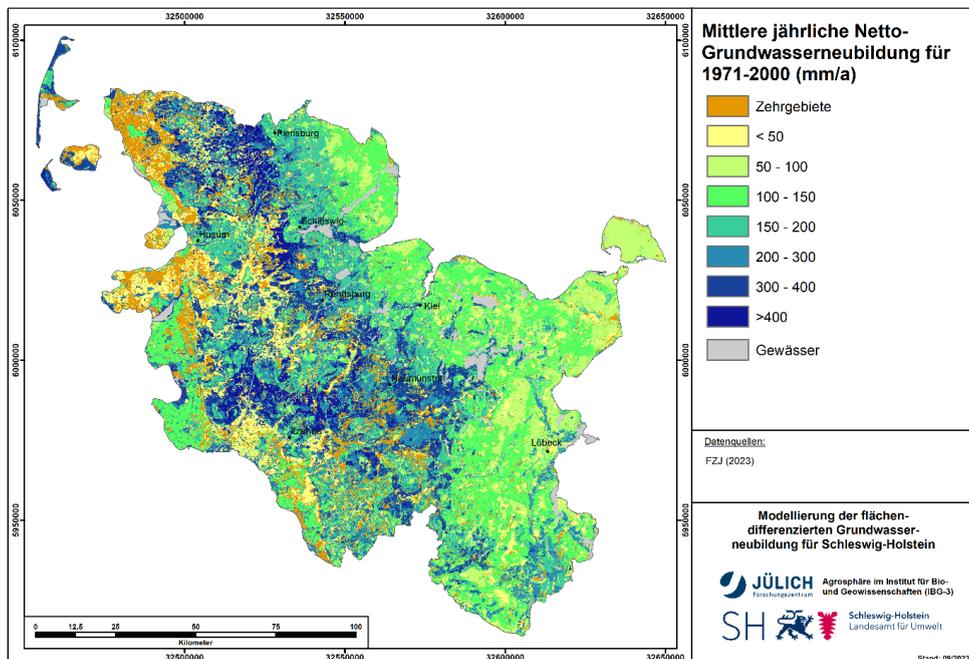


Abbildung 4-1: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung (1971-2000).

### 4.2 Bewertung des Modell-Bias über den Referenzzeitraum 1971-2000

Obwohl die Niederschlagsdaten an den Gitterpunkten Bias-korrigiert wurden (s. Kap. 3.2), weisen die mit dem Ensemble für die historische Referenzperiode (1971-2000) berechneten Grundwasserneubildungshöhen in den einzelnen Projektionen im Vergleich zu den mit beobachteten Klimadaten berechneten Netto-Grundwasserneubildungswerten immer noch einen variierenden und räumlich unterschiedlich stark ausgeprägten sogenannten Rest-Bias auf. Die

Kenntnis eines solchen Rest-Bias ist im Hinblick auf die aus den projizierten Änderungssignalen zu ziehenden Schlussfolgerungen von zusätzlichem Wert. Der Rest-Bias der Netto-Grundwasserneubildung wird in diesem Kapitel mit verschiedenen Kennzahlen quantifiziert.

Die Klimaprojektionen sind nicht zeitpunktgenau. Das heißt, sie bilden nicht die Wetterlagen der Vergangenheit in ihrer zeitlichen Reihenfolge exakt ab, sondern zielen auf die Reproduktion langjähriger Klimastatistiken (USDA, 2024). Dabei werden die interannuellen Variationen und die saisonalen Variationen eines einzelnen Jahres individuell von realen Abläufen abweichen. Aus diesen Gründen zielt die Bewertung des Rest-Bias nicht auf eine direkte Gegenüberstellung der zeitgenauen simulierten Monats- und Jahreszeitreihen ab, sondern auf die Bewertung, ob die langfristigen Statistiken, die durch die Klimamodelle über den Zeitraum 1971-2000 wiedergegeben werden, denen der beobachteten Ergebnisse entsprechen. Um dies zu realisieren, werden die in diesem Kapitel vorgestellten Indikatoren berechnet. Dazu werden zunächst die simulierten Netto-Grundwasserneubildungswerte sowohl aus dem mGROWA-Modell mit beobachteten Klimaeingaben als auch aus dem mGROWA-Modell mit dem entsprechenden Klimamodell numerisch sortiert.

Eine Methode zur Veranschaulichung, wie gut das mit Klimamodellen angetriebene mGROWA-Modell die langfristigen Statistiken, die sich aus den beobachteten Inputs ergeben, reproduziert, ist ein Taylor-Diagramm (Taylor, 2001). Das Taylor-Diagramm stellt  $r$  (Pearson-Korrelationskoeffizient; Gl. 4-1),  $\sigma$  (Standardabweichung; Gl. 4-2) und  $RMSE$  (*root mean square error*; Gl. 4-3) dar.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{rn,obs,i} - \bar{Q}_{rn,obs}) \cdot (Q_{rn,mod,i} - \bar{Q}_{rn,mod})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{rn,obs,i} - \bar{Q}_{rn,obs})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{rn,mod,i} - \bar{Q}_{rn,mod})^2}} \quad \text{Gl. 4-1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{rn,mod,i} - \bar{Q}_{rn,mod})^2}{n}} \quad \text{Gl. 4-2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{rn,mod,i} - \hat{Q}_{rn,mod,i})^2}{n}} \quad \text{Gl. 4-3}$$

mit	$n$	= Anzahl der Monate bzw. Jahre, die für den Vergleich der Zeitreihen verwendet werden	(-)
	$Q_{rn,obs}$	= Monatliche bzw. jährliche Netto-Grundwasserneubildung, berechnet unter Verwendung der beobachteten Klimaeingaben	(mm/mon oder mm/a)
	$Q_{rn,mod}$	= Monatliche bzw. jährliche Netto-Grundwasserneubildung, berechnet unter Verwendung der Eingaben der Klimamodelle	(mm/mon oder mm/a)
	$\bar{Q}_{rn,obs}$	= Mittlere monatliche bzw. jährliche Netto-Grundwasserneubildung, berechnet unter Verwendung der beobachteten Klimaeingaben	(mm/mon oder mm/a)
	$\bar{Q}_{rn,mod}$	= Mittlere monatliche bzw. jährliche Netto-Grundwasserneubildung, berechnet unter Verwendung der Eingaben der Klimamodelle	(mm/mon oder mm/a)
	$\hat{Q}_{rn,mod}$	= Durch ein lineares Modell berechnete monatliche bzw. jährliche Netto-Grundwasserneubildung	(mm/mon oder mm/a)

Abb. 4.2 zeigt Taylor-Diagramme, die mit Hilfe der geordneten monatlichen (links) und jährlichen (rechts) räumlichen Mittelwerte der Netto-Grundwasserneubildung über den Referenzzeitraum 1971-2000 für alle Klimamodelle berechnet wurden. Die historische beobachtete Referenzsimulation ist als grauer Punkt dargestellt. Ihre Position auf der x-Achse in der Mitte des

Kreises, der den RMSE-Wert anzeigt, ist dadurch zu erklären, dass der *RMSE* von zwei identischen Datensätzen gleich Null ist und die Korrelation  $r$  gleich 1. Je näher sich die Punkte der Klimamodelle auf den entsprechenden Linien und Kurven am Referenzpunkt befinden, desto stärker ähneln die räumlichen Verteilungen derjenigen der Referenzsimulation und desto besser kann die Modelleistung des jeweiligen Ensemblemitglieds eingeschätzt werden. Allerdings können perfekte Ergebnisse nicht erzielt werden, da die Klimamodelle nur die langjährigen Klimastatistiken über den historischen Referenzzeitraum nachbilden sollen. Die in Abb. 4-2 dargestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass alle Klimamodelle die im historischen Referenzzeitraum beobachteten Grundwasserneubildungsmuster adäquat abbilden. Wie zu erwarten, zeigt sich, dass die auf der Monatsskala berechneten Indikatoren aufgrund der starken Saisonalität der Grundwasserneubildungsmuster (vgl. Teil 1, Abb. 5-1) die Simulation auf Grundlage der historischen Daten besser reproduziert als die auf der Jahresskala berechneten Indikatoren.

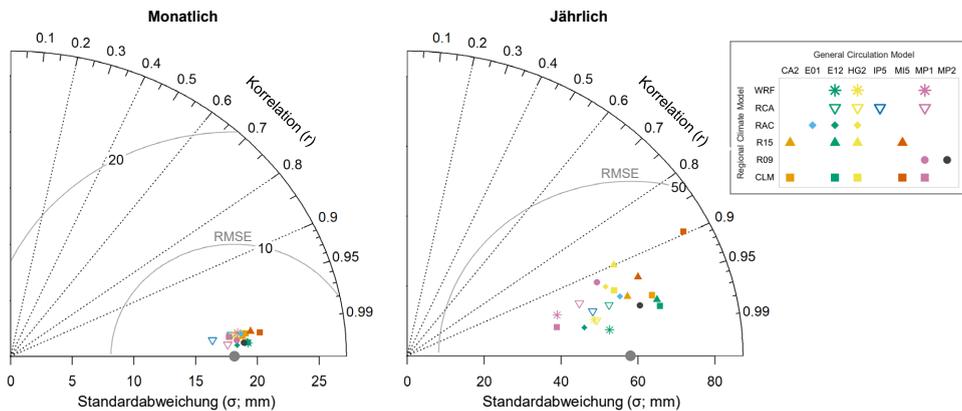


Abbildung 4-2: Taylor-Diagramme berechnet anhand der räumlichen Mittelwerte der modellierten Netto-Grundwasserneubildung über den Referenzzeitraum 1971-2000. Das linke Diagramm zeigt die monatlichen Ergebnisse und das rechte Diagramm die jährlichen Ergebnisse. *RMSE* und Standardabweichung in mm/mon bzw. mm/a. Der Referenzwert ist die auf der Grundlage der beobachteten Klimaeingaben berechnete Standardabweichung der Netto-Grundwasserneubildung und ist durch den grauen Punkt gekennzeichnet.

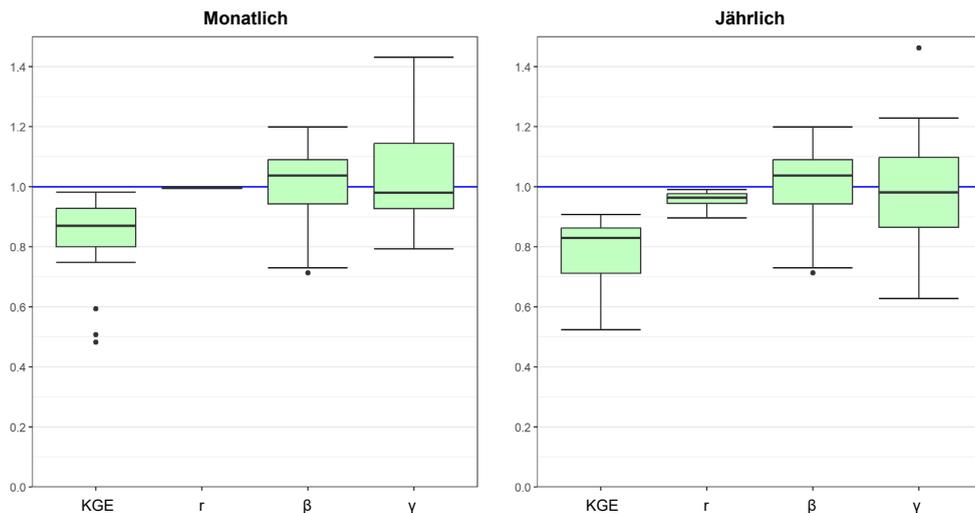
Ein weiterer Indikator für die Modelleistung ist die Kling-Gupta-Effizienz (KGE; Kling et al., 2012), die den Vorteil hat, dass sie in drei Komponenten zerlegt werden kann, die ein besseres Grundverständnis für den Ursprung von Diskrepanzen ermöglichen. Außerdem wird im Gegensatz zu typischen Indikatoren, die auf quadrierten Residuen beruhen, eine unverhältnismäßige Gewichtung von hohen Werten vermieden (Gupta et al., 2009). Die Formel für das KGE ist in Gl. 4-4 dargestellt, die Komponenten  $\beta$  (*bias ratio*) und  $\gamma$  (*variability ratio*) in den Gl. 4-5 und Gl. 4-6. Die Gleichung für  $r$  (Pearson-Korrelationskoeffizient) wurde bereits in Gl. 4-1 dargestellt.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad \text{Gl. 4-4}$$

$$\beta = \frac{\bar{Q}_{rn,mod}}{\bar{Q}_{rn,obs}} \quad \text{Gl. 4-5}$$

$$\gamma = \frac{\sigma_{mod} / \bar{Q}_{rn,mod}}{\sigma_{obs} / \bar{Q}_{rn,obs}} \quad \text{Gl. 4-6}$$

In Abb. 4-3 sind die KGE-Werte und deren Komponenten für jedes Klimamodell für die geordneten räumlichen Mittelwerte der monatlichen bzw. jährlichen Ergebnisse der Netto-Grundwasserneubildung dargestellt. Für das KGE und seine Komponenten ist ein Wert von 1 optimal (dargestellt durch die blaue Linie). Viele Studien betrachten einen KGE-Wert von mehr als 0,75 als Richtwert für eine gute Modellleistung (z. B. Thiemig et al., 2013; Towner et al., 2019; McNamara et al., 2021; Abdalla et al., 2022). Wie zuvor zeigen die Ergebnisse für die Klimamodelle eine gute Übereinstimmung mit den mGROWA-Ergebnissen anhand von Beobachtungsdaten über den Referenzzeitraum, wobei die meisten Klimamodelle KGE-Werte von mehr als 0,75 aufweisen. Darüber hinaus zeigen die  $\beta$ - und  $\gamma$ -Komponenten keine Tendenz zur Über- oder Unterschätzung, wobei die Mediane für die Klimamodelle nahe dem optimalen Wert von 1 liegen.



*Abbildung 4-3: Kling-Gupta-Efficiency (KGE) und deren Komponenten berechnet anhand der räumlichen Mittelwerte der modellierten Netto-Grundwasserneubildung über den Referenzzeitraum 1971-2000. Das linke Diagramm zeigt die monatlichen Ergebnisse und das rechte Diagramm die jährlichen Ergebnisse. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilsabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar. Die blauen Linien zeigen den optimalen Wert.*

Während in Abb. 4-2 und Abb. 4-3 die Modelleistung anhand der räumlichen Mittelwerte der Netto-Grundwasserneubildung über ganz Schleswig-Holstein bewertet wird, können Auswertungen auch für alle einzelnen Rasterzellen durchgeführt werden. Abb. 4-4 zeigt die Differenzen der mittleren jährlichen Netto-Grundwasserneubildung über Schleswig-Holstein, modelliert für alle 21 historischen Teile der Klimaprojektionen (vgl. Tabelle 3-2) für 1971-2000 im Vergleich zur Netto-Grundwasserneubildung, die auf beobachteten Klimaeingaben basiert (vgl. Abb. 4-1). Ein positiver Wert bedeutet, dass die im Klimamodell simulierte Netto-Grundwasserneubildung höher ist als diejenige, die auf der Grundlage der beobachteten Klimadaten simuliert wurde. Weiterhin ist auf jedem Diagramm der räumliche Mittelwert der Differenz zwischen der mittleren jährlichen Netto-Grundwasserneubildung, die mit dem jeweiligen historischen Klimamodell berechnet wurde, gegenüber den mit historischen Klimadaten simulierten Werten, dargestellt.

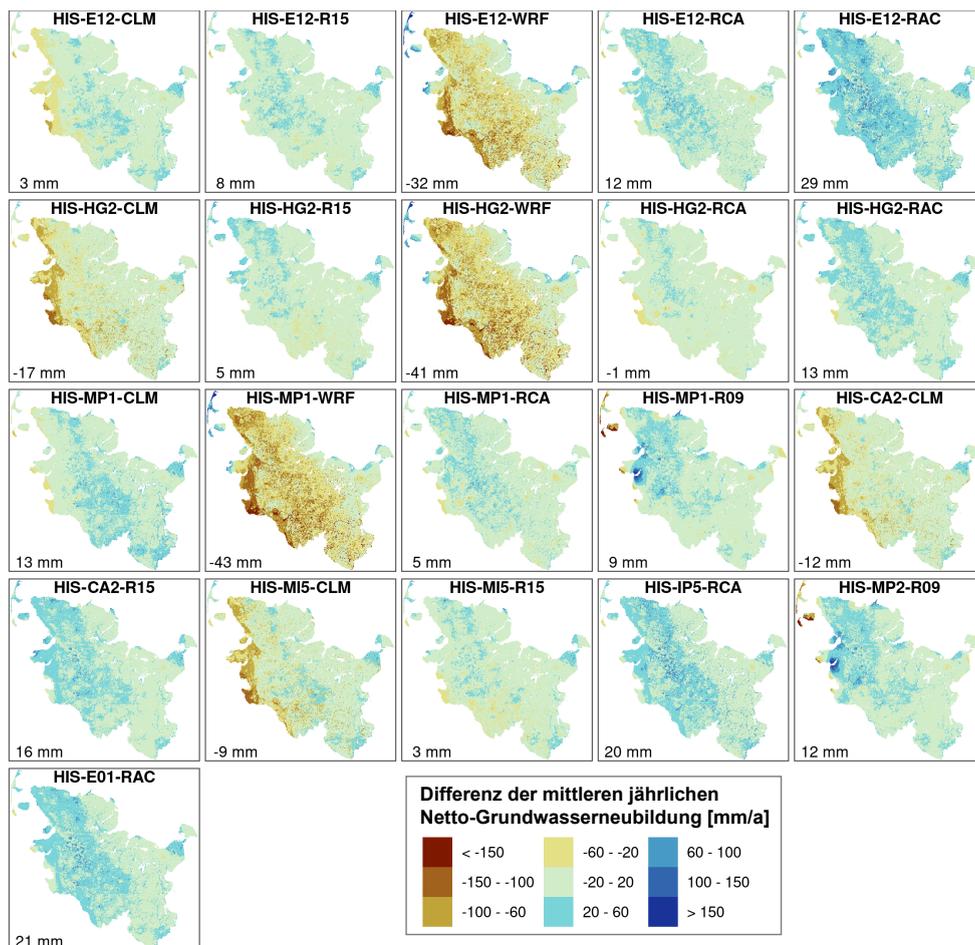


Abbildung 4-4: Mittlere jährliche Differenzen der simulierten Netto-Grundwasserneubildung für 1971-2000 für alle 21 historischen Teile der Klimamodelle gegenüber der Simulation auf der Grundlage beobachteter klimatischer Inputs. Ein positiver Wert bedeutet, dass die im Klimamodell simulierte Grundwasserneubildung höher ist als diejenige, die anhand der beobachteten klimatischen Eingaben simuliert wurde.

Die Ergebnisse zeigen in ihrer Gesamtheit eine gute Übereinstimmung der Klimamodelle mit den mGROWA-Ergebnissen auf Basis der Beobachtungsdaten, im größten Teil Schleswig-Holsteins bestehen nur minimale Unterschiede. Die höchsten Unterschiede treten meist in den Gebieten mit oberflächennahem Grundwasser auf (vgl. Teil 1, Abb. 3-11 und Abb. 3-12), wo Änderungen der potenziellen Evapotranspiration einen großen Einfluss auf die modellierten aktuellen Evapotranspirationsraten aufgrund von kapillar aufsteigendem Wasser bzw. der direkten Evapotranspiration aus dem Grundwasser haben. Darüber hinaus zeigt sich, dass die drei Klimamodelle, die das UHOH-WRF361H-RCM verwenden (vgl. Tabelle 3.2), tendenziell größere Differenzen aufweisen als die anderen Klimamodelle. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass für diese Klimamodelle aufgrund der Datenverfügbarkeit die Hargreaves-Samani-Methode zur Bestimmung der potenziellen Evapotranspiration verwendet werden musste, die im Vergleich zur Methode nach ATV-DVWK (2002) sehr vereinfacht ist.

Schließlich ist die Kling-Gupta-Efficiency in Abb. 4-5 für alle 21 historischen Teile der Klimamodelle dargestellt, die anhand der monatlichen Werte der Netto-Grundwasserneubildung für jede Rasterzelle berechnet wurde. Der Schwellenwert von -0,41 bildet den Grenzwert der Farbskala, da unterhalb dieses Wertes ein Modellergebnis nicht mehr als „reasonable“ anzusehen ist (Knoben et al., 2019).

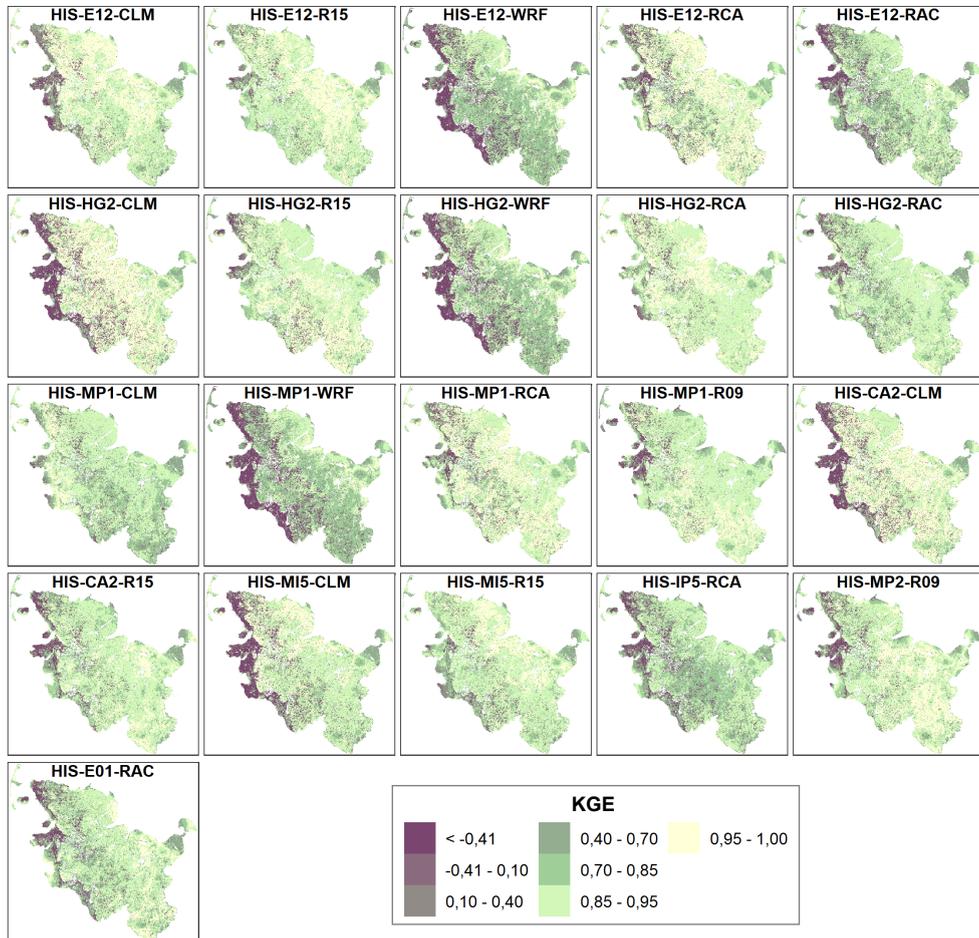


Abbildung 4-5: Monatliche KGE-Werte berechnet für 1971-2000 über alle Rasterzellen.

Wie bei der Bewertung der Differenzen in der mittleren jährlichen Netto-Grundwasserneubildung weisen die Klimamodelle in den meisten Gebieten Schleswig-Holsteins gute Ergebnisse auf. Die erwähnenswerte Ausnahme sind die Marschgebiete an der Westküste, die viele Bereiche mit oberflächennahem Grundwasser sowie künstlicher Entwässerung aufweisen.

Die Ergebnisse dieses Kapitels zeigen, dass mit hoher Zuverlässigkeit davon ausgegangen werden kann, dass die mit der mGROWA-Modellierung erzielten Ergebnisse für die zukünftigen Teile des Klimamodells als repräsentativ für potenzielle Klimawandelpfade betrachtet werden können. Allerdings sollte in der Praxis aufgrund des existierenden Rest-Bias weniger der Blick auf das absolute Niveau der projizierten Grundwasserneubildungshöhen gerichtet werden. Vielmehr sollten die Veränderungssignale einer Projektion in Bezug zum Referenzniveau (auf Basis beobachteter Klimadaten) bewertet werden, um ein absolutes zukünftiges Niveau abzuschätzen.

### 4.3 Veränderungen der Grundwasserneubildung in Schleswig-Holstein

Die räumlichen Mittelwerte der langfristigen mittleren jährlichen Netto-Grundwasserneubildung wurden für die Zeiträume 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 für alle 44 Ensemblemitglieder berechnet. In Appendix E sind Karten der mittleren langjährlichen Netto-Grundwasserneubildung über diese Zeiträume dargestellt. Die monatlichen Rasterganglinien für alle 44 Modelle, die zusammen mit den Balkendiagrammen der jährlichen Netto-Grundwasserneubildung dargestellt sind (vgl. Teil 1, Abb. 5-1), befinden sich in Appendix F.

Da für die Netto-Grundwasserneubildung, die anhand jedes Klimamodells über den historischen Zeitraum berechnet wurde, ein (wenn auch geringer) Rest-Bias vorliegt, sollten die Schätzungen der Netto-Grundwasserneubildung unter dem Einfluss des Klimawandels bis zum Ende des Jahrhunderts für jedes Klimamodell nicht direkt aus diesen in Appendix E und F dargestellten Ergebnissen übernommen werden. Stattdessen wurden für jedes Klimamodell (s. Tabelle 3-1) die Veränderungen der modellierten Netto-Grundwasserneubildung über die drei Auswertungszeiträume (2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100) gegenüber der modellierten Netto-Grundwasserneubildung für den historischen Teil (1971-2000; s. Tabelle 3-2) des entsprechenden Klimamodells als maßgeblich angesehen. Um dann Schätzungen der Grundwasserneubildungshöhen unter dem Einfluss des Klimawandels zu gewinnen, können diese modellierten Veränderungen zu dem Referenzwert der Netto-Grundwasserneubildung addiert bzw. subtrahiert werden, der für den Zeitraum 1971-2000 anhand der beobachteten klimatischen Inputs berechnet wurde (vgl. Abb. 4-1). Die Verwendung von 1971-2000 als Referenzzeitraum ist dadurch begründet, dass die RCP-Antriebe im Jahr 2006 beginnen (s. Kap. 3.1).

Die Abb. 4-6 bis Abb. 4-8 stellen die mittleren jährlichen Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung über die drei ausgewerteten 30-Jahres-Zeiträume für alle Klimamodelle im Vergleich zu den jeweiligen historischen Zeiträumen dar. Wie in Tabelle 3-1 beruhen die Farben für jedes RCP auf den Empfehlungen von Linke et al. (2024).

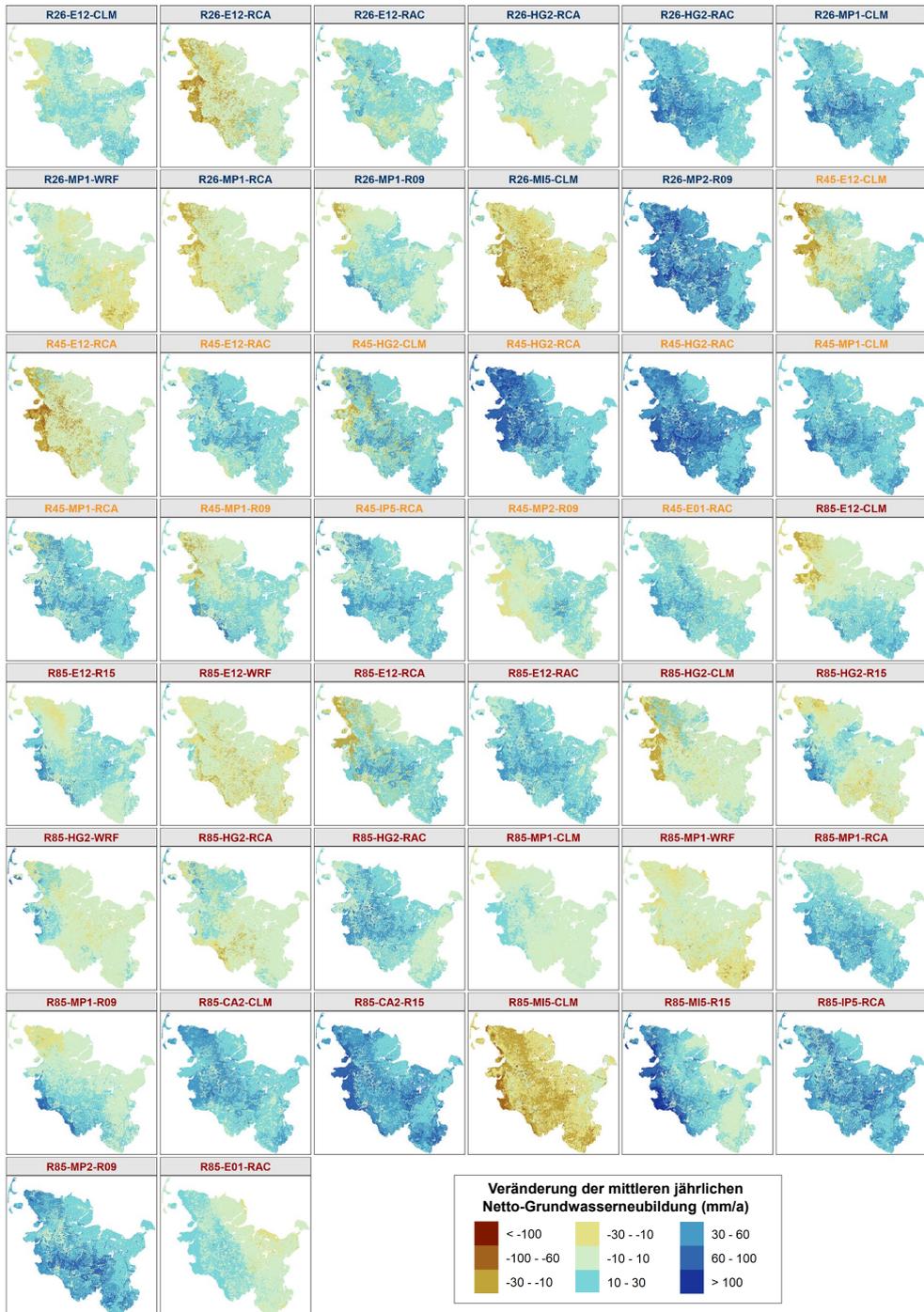


Abbildung 4-6: Mittlere jährliche Veränderung der Netto-Grundwasserneubildung für alle 44 Mitglieder des Ensembles für den Zeitraum 2011-2040 gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000.

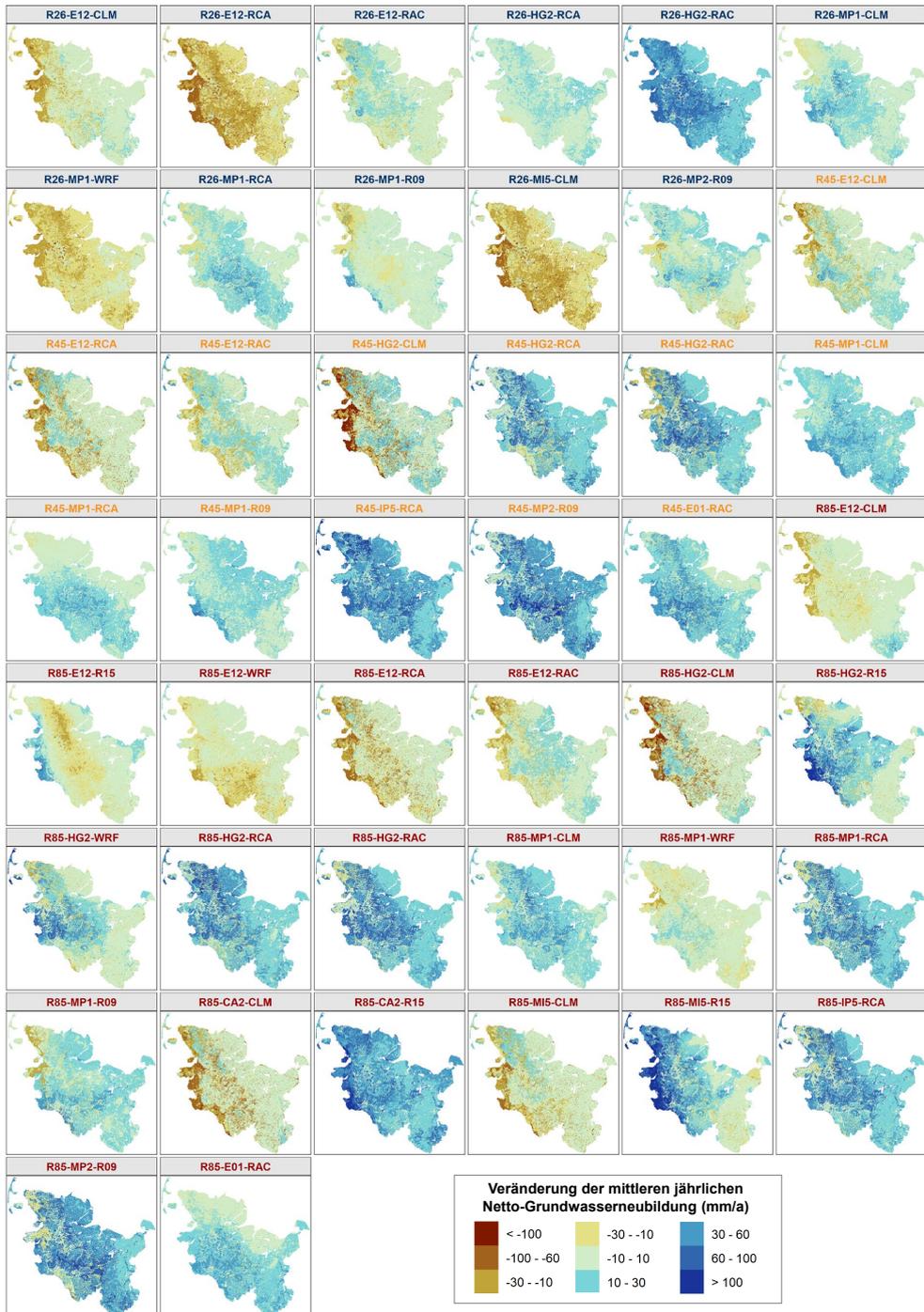


Abbildung 4-7: Mittlere jährliche Veränderung der Netto-Grundwasserneubildung für alle 44 Mitglieder des Ensembles für den Zeitraum 2041-2070 gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000.

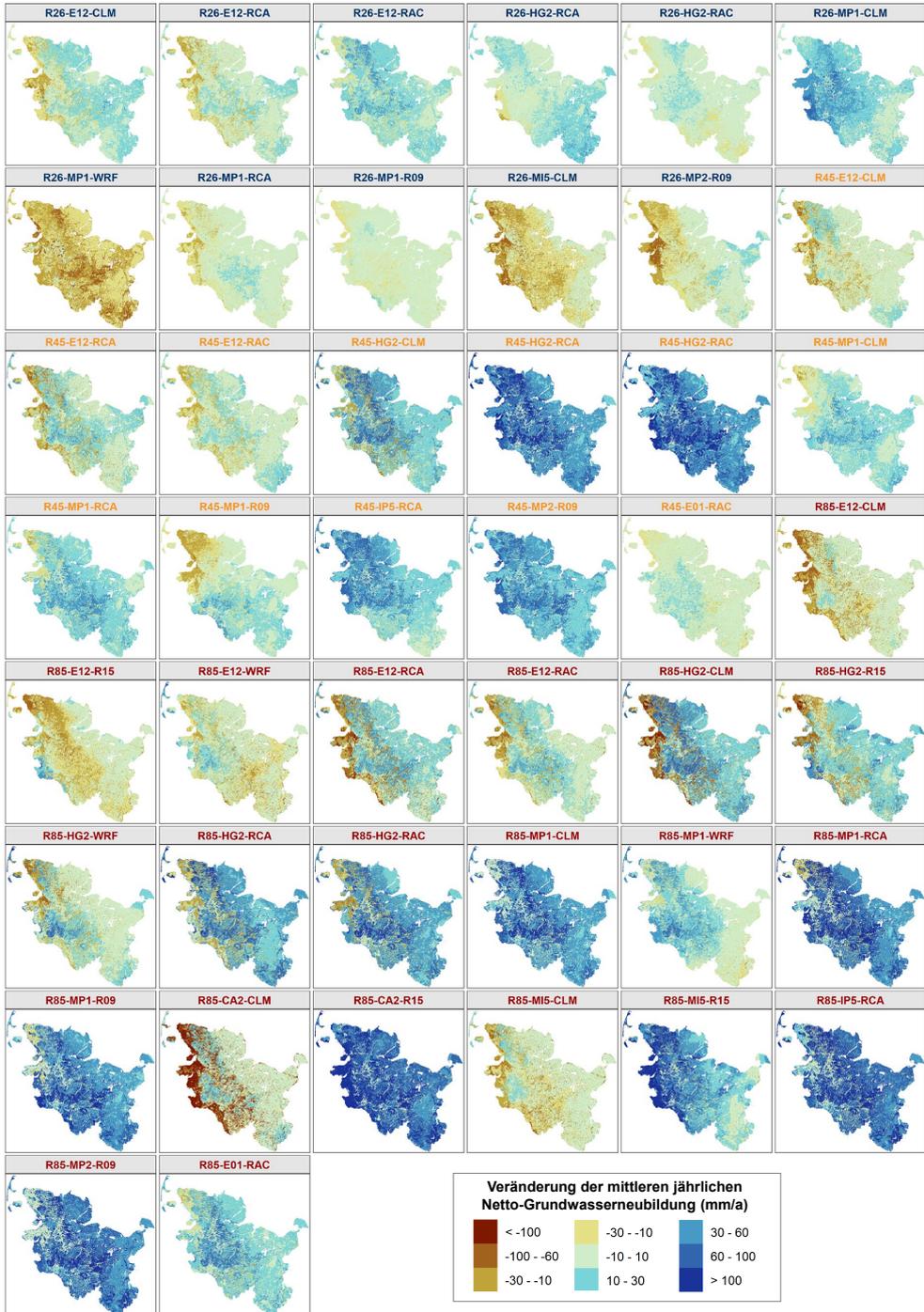


Abbildung 4-8: Mittlere jährliche Veränderung der Netto-Grundwasserneubildung für alle 44 Mitglieder des Ensembles für den Zeitraum 2071-2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000.

Die Veränderungen der räumlichen Mittelwerte gegenüber der mittleren jährlichen Netto-Grundwasserneubildung von 1971-2000 für die entsprechenden historischen Teile der Klimamodelle wurden ermittelt und sind in Tabelle 4-1 aufgeführt. Die mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung, die auf der Grundlage der beobachteten klimatischen Eingaben simuliert wurde, beträgt 150 mm/a für den Zeitraum 1971-2000 (s. Teil 1, Abb. 5-1).

*Tabelle 4-1: Langjährige Veränderungen der mittleren jährlichen Netto-Grundwasserneubildung für die 44 Ensemblemitglieder.*

RCP	Abkürzung	Mittlere jährliche Veränderung gegenüber 1971-2000 [mm/a]		
		2011-2040	2041-2070	2071-2100 <sup>a</sup>
2.6	R26-E12-CLM	9	-8	2
	R26-E12-RCA	-10	-33	-2
	R26-E12-RAC	10	1	11
	R26-HG2-RCA	4	7	8
	R26-HG2-RAC	27	39	1
	R26-MP1-CLM	26	10	22
	R26-MP1-WRF	-6	-23	-36
	R26-MP1-RCA	-6	10	-4
	R26-MP1-R09	7	-1	-3
	R26-MI5-CLM	-22	-31	-24
	R26-MP2-R09	44	4	-10
	4.5	R45-E12-CLM	1	-2
R45-E12-RCA		-9	-10	-2
R45-E12-RAC		16	0	-2
R45-HG2-CLM		13	-14	18
R45-HG2-RCA		42	25	60
R45-HG2-RAC		48	25	66
R45-MP1-CLM		26	18	11
R45-MP1-RCA		20	11	17
R45-MP1-R09		8	12	0
R45-IP5-RCA		20	41	29
R45-MP2-R09		5	41	37
R45-E01-RAC		13	21	-1
8.5	R85-E12-CLM	4	-7	-17
	R85-E12-R15	9	-5	-17
	R85-E12-WRF	-9	-12	-10
	R85-E12-RCA	7	-17	-5
	R85-E12-RAC	20	-2	-2
	R85-HG2-CLM	-3	-15	5
	R85-HG2-R15	1	17	3
	R85-HG2-WRF	1	10	-1
	R85-HG2-RCA	1	29	28
	R85-HG2-RAC	17	31	34
	R85-MP1-CLM	2	17	51
	R85-MP1-WRF	-9	-4	11

RCP	Abkürzung	Mittlere jährliche Veränderung gegenüber 1971-2000 [mm/a]		
		2011-2040	2041-2070	2071-2100 <sup>a</sup>
8.5	R85-MP1-RCA	20	29	65
	R85-MP1-R09	9	10	53
	R85-CA2-CLM	25	-16	-41
	R85-CA2-R15	41	39	93
	R85-MI5-CLM	-28	-11	-14
	R85-MI5-R15	26	30	50
	R85-IP5-RCA	34	29	79
	R85-MP2-R09	31	35	64
	R85-E01-RAC	5	16	19

a: Wenn eine Projektion nicht bis zum Jahre 2100 verläuft (vgl. Tabelle 3-1), wird der Mittelwert von 2071 bis zum letzten Jahr, für das Daten vorliegen, berechnet.

Die Abb. 4-9 fasst die Ergebnisse aus Tabelle 4-1 in Form von Boxplots zusammen. Die Ergebnisse sind wie folgt:

- RCP2.6:** Bei den 11 RCP2.6-Klimamodellen zeigen die meisten Klimamodelle verhältnismäßig geringe Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung, wobei das erste (Q1) und dritte Quartil (Q3) in allen drei Zeiträumen zwischen -20 mm/a und 20 mm/a liegt. Der Median aller Modelle beträgt 7 mm/a für 2011-2040, 1 mm/a für 2041-2070 bzw. -2 mm/a für 2071-2100. Die maximale Änderung eines Modells im gesamten Zeitraum der drei betrachteten Perioden tritt mit +44 mm/a bei Modell R26-MP2-R09 im Zeitraum 2011-2040 auf, während das Minimum mit -36 mm/a beim Modell R26-MP1-WRF im Zeitraum 2071-2100 festgestellt wurde.
- RCP4.5:** Bei den 12 RCP4.5-Klimamodellen ist eine hohe Konsistenz der Ergebnisse festzustellen, wobei die Mehrheit der Modelle eine Zunahme der Grundwasserneubildung angibt. Nur eines der Modelle (R45-E12-RCA) zeigt eine negative Veränderung im Zeitraum 2011-2040, drei Modelle ergeben im Zeitraum 2041-2070 und vier Modelle für 2071-2100 negative Änderungen (Tabelle 4-1). Die medianen Veränderungen für alle Modelle betragen 14,5 mm/a (2011-2040), 16,5 mm/a (2041-2070) bzw. 14 mm/a (2071-2100). Die maximale Änderung eines Modells im gesamten Zeitraum der betrachteten drei Perioden beträgt +66 mm/a beim Modell R45-HG2-RAC im Zeitraum 2071-2100, während das Minimum mit -14 mm/a beim Modell R45-HG2-CLM im Zeitraum 2041-2070 auftritt.
- RCP8.5:** Bei den 21 RCP8.5-Klimamodellen betragen die medianen Veränderungen für alle Modelle 7 mm/a (2011-2040), 10 mm/a (2041-2070) bzw. 11 mm/a (2071-2100). Sowohl die Interquartils- als auch die gesamte Bandbreite der Ergebnisse ist für den Zeitraum 2071-2100 wesentlich höher als in den beiden anderen Zeiträumen. Im Zeitraum 2071-2100 liegt das Minimum bei -41 mm/a (Modell 85-CA2-CLM), Q1 bei 5 mm/a, Q3 bei 51 mm/a und der Höchstwert bei 93 mm/a (Modell R85-CA2-R15). Diese hohe Streuung wird durch die hohe Streuung in den klimatischen Eingaben für den Zeitraum 2071-2100 verursacht (vgl. Abb. 3-4).

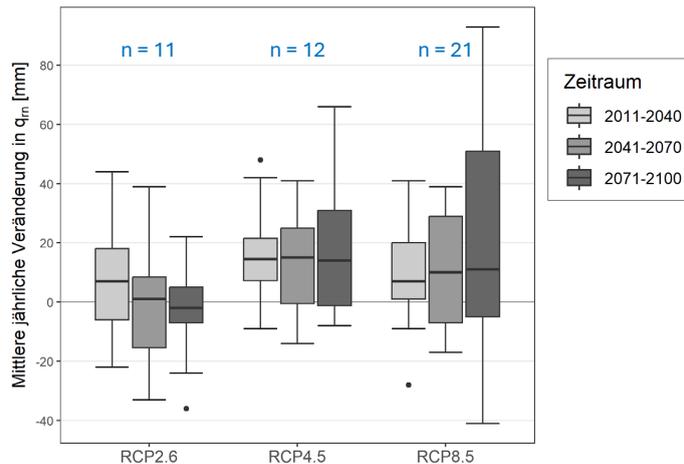


Abbildung 4-9: Boxplots der mittleren jährlichen Änderungen der Netto-Grundwasserneubildung für alle 44 Klimamodelle für die 30-Jahres-Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971-2000. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar.

In ähnlicher Weise zeigt Abb. 4-10 Boxplots für die Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung für alle 44 Ensemblemitglieder, diesmal für die Veränderungen über das Winterhalbjahr (November bis April) und das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober). Im Winterhalbjahr sind die Mediane aller Modelle bei allen RCP und in allen drei ausgewerteten Zeiträumen positiv. Beim RCP8.5-Szenario steigen die Mediane über die drei ausgewerteten Zeiträume deutlich an, mit Werten von 4 mm/a (2011-2040), 14 mm/a (2041-2070) und 23 mm/a (2071-2100). Für die Sommermonate liegen die Veränderungen in der Regel nahe bei Null, mit Ausnahme des Zeitraums 2071-2100 beim RCP8.5-Szenario. Hier zeigt der Median der Modelle einen Rückgang von 12 mm. Aus diesen Ergebnissen ist zu erkennen, dass der allgemeine Anstieg der jährlichen Netto-Grundwasserneubildung auf eine Zunahme in den Wintermonaten zurückzuführen ist. Es ist jedoch wichtig zu bemerken, dass die mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr im Referenzzeitraum viel höher ist als die im Sommerhalbjahr (132 mm vs. 17 mm; vgl. Teil 1, Abb. 5-2 und Abb. 5-3).

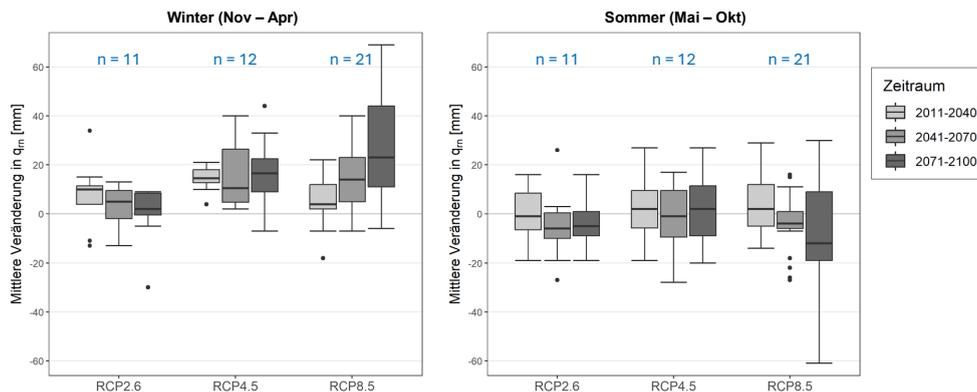


Abbildung 4-10: Boxplots der mittleren halbjährlichen Änderungen der Netto-Grundwasserneubildung für alle 44 Klimamodelle für die 30-Jahres-Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971-2000. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar.

#### 4.4 Bewertung der Robustheit der Änderungssignale

Robustheitstests bewerten die Belastbarkeit von Ensembleprojektionen und bilden damit eine aufschlussreiche Ergänzung zur Betrachtung einfacher statistischer Größen. Es gibt jedoch keine einheitliche Definition dafür, was Robustheit im Hinblick auf die Bewertung von Klima-Ensembles bedeutet. In Anlehnung an Pfeifer et al. (2015) und Herrmann et al. (2021) wurden für diese Studie zwei Kriterien verwendet, um die Robustheit der mit mGROWA modellierten Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung für das DWD-Referenz-Ensembles zu ermitteln:

1. Mindestens 66 % der Modelle müssen in der Richtung der Veränderung (Zu- oder Abnahme) übereinstimmen; und
2. mindestens 66 % der Ensemblemitglieder müssen eine signifikante Änderung in der Verteilung der Jahreswerte aufweisen.

Hierfür wird ein zweiseitiger (engl. *two-tailed*) verteilungsfreier U-Test verwendet (Mann-Whitney-Wilcoxon-Test, Mann et al., 1947; Wilcoxon, 1945). Zur Durchführung des U-Tests wurden die Jahreswerte (räumliche Mittelwerte) der Netto-Grundwasserneubildung für zwei 30-jährige Zeiträume extrahiert: den ausgewählten künftigen Zeitraum<sup>8</sup> und den Referenzzeitraum (1971-2000) des entsprechenden Klimamodells. Es wird folgende Nullhypothese getestet:

- **Nullhypothese  $H_0$ :** Die Verteilung der zukünftigen jährlichen Grundwasserneubildungshöhen (2011 – 2040, 2041 – 2070 oder 2071 – 2100) unterscheidet sich nicht signifikant von der Verteilung der jährlichen Grundwasserneubildungshöhen der Referenzperiode (1971 – 2000).

Entsprechend ist die Alternativhypothese  $H_1$  folgendermaßen zu formulieren:

<sup>8</sup> Um sicherzustellen, dass beide Zeitreihen 30 Jahre umfassen, wurden für Klimamodelle, die nicht bis zum Jahr 2100 vorliegen, für den Zeitraum 2071-2100 die letzten 30 Jahre mit Daten verwendet.

- **Alternativhypothese H1:** Die Verteilung der zukünftigen jährlichen Grundwasserneubildungshöhen (2011 – 2040, 2041 – 2070 oder 2071 – 2100) unterscheidet sich signifikant von der Verteilung der jährlichen Grundwasserneubildungshöhen der Referenzperiode (1971 – 2000).

Wenn die ausgegebene Überschreitungswahrscheinlichkeit (häufig als „p-Wert“ bezeichnet) des U-Tests gering genug ist, kann die Nullhypothese zurückgewiesen werden und die Alternativhypothese wird als erfüllt angesehen. Dies würde bedeuten, dass die Veränderung im Grundwasserneubildungsregime als signifikant betrachtet werden kann. Die Wahrscheinlichkeit, die Nullhypothese H0 (keine signifikante Änderung) fälschlicherweise zurückzuweisen, wird auf 15 % festgelegt, d. h., das Signifikanzniveau beträgt 0,15 (Pfeifer et al., 2015; Herrmann et al., 2021).

Die geordneten Änderungssignale für ganz Schleswig-Holstein sowie die Indikationen des U-Tests sind in Abb. 4-11 (RCP2.6), Abb. 4-12 (RCP4.5) und Abb. 4-13 (RCP8.5) dargestellt. Signifikante Abnahmen der Netto-Grundwasserneubildung erscheinen darin rot, signifikante Zunahmen blau und nicht signifikante Veränderungen grau. Da die Ergebnisse von der größten Abnahme bis zur größten Zunahme geordnet sind, ändert sich die Reihenfolge, in der die Klimamodelle aufgeführt sind, von Diagramm zu Diagramm.

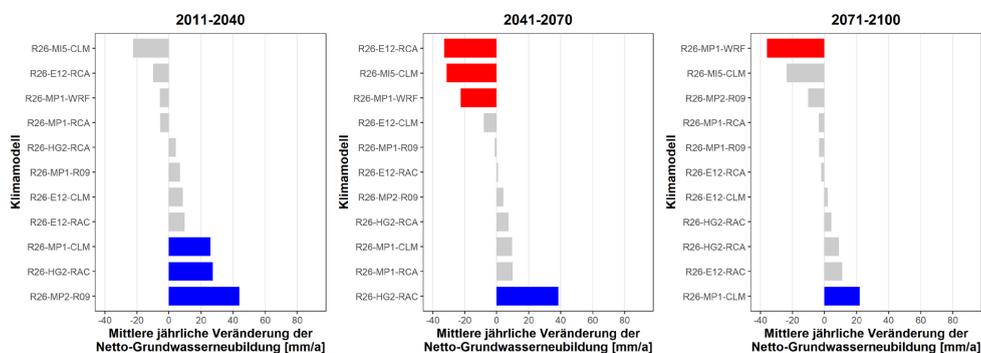


Abbildung 4-11: Geordnete Änderungssignale der Netto-Grundwasserneubildung in ganz Schleswig-Holstein für die 11 RCP2.6-Klimamodelle mit Indikationen des U-Tests.

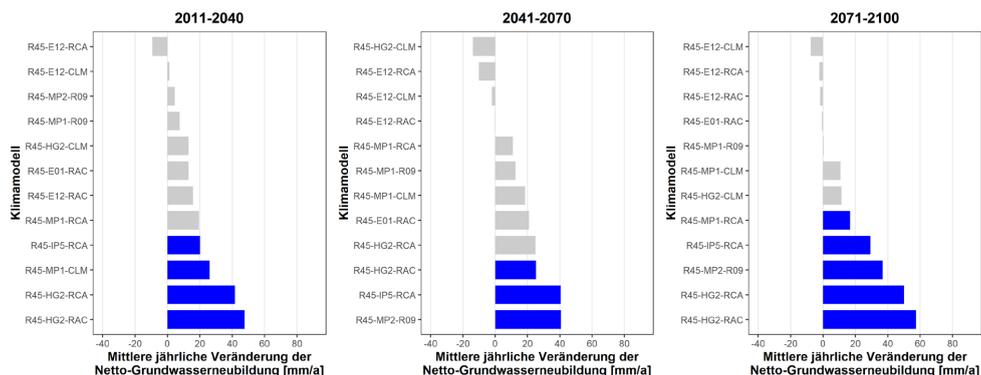


Abbildung 4-12: Geordnete Änderungssignale der Netto-Grundwasserneubildung in ganz Schleswig-Holstein für die 12 RCP4.5-Klimamodelle mit Indikationen des U-Tests.

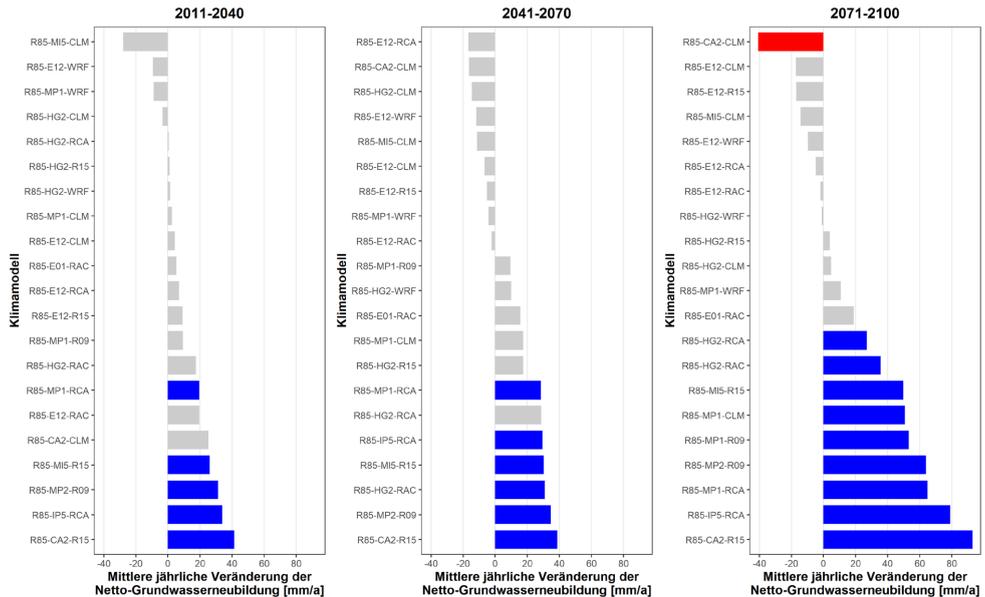


Abbildung 4-13: Geordnete Änderungssignale der Netto-Grundwasserneubildung in ganz Schleswig-Holstein für die 21 RCP8.5-Klimamodelle mit Indikationen des U-Tests.

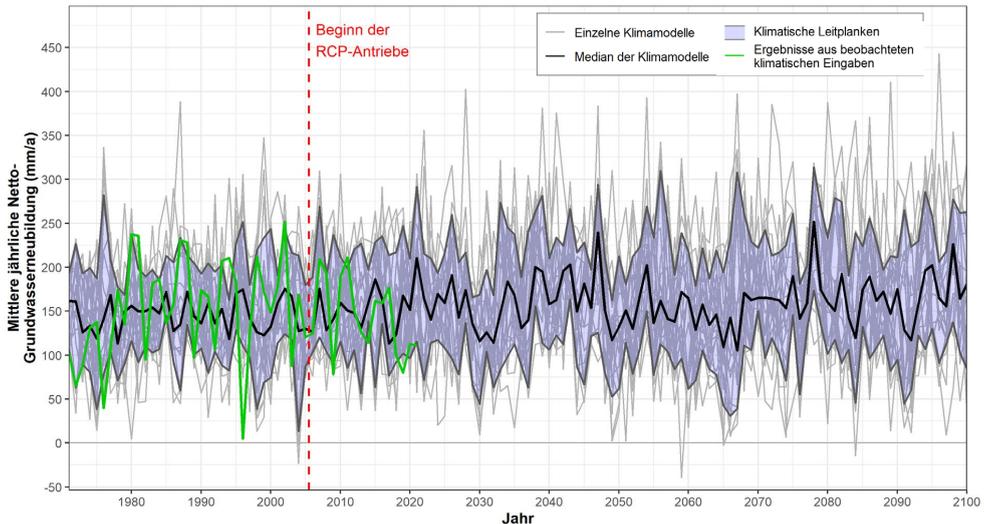
Für das RCP2.6-Szenario (Abb. 4-11) ist die Anzahl der Modelle, die signifikante Veränderungen im Grundwasserneubildungsregime zeigen, im Zeitraum 2041-2070 am höchsten (vier von 11 Modellen). Für die Szenarien RCP4.5 (Abb. 4-12) und RCP8.5 (Abb. 4-13) ist dies im Zeitraum 2071-2100 zu verzeichnen (fünf von 12 Modellen für RCP4.5 bzw. 10 von 21 Modellen für RCP8.5). Es gibt wesentlich mehr Klimamodelle, die eine signifikante Zunahme der Grundwasserneubildung zeigen als eine signifikante Abnahme. Das erste der Kriterien (mindestens 66 % der Modelle müssen in der Richtung der Veränderung (Zu- oder Abnahme) übereinstimmen) ist in einigen Fällen erfüllt (RCP4.5: 2011-2040, 2041-2070; RCP8.5: 2011-2040); das zweite Kriterium (mindestens 66 % der Ensemblemitglieder müssen eine signifikante Änderung in der Verteilung der Jahreswerte aufweisen) ist jedoch in keinem der Fälle erfüllt. Deswegen können keine der betrachteten Änderungen der Netto-Grundwasserneubildung als robust betrachtet werden. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass für keines der RCP-Szenarien mit Sicherheit gesagt werden kann, dass die Grundwasserneubildung zunehmen oder abnehmen wird.

#### 4.5 Quantifizierung der wahrscheinlichen Veränderungen

Die Spanne vom 15. bis zum 85. Perzentil der Ergebnisse kann als sogenannte „klimatische Leitplanken“ betrachtet werden, die eine gewisse Bandbreite von Modellierungsergebnissen erlaubt und gleichzeitig Ausreißerwerte unberücksichtigt lässt (Linke et al., 2024). Diese Empfehlung des Bund-Länder-Fachgesprächs ähnelt derjenigen in den IPCC-Berichten, die die mittleren 66 % (17. bis 83. Perzentil) als „likely“-Folge des Klimawandels betrachten (Solomon et al., 2007).

Abb. 4-14 zeigt die mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung für jedes der 21 Mitglieder des RCP8.5-Szenarios (hellgrau) sowie den Median (dicke schwarze Linie) und den Bereich zwischen dem 15. und dem 85. Perzentil. Die aus allen Klimamodellen berechneten jährlichen

Veränderungen wurden zu der aus Beobachtungsdaten abgeleiteten simulierten mittleren jährlichen Netto-Grundwasserneubildung von 1971-2000 (150 mm) addiert bzw. subtrahiert. Zur Berechnung der Perzentile wurde der in Hyndman und Fan (1996) beschriebene  $\hat{Q}_5$ -Quantil-Algorithmus verwendet. Grün dargestellt ist die mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung, die anhand der beobachteten historischen Daten berechnet wurde (vgl. Teil 1, Kap. 4.8). Ebenfalls in der Abbildung dargestellt ist das Jahr 2006, in dem die RCP-Antriebe für die Klimamodelle der CMIP5-Phase beginnen. Die gleichen Abbildungen für die RCP2.6- und RCP4.5-Szenarien sind in Appendix G zu finden.



*Abbildung 4-14: Jährliche räumliche Mittelwerte der Netto-Grundwasserneubildung aller 21 RCP8.5-Mitglieder des DWD-Referenz-Ensembles (hellgrau), der Median der Ergebnisse für jedes Jahr (schwarz) und die „klimatischen Leitplanken“, die das 15. bis zum 85. Perzentil der Ergebnisse anzeigen (blau schattiert). Die simulierte Netto-Grundwasserneubildung auf der Grundlage der beobachteten historischen Klimaeingaben ist in hellgrün dargestellt.*

Bei der Betrachtung der Abbildung mit Jahreswerten sind Trends aufgrund der in jedem einzelnen Klimamodell enthaltenden zwischenjährlichen Variabilität schwer zu identifizieren. Daher wurden die Ergebnisse unter Verwendung von gleitenden 10- und 30-jährigen Mittelwerten neu konzeptualisiert. Diese sind in Abb. 4-15 (RCP2.6), Abb. 4-16 (RCP4.5) und Abb. 4-17 (RCP8.5) dargestellt, in der ein gleitender Mittelwert für die Berechnung der Netto-Grundwasserneubildung der Mitglieder des Klimamodell-Ensembles sowie der simulierten Netto-Grundwasserneubildung auf der Grundlage von beobachteten Klimadaten verwendet wurde. Der gleitende Mittelwert ist in der entsprechenden Mitte der jeweiligen Zeitspanne aufgetragen (z. B. wird der 30-jährige Mittelwert für 2046-2075 an der x-Koordinate von 2060,5 aufgetragen). Der Referenzwert der mittleren jährlichen Netto-Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1971-2000 (150 mm/a) ist ebenfalls als gestrichelte Linie dargestellt. Zu beachten ist, dass die y-Skalen in diesen drei Abbildungen identisch sind.

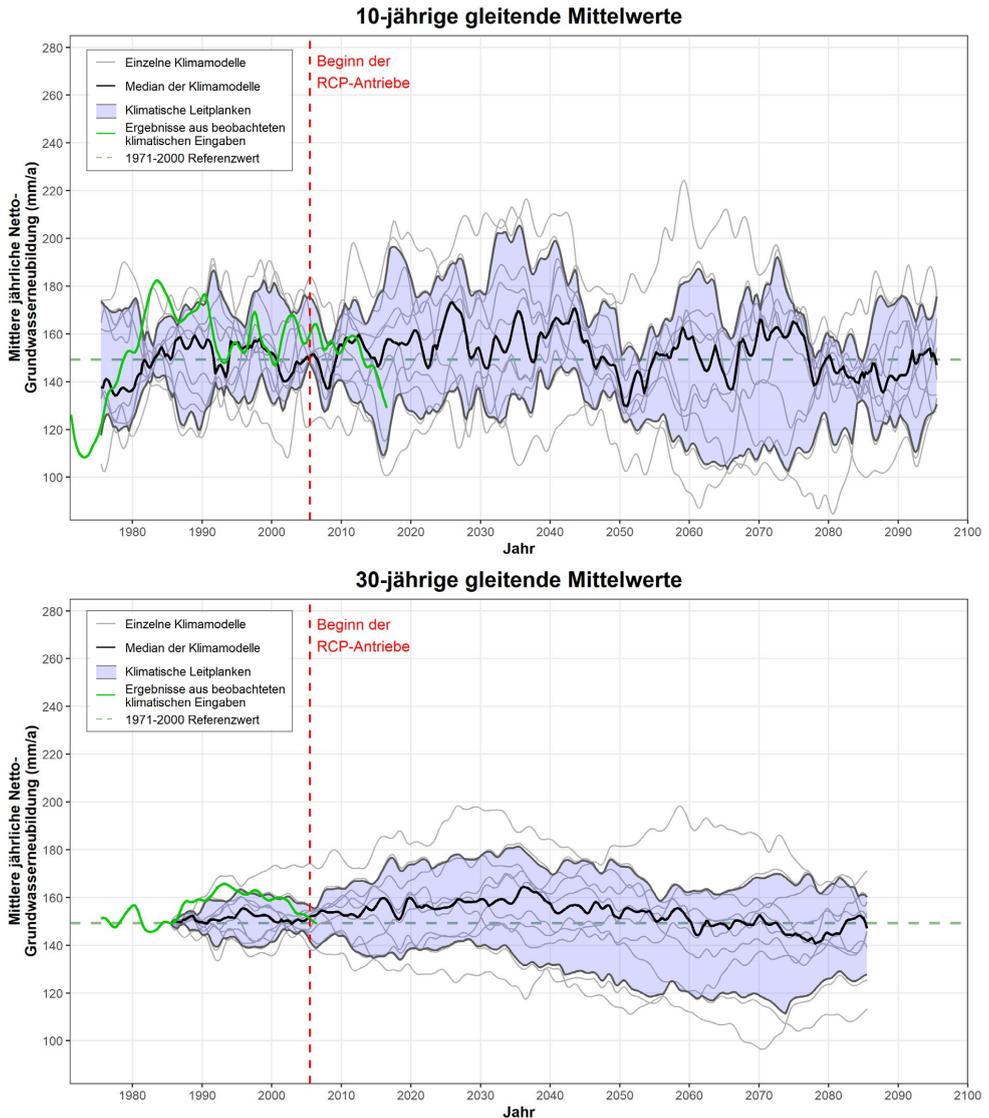


Abbildung 4-15: Langjährige gleitende Mittelwerte der Netto-Grundwasserneubildung aller 11 RCP2.6-Mitglieder des DWD-Referenz-Ensembles (hellgrau), der Median der Ergebnisse für jedes Jahr (schwarz) und die „klimatischen Leitplanken“, die das 15. bis zum 85. Perzentil der Ergebnisse anzeigen (blau schattiert). Die simulierte Netto-Grundwasserneubildung auf der Grundlage der beobachteten historischen Klimaeingaben ist in hellgrün und der beobachtete Mittelwert für 1971-2000 als gestrichelte grüne Linie dargestellt. Das obere Diagramm zeigt die gleitenden 10-Jahres-Mittelwerte und das untere Diagramm die gleitenden 30-Jahres-Mittelwerte.

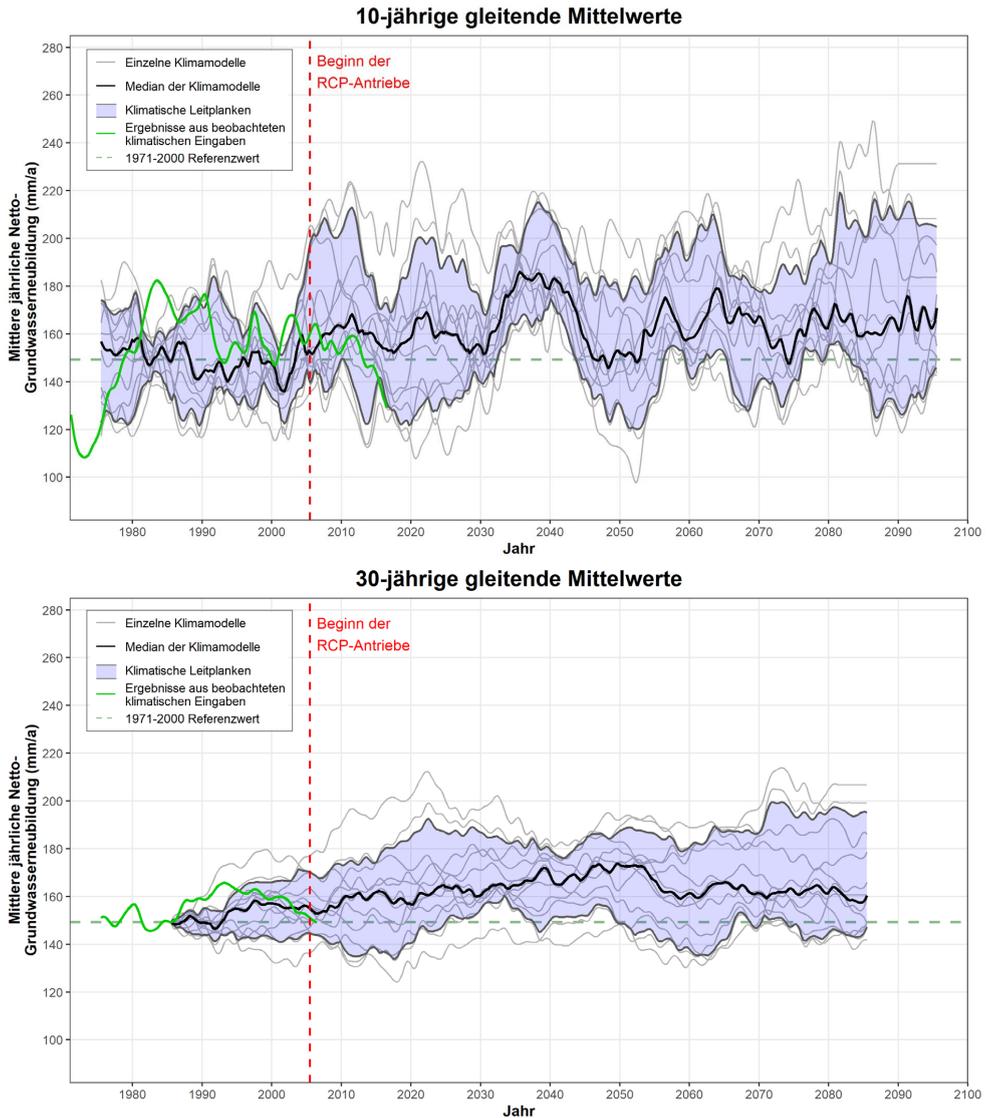


Abbildung 4-16: 30-jährige gleitende Mittelwerte der Netto-Grundwasserneubildung aller 12 RCP4.5-Mitglieder des DWD-Referenz-Ensembles (hellgrau), der Median der Ergebnisse für jedes Jahr (schwarz) und die „klimatischen Leitplanken“, die das 15. bis zum 85. Perzentil der Ergebnisse anzeigen (blau schattiert). Die simulierte Netto-Grundwasserneubildung auf der Grundlage der beobachteten historischen Klimaeingaben ist in hellgrün und der beobachtete Mittelwert für 1971-2000 als gestrichelte grüne Linie dargestellt.

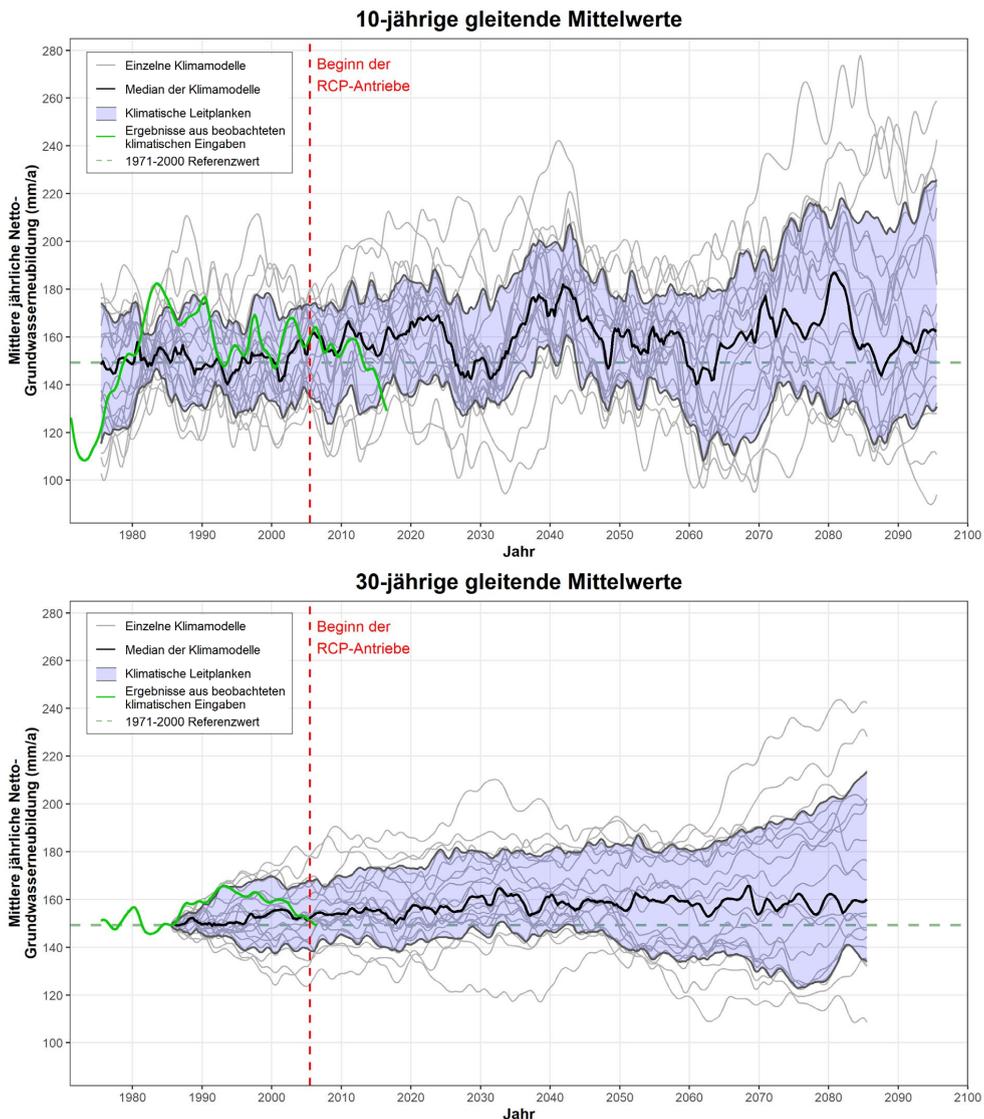


Abbildung 4-17: 30-jährige gleitende Mittelwerte der Netto-Grundwasserneubildung aller 21 RCP8.5-Mitglieder des DWD-Referenz-Ensembles (hellgrau), der Median der Ergebnisse für jedes Jahr (schwarz) und die „klimatischen Leitplanken“, die das 15. bis zum 85. Perzentil der Ergebnisse anzeigen (blau schattiert). Die simulierte Netto-Grundwasserneubildung auf der Grundlage der beobachteten historischen Klimaeingaben ist in hellgrün und der beobachtete Mittelwert für 1971-2000 als gestrichelte grüne Linie dargestellt.

Abb. 4-15 bis Abb. 4-17 zeigen, dass die Variationen der zwischenjährlichen Veränderungen innerhalb der einzelnen Klimamodelle bei Verwendung der gleitenden 30-Jahres-Mittelwerte praktisch herausgerechnet werden. Die langfristigen Trends der Grundwasserneubildung sind daher am besten bei Verwendung der gleitenden 30-Jahres-Mittelwerte zu erkennen.

Es ist zunächst wichtig, die Schwankungen im gleitenden 30-Jahres-Mittelwert der beobachteten Daten (146 mm/a bis 166 mm/a) zu berücksichtigen, die für insgesamt 32 30-Jahres-

Perioden aufgetragen sind, da das mGROWA-Modell für 61 Jahre beobachteter Klimadaten ausgeführt wurde (vgl. Teil 1, Kap. 3.2). Dies liefert einen gewissen Beurteilungsrahmen zum Verständnis der ungefähren Bandbreite der natürlichen Variabilität, die von den einzelnen Klimamodellen erwartet würde, wenn die klimatischen Antriebe die Niederschlags- und potenziellen Evapotranspirationen durch den Klimawandel nicht verändern würden. Es gibt jedoch mehrere Klimamodelle, die bei der Ausführung des mGROWA-Modells zu langfristigen mittleren Grundwasserneubildungsraten führen, die weit von diesem Bereich abweichen, was die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildungsregime in Schleswig-Holstein verdeutlicht.

Abb. 4-18 fasst die Ergebnisse aller drei RCP-Szenarien für den gleitenden 30-Jahres-Mittelwert (Abb. 4-15 bis Abb. 4-17) zusammen und zeigt die jeweiligen Mediane (durchgehende Linien) sowie die Unter- und Obergrenzen der „klimatischen Leitplanken“, d. h. die 15. und 85. Perzentile (gestrichelte Linien). Alle drei durchgezogenen Linien für die Mediane bleiben über dem Referenzwert von 150 mm/a, mit Ausnahme beim RCP2.6-Szenario für einige Jahre gegen Ende des Jahrhunderts. Dies deutet darauf hin, dass die meisten Klimamodelle eine Zunahme der Netto-Grundwasserneubildung in Schleswig-Holstein prognostizieren. Die Spannbreiten der „klimatischen Leitplanken“ erstrecken sich in den meisten Jahren sowohl in den positiven als auch in den negativen Bereich. Je höher das Emissionsszenario ist, desto stärker weichen die Unter- und Obergrenzen der „klimatischen Leitplanken“ im Laufe des Jahrhunderts voneinander ab. Die für die RCP-Pfade verwendeten Farben folgen den Empfehlungen von Linke et al. (2024).

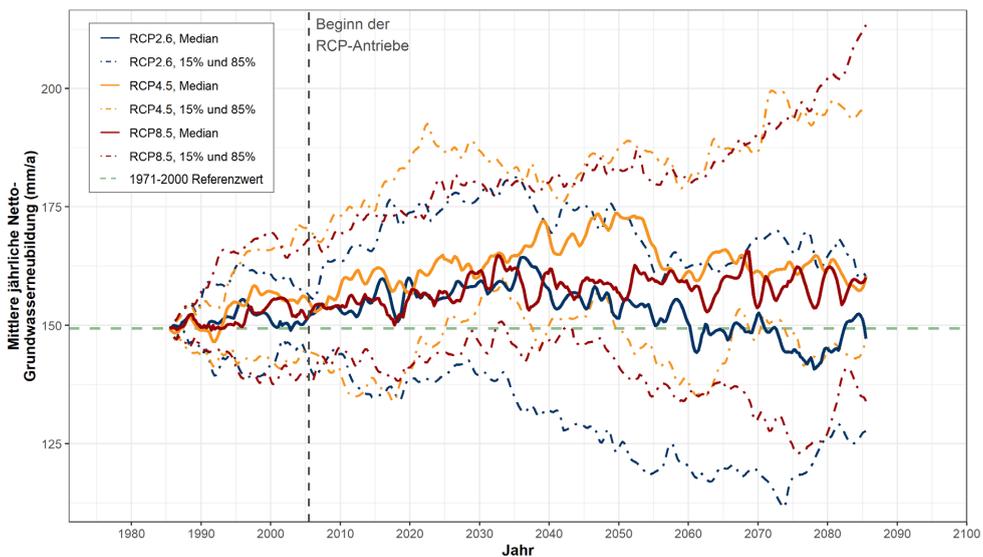


Abbildung 4-18: Mediane und Spannbreiten der „klimatischen Leitplanken“ für alle drei RCP-Szenarien. Der Referenzwert für 1971-2000 wird durch die gestrichelte grüne Linie dargestellt. Die Ergebnisse wurden unter Verwendung der gleitenden 30-Jahres-Mittelwerte berechnet.

Die Ergebnisse der in dieser Studie ausgewählten 30-jährigen Auswertungszeiträume aus Abb. 4-18 sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Die Werte in der Tabelle entsprechen also den Ergebnissen, die an den x-Achsen-Positionen 2025,5 (Mittelwert von 2011-2040), 2055,5 (2041-2070) und 2085,5 (2071-2100) angezeigt werden.

*Tabelle 4-2: Zusammenfassung der Mediane (50 %) und der klimatischen Leitplanken (15 % und 85 %) für die mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung in Schleswig-Holstein für jedes RCP-Szenario. Alle Werte sind in mm/a angegeben. Der erste Wert in jeder Zelle ist die absolute Netto-Grundwasserneubildung, während der Wert in Klammern die Veränderung gegenüber dem Referenzzeitraum angibt.*

Zeitraum	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	15 %	50 %	85 %	15 %	50 %	85 %	15 %	50 %	85 %
2011-2040	140 (-10)	156 (+6)	176 (+26)	152 (+2)	164 (+14)	186 (+36)	144 (-6)	156 (+6)	177 (+27)
2041-2070	119 (-31)	150 (0)	159 (+9)	142 (-8)	165 (+15)	185 (+35)	136 (-14)	159 (+9)	180 (+30)
2071-2100	128 (-22)	147 (-3)	160 (+10)	147 (-3)	160 (+10)	195 (+45)	134 (-16)	160 (+10)	213 (+63)

## 4.6 Auswertungen für verschiedene Gebietskulissen

Die Klimaensemble-Ergebnisse wurden auch auf der Ebene verschiedener Gebietskulissen analysiert, um die Ergebnisse zu disaggregieren, regionale Trends zu erkennen und Anhaltspunkte für die Wasserbewirtschaftungsplanung zu gewinnen. In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse für die 11 RCP2.6-Ensemblemitglieder, die 12 RCP4.5-Ensemblemitglieder und die 21 RCP8.5-Ensemblemitglieder räumlich auf Ebene der Planungseinheiten (Kap. 4.6.1), der Kreise und kreisfreien Städte (Kap. 4.6.2) sowie der hydrogeologischen Teilräume (Kap. 4.6.3) ausgewertet<sup>9</sup>.

### 4.6.1 Auswertungen auf Ebene der Planungseinheiten nach EU-WRRL

Die Abb. 4-19 bis Abb. 4-21 zeigen die Ergebnisse für alle drei RCP-Szenarien auf der Ebene der 13 Planungseinheiten nach EU-WRRL. Für jede Abbildung zeigt das obere linke Diagramm das Referenzniveau der Netto-Grundwasserneubildung für 1971-2000, das anhand historischer Klimabeobachtungen simuliert wurde (vgl. Abb. 4-1). Für jede Planungseinheit zeigt die Flächenfarbe den Mittelwert über die jeweilige Landfläche. Die Zahlen 1-13 kennzeichnen die ID der Planungseinheiten. Die neun Diagramme oben rechts zeigen die mittleren langjährigen Veränderungen pro Planungseinheit für die drei Auswertungszeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100, wobei der Median der Ensemblemitglieder sowie das 15. und 85. Perzentil dargestellt sind („klimatische Leitplanken“). Es ist zu beachten, dass die neun Abbildungen im Teil b) die absoluten Veränderungen zeigen. Daher ist erwartungsgemäß festzustellen, dass im Allgemeinen die Gebiete mit einem hohen Mittelwert während des Referenzzeitraums größere Gesamtveränderungen aufweisen. Unten sind die Ergebnisse der Ensemblemitglieder zudem als Boxplots für die einzelnen Planungseinheiten zusammengefasst.

Auf der räumlichen Ebene der Planungseinheiten zeigen die RCP2.6-Szenarien für den Median (50 %) minimale Veränderungen für alle Zeiträume. Für das 15. Perzentil ist die Verringerung der Grundwasserneubildung im Nordwesten am stärksten, während für das 85. Perzentil die Zunahme im Zeitraum 2011-2040 nur im Westen erheblich ist (Abb. 4-19). Für die RCP4.5-Szenarien deutet der Median auf einen Anstieg der Grundwasserneubildung hin, der im Wesentlichen proportional zu den im Abbildungsteil a) dargestellten Referenzwerten ist (Abb. 4-20). Für das 15. Perzentil ist eine Verringerung der Grundwasserneubildung nur im Nordwesten festzustellen, während für das 85. Perzentil die Zunahmen überall relativ einheitlich sind. Im Östlichen Hügelland sind die Zunahmen im Vergleich jedoch etwas geringer. Bei den RCP8.5-Szenarien werden die räumlichen Unterschiede zwischen den Planungseinheiten deutlicher, insbesondere beim Median und beim 15. Perzentil (Abb. 4-21).

<sup>9</sup> Helgoland wurde bei den Ermittlungen der räumlichen Mittelwerte nicht berücksichtigt. Helgoland gehört zur Planungseinheit Tideelbestrom (ID 12), Kreis Pinneberg (ID 1056), und ist in den vom LfU definierten hydrogeologischen Teilräumen nicht berücksichtigt.

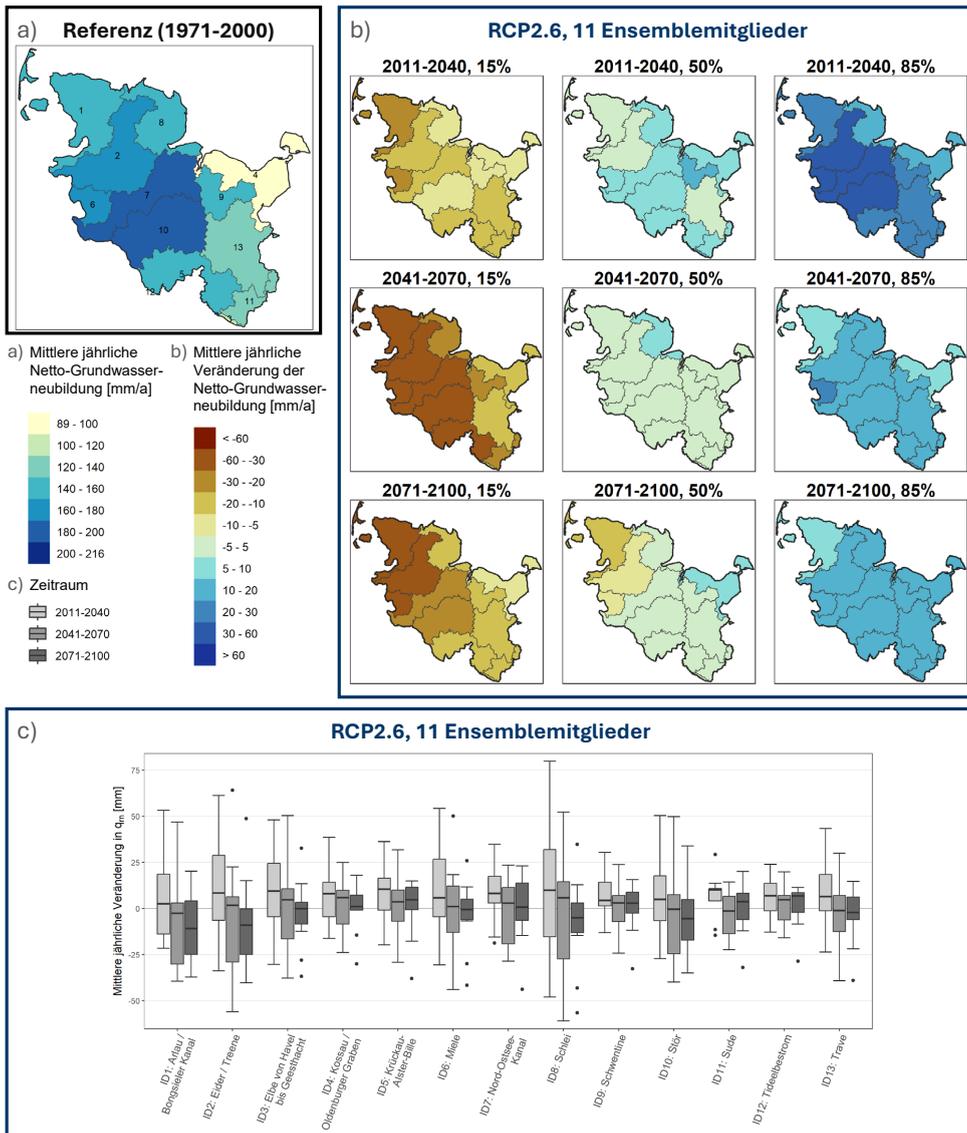


Abbildung 4-19: a) Referenzwerte der räumlichen Mittelwerte der simulierten Netto-Grundwasserneubildung anhand beobachteter klimatischer Inputs für 1971-2000; b) räumliche Mittelwerte der Veränderung der Netto-Grundwasserneubildung für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2071 und 2071-2100, berechnet für das 15., 50. und 85. Perzentil der 11 RCP2.6-Ensemblemitglieder; und c) Boxplots, die die räumlichen Mittelwerte der Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung für jedes der 11 RCP2.6-Ensemblemitglieder zeigen. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar. Die räumlichen Mittelwerte werden für die 13 Planungseinheiten in Schleswig-Holstein nur über die Landflächen berechnet.

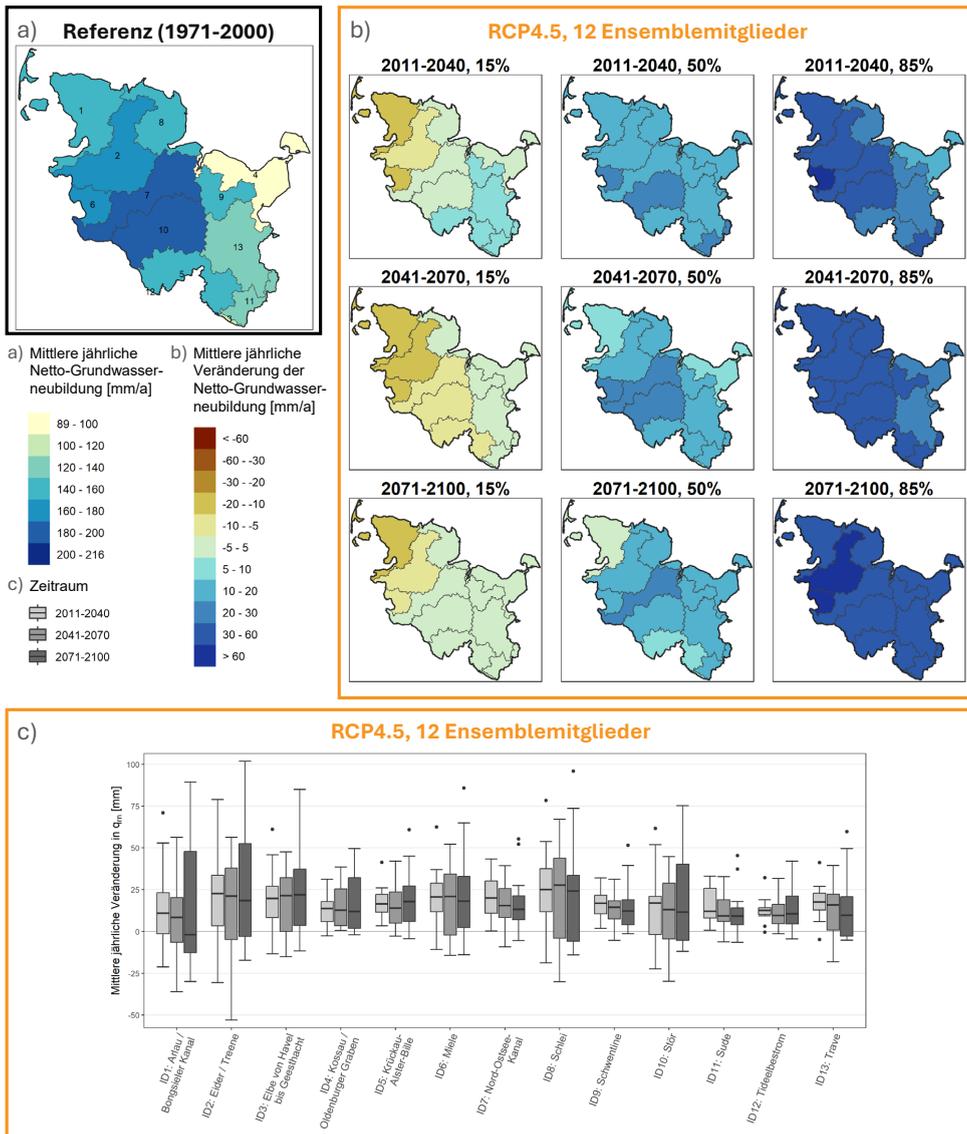


Abbildung 4-20: a) Referenzwerte der räumlichen Mittelwerte der simulierten Netto-Grundwasserneubildung anhand beobachteter klimatischer Inputs für 1971-2000; b) räumliche Mittelwerte der Veränderung der Netto-Grundwasserneubildung für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2071 und 2071-2100, berechnet für das 15., 50. und 85. Perzentil der 12 RCP4.5-Ensemblemitglieder; und c) Boxplots, die die räumlichen Mittelwerte der Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung für jedes der 12 RCP4.5-Ensemblemitglieder zeigen. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar. Die räumlichen Mittelwerte werden für die 13 Planungseinheiten in Schleswig-Holstein nur über die Landflächen berechnet.

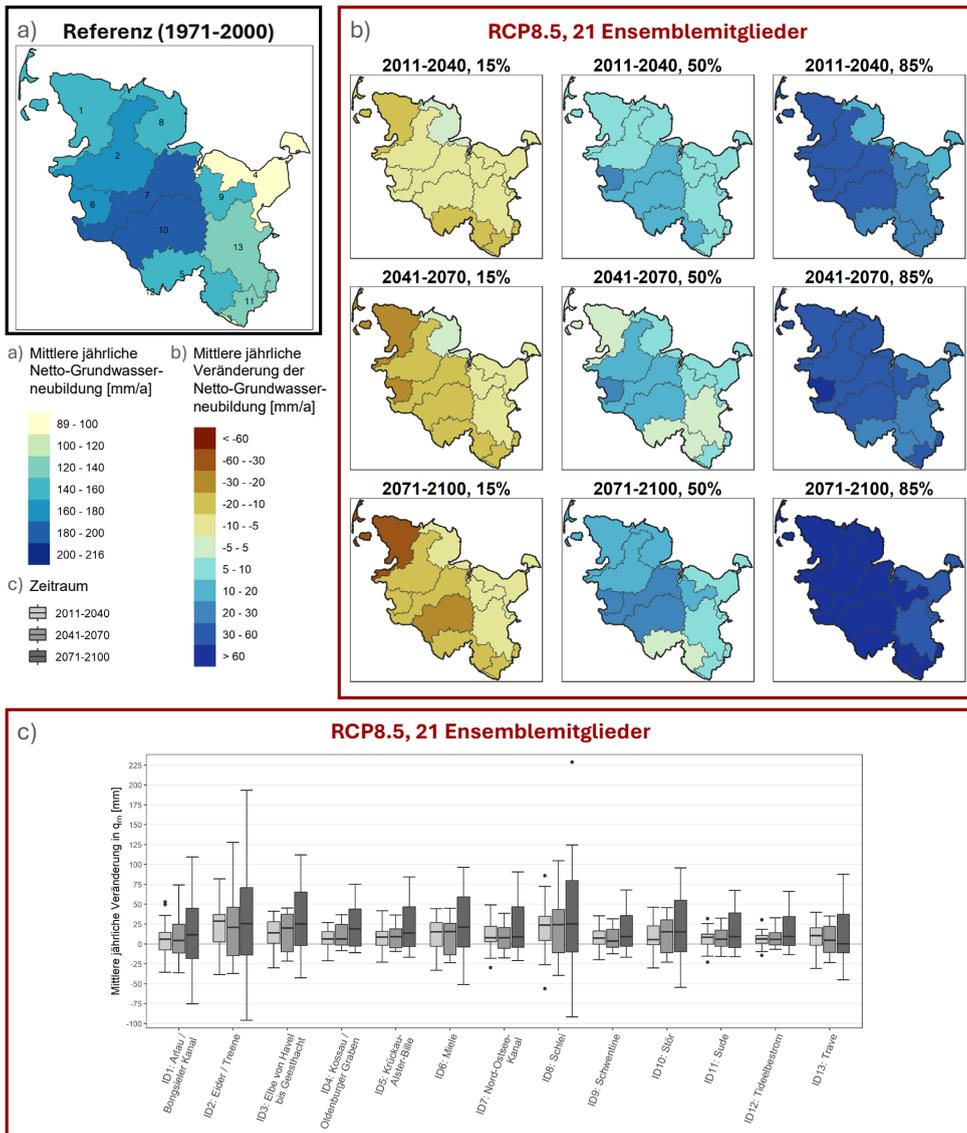


Abbildung 4-21: a) Referenzwerte der räumlichen Mittelwerte der simulierten Netto-Grundwasserneubildung anhand beobachteter klimatischer Inputs für 1971-2000; b) räumliche Mittelwerte der Veränderung der Netto-Grundwasserneubildung für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2071 und 2071-2100, berechnet für das 15., 50. und 85. Perzentil der 21 RCP8.5-Ensemblemitglieder; und c) Boxplots, die die räumlichen Mittelwerte der Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung für jedes der 21 RCP8.5-Ensemblemitglieder zeigen. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar. Die räumlichen Mittelwerte werden für die 13 Planungseinheiten in Schleswig-Holstein nur über die Landflächen berechnet.

#### 4.6.2 Auswertungen auf Ebene der Kreise und kreisfreien Städte

In ähnlicher Weise zeigen Abb. 4-22 bis Abb. 4-24 die Auswertung für die drei RCP-Szenarien auf der räumlichen Ebene der 15 Kreise und kreisfreien Städte in Schleswig-Holstein. Da für alle in Kap. 4.6 dargestellten Ergebnisse dieselben Raster der Netto-Grundwasserneubildung in der räumlichen Auflösung des 100 m mGROWA-Modells als Grundlage für die Aggregation verwendet werden, ist zu erwarten, dass die Ergebnisse in etwa denen der Planungseinheiten entsprechen. Für die kreisfreien Städte Flensburg und Neumünster zeigen sich jedoch hohe Referenzwerte der Netto-Grundwasserneubildungshöhen. Hauptursache hierfür ist die Mittelung über einen im Vergleich zu den Planungseinheiten kleineren und homogeneren Landschaftsraum mit hohen Grundwasserneubildungsraten (städtische grundwasserferne Gebiete).

Obwohl versiegelte Flächen typischerweise zu einer geringeren Grundwasserneubildung über diesen einzelnen Rasterzellen führen, wird dies im Falle der kreisfreien Städte Schleswig-Holsteins durch andere Bedingungen ausgeglichen, die eine höhere Grundwasserneubildung begünstigen. In diesen kreisfreien Städten sind sowohl die grundwasserbeeinflussten als auch die entwässerten Flächen im Vergleich zum übrigen Bundesland recht niedrig. Außerdem ist in den als städtisch definierten Gebieten die häufigste Landbedeckung in den nicht versiegelten Teilen der Rasterzelle Grünland, das relativ niedrige  $k_{LN}$ -Faktoren aufweist (d. h. eine geringere tatsächliche Evapotranspiration). Es ist auch wichtig zu beachten, dass es keine Einzugsgebiete gibt, die zur Kalibrierung und Validierung des mGROWA-Modells im ausschließlichen städtischen Gebieten hätten verwendet werden können. Daher ist die Unsicherheit in der Modellierung für diese Gebiete inhärent höher als in den nicht städtischen Regionen.

Betrachtet man die Klimaprojektionen auf der räumlichen Skala der Kreise und kreisfreien Städte, so sind die Veränderungen beim RCP2.6-Szenario für den Median bis zum letzten Auswertungszeitraum recht homogen, wobei ein Ost-West-Gefälle der erwarteten Veränderungen zu erkennen ist (Abb. 4-22). Bei Betrachtung des 15. Perzentils findet die größte Verringerung der Grundwasserneubildung entlang der Westküste statt, und beim 85. Perzentil treten die höchsten Zunahmen in den zentral gelegenen Kreisen im Zeitraum 2011-2040 auf. Für das RCP4.5-Szenario gelten diese Muster ebenso, allerdings mit allgemein höheren Werten für die Veränderungen der Grundwasserneubildung (Abb. 4-23). Das Auftreten allgemein höherer Werte für die Grundwasserneubildungsänderung liegt darin begründet, dass beim RCP4.5-Szenario die höchste mediane Zunahme der Grundwasserneubildung vorherrscht. Für das RCP8.5-Szenario ergibt sich eine größere Veränderung der relativen räumlichen Muster von einer Periode zur nächsten (Abb. 4-24). Auch hier ist die Variabilität der erwarteten Veränderungen in den westlichen Kreisen hoch.

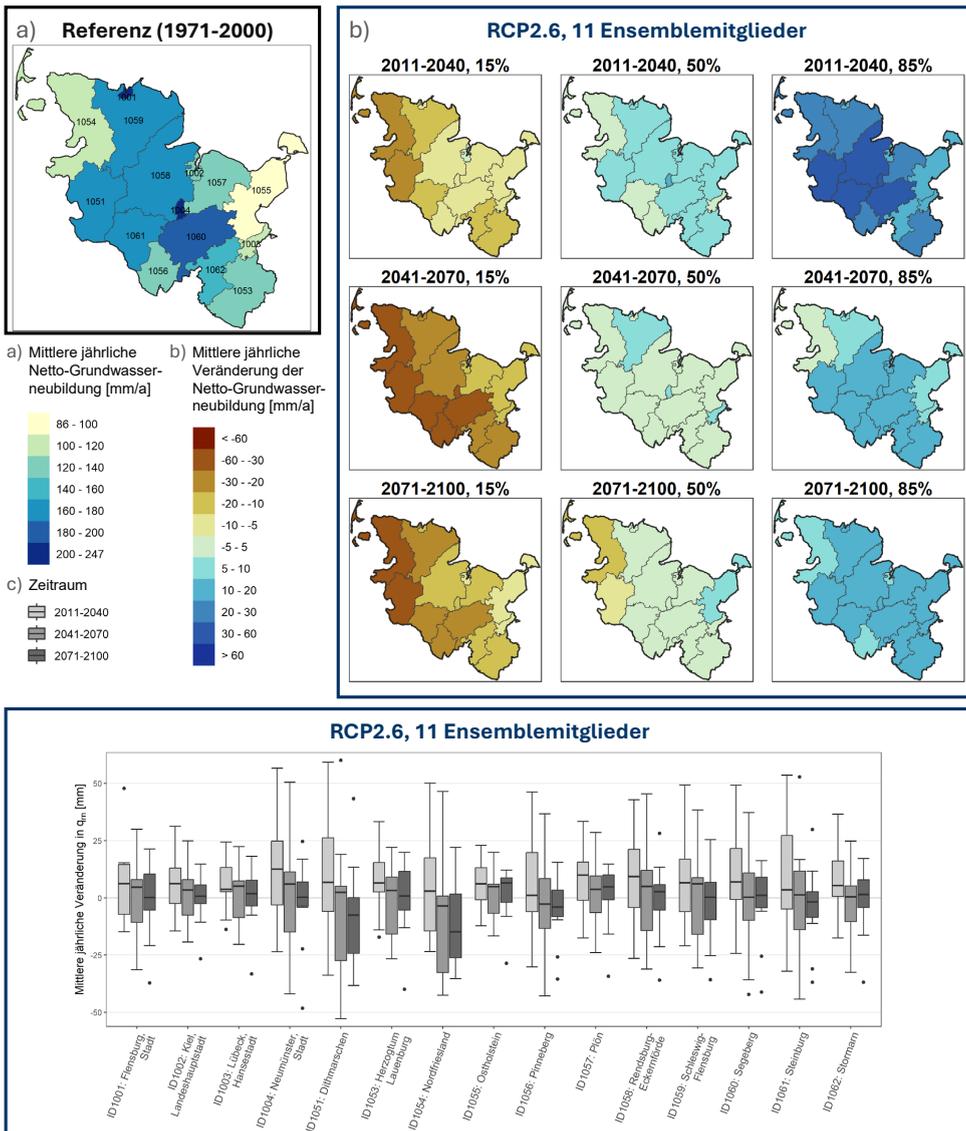


Abbildung 4-22: a) Referenzwerte der räumlichen Mittelwerte der simulierten Netto-Grundwasserneubildung anhand beobachteter klimatischer Inputs für 1971-2000; b) räumliche Mittelwerte der Veränderung der Netto-Grundwasserneubildung für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2071 und 2071-2100, berechnet für das 15., 50. und 85. Perzentil der 11 RCP2.6-Ensemblemitglieder; und c) Boxplots, die die räumlichen Mittelwerte der Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung für jedes der 11 RCP2.6-Ensemblemitglieder zeigen. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar. Die räumlichen Mittelwerte wurden für die 15 Kreise und kreisfreien Städte in Schleswig-Holstein nur über die Landflächen berechnet.

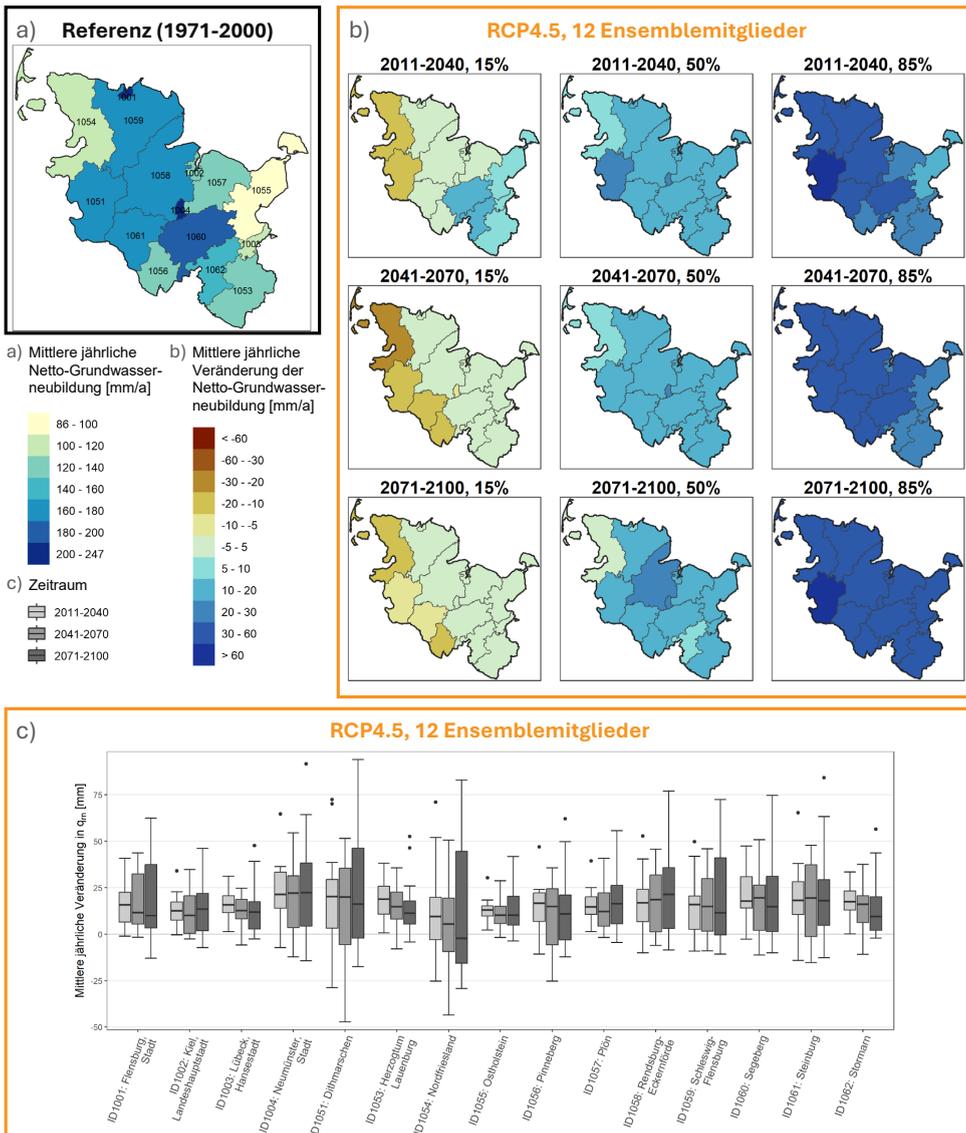


Abbildung 4-23: a) Referenzwerte der räumlichen Mittelwerte der simulierten Netto-Grundwasserneubildung anhand beobachteter klimatischer Inputs für 1971-2000; b) räumliche Mittelwerte der Veränderung der Netto-Grundwasserneubildung für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2071 und 2071-2100, berechnet für das 15., 50. und 85. Perzentil der 12 RCP4.5-Ensemblemitglieder; und c) Boxplots, die die räumlichen Mittelwerte der Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung für jedes der 12 RCP4.5-Ensemblemitglieder zeigen. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar. Die räumlichen Mittelwerte wurden für die 15 Kreise und kreisfreien Städte in Schleswig-Holstein nur über die Landflächen berechnet.

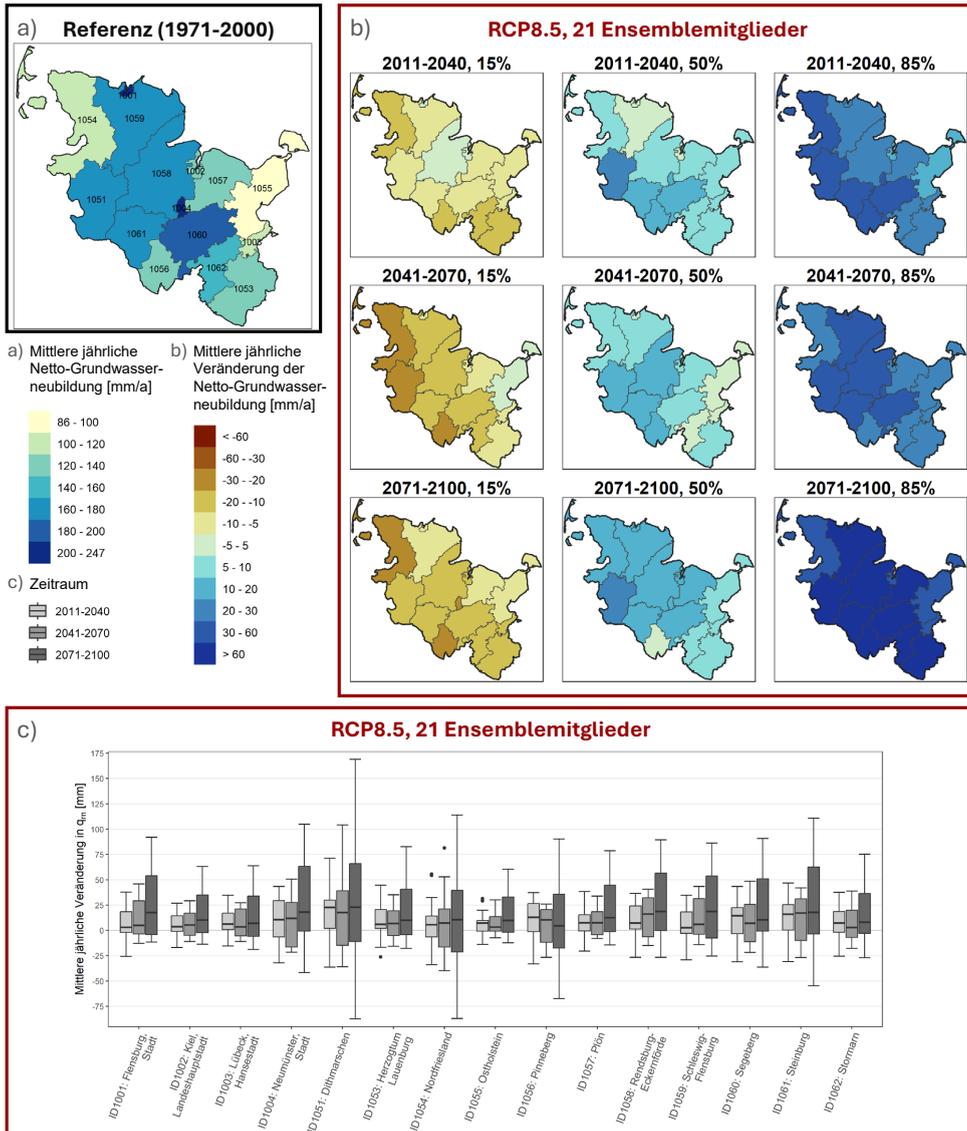


Abbildung 4-24: a) Referenzwerte der räumlichen Mittelwerte der simulierten Netto-Grundwasserneubildung anhand beobachteter klimatischer Inputs für 1971-2000; b) räumliche Mittelwerte der Veränderung der Netto-Grundwasserneubildung für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2071 und 2071-2100, berechnet für das 15., 50. und 85. Perzentil der 21 RCP8.5-Ensemblemitglieder; und c) Boxplots, die die räumlichen Mittelwerte der Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung für jedes der 21 RCP8.5-Ensemblemitglieder zeigen. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar. Die räumlichen Mittelwerte werden für die 15 Kreise und kreisfreien Städte in Schleswig-Holstein nur über die Landflächen berechnet.

#### 4.6.3 Auswertungen auf Ebene der hydrogeologischen Teilräume

Letztlich zeigen Abb. 4-25 bis Abb. 4-27 die Auswertung für die drei RCP-Szenarien auf der räumlichen Ebene der 27 hydrogeologische Teilräume in Schleswig-Holstein. Da die Eingaben für ein hydrologisches Modell stark von den hydrogeologischen Bedingungen beeinflusst werden, zeigt sich eine wesentlich größere räumliche Differenzierung der Netto-Grundwasserneubildungsraten im Referenzzeitraum als bei der Betrachtung der Planungseinheiten bzw. der Kreise und kreisfreien Städte.

Beim RCP2.6-Szenario sind die im 15. Perzentil gezeigten Abnahmen stärker um die Gebiete mit Grundwasserbeeinflussung konzentriert (vgl. Abb. 3-11), während die größten Zunahmen im 85. Perzentil in den Gebieten liegen, die weder oberflächennahes Grundwasser noch bindige Deckschichten (vgl. Abb. 3-17) aufweisen (Abb. 4-25). Dieser Effekt ist bei der Darstellung des RCP4.5-Szenarios noch ausgeprägter, da im Zeitraum 2071-2100, der die höchsten potenziellen Evapotranspirationsraten aufweist, sowohl das 15. Perzentil als auch der Median einige Gebiete mit einer Zunahme und einige mit einer Abnahme der Grundwasserneubildung zeigen (Abb. 4-26). Dies liegt daran, dass die mit dem Klimawandel verbundenen höheren Temperaturen und die dadurch bedingte höhere potenzielle Evapotranspiration einen größeren Einfluss auf die dem Grundwasser durch Transpirationsprozesse entzogenen Wassermengen haben. Für das RCP8.5-Szenario zeigt der Median ebenfalls eine hohe Variabilität, die gegen Ende des Jahrhunderts zunimmt (Abb. 4-27). Beim 15. Perzentil wird das Muster größerer Abnahmen der Grundwasserneubildung im Westen während der späteren Zeiträume sehr deutlich. Bei Betrachtung des 85. Perzentils zeigt sich jedoch ein gleichmäßigerer Anstieg der Grundwasserneubildung.

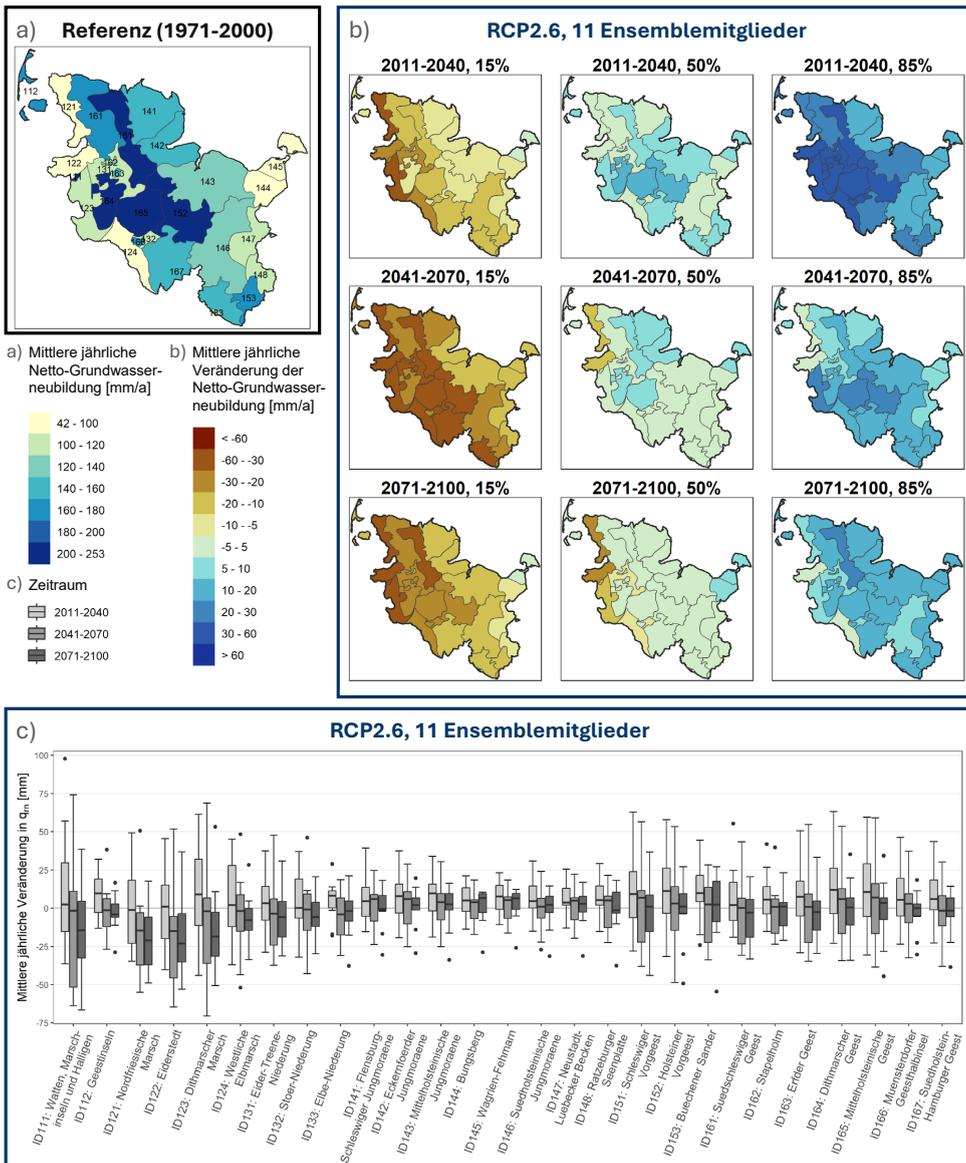


Abbildung 4-25: a) Referenzwerte der räumlichen Mittelwerte der simulierten Netto-Grundwasserneubildung anhand beobachteter klimatischer Inputs für 1971-2000; b) räumliche Mittelwerte der Veränderung der Netto-Grundwasserneubildung für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2071 und 2071-2100, berechnet für das 15., 50. und 85. Perzentil der 11 RCP2.6-Ensemblemitglieder; und c) Boxplots, die die räumlichen Mittelwerte der Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung für jedes der 11 RCP2.6-Ensemblemitglieder zeigen. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar. Die räumlichen Mittelwerte werden für die 27 hydrogeologischen Räume in Schleswig-Holstein nur über die Landflächen berechnet.

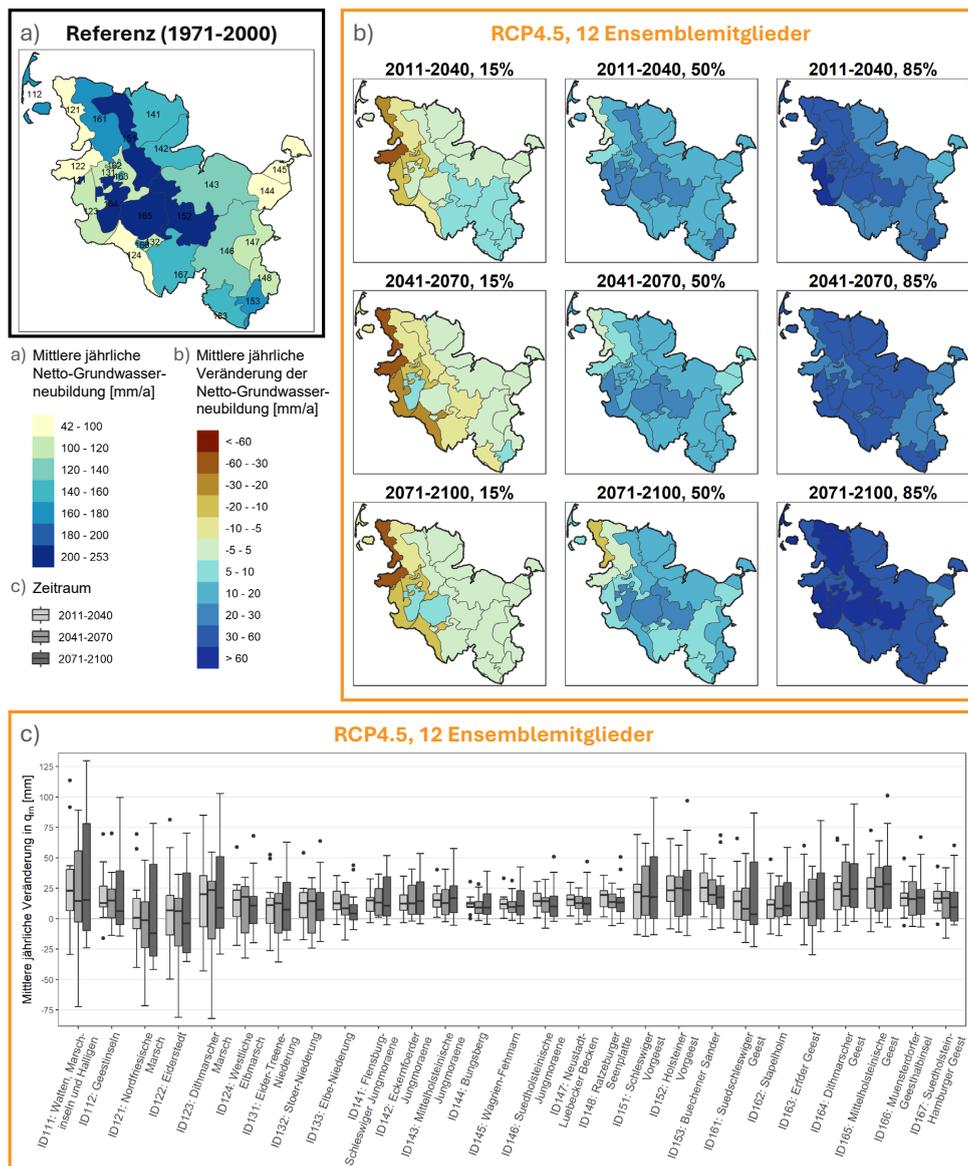


Abbildung 4-26: Referenzwerte der räumlichen Mittelwerte der simulierten Netto-Grundwasserneubildung anhand beobachteter klimatischer Inputs für 1971-2000; b) räumliche Mittelwerte der Veränderung der Netto-Grundwasserneubildung für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2071 und 2071-2100, berechnet für das 15., 50. und 85. Perzentil der 12 RCP4.5-Ensemblemitglieder; und c) Boxplots, die die räumlichen Mittelwerte der Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung für jedes der 12 RCP4.5-Ensemblemitglieder zeigen. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar. Die räumlichen Mittelwerte werden für die 27 hydrogeologischen Räume in Schleswig-Holstein nur über die Landflächen berechnet.

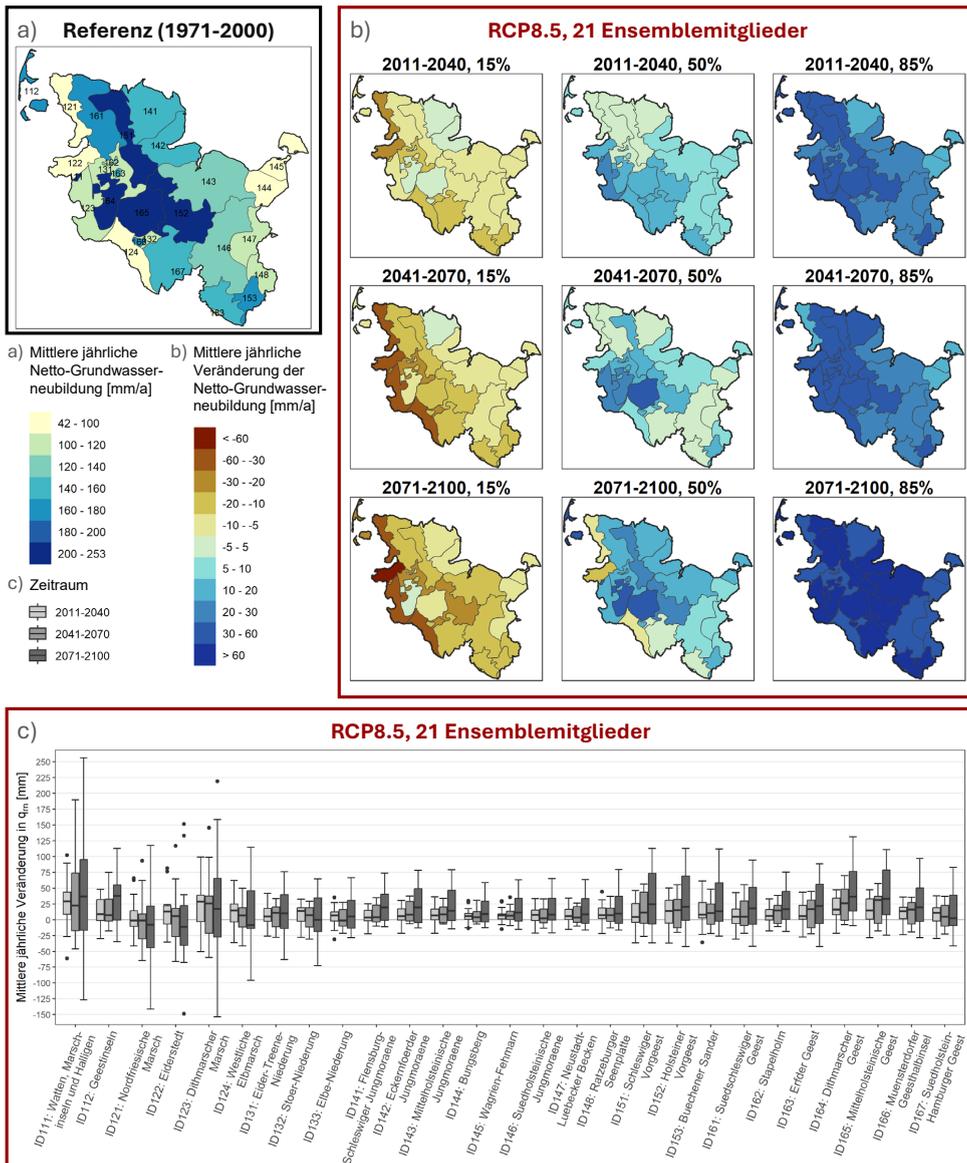


Abbildung 4-27: Referenzwerte der räumlichen Mittelwerte der simulierten Netto-Grundwasserneubildung anhand beobachteter klimatischer Inputs für 1971-2000; b) räumliche Mittelwerte der Veränderung der Netto-Grundwasserneubildung für die Zeiträume 2011-2040, 2041-2071 und 2071-2100, berechnet für das 15., 50. und 85. Perzentil der 21 RCP8.5-Ensemblemitglieder; und c) Boxplots, die die räumlichen Mittelwerte der Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung für jedes der 21 RCP8.5-Ensemblemitglieder zeigen. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar. Die räumlichen Mittelwerte werden für die 27 hydrogeologischen Räume in Schleswig-Holstein nur über die Landflächen berechnet.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse belegen, dass die Entscheidung über die für die Aggregation verwendeten räumlichen Einheiten die gewonnenen Ergebnisse erheblich beeinflussen kann. Aus geowissenschaftlicher Sicht wäre es zielführend, die hydrogeologischen Räume für Entscheidungsprozesse zur Bewirtschaftung des Grundwassers in Schleswig-Holstein zu verwenden.

#### 4.7 Änderungen der Variabilität

Es wird erwartet, dass die Variabilität der Niederschlagsmengen im Zuge des Klimawandels auf der innerjährlichen und zwischenjährlichen Skala in den allermeisten Regionen der Welt zunehmen wird (Pendergrass et al., 2017; Douville et al., 2021). Um solche Auswirkungen auf die Variabilität der Netto-Grundwasserneubildung in Schleswig-Holstein zu bewerten, sind in Abb. 4-28 entsprechende Boxplots dargestellt. Sie zeigen die Änderungen der Standardabweichungen der halbjährlichen Netto-Grundwasserneubildung für die drei betrachteten zukünftigen 30-Jahres-Zeiträume im Vergleich zu den Standardabweichungen des historischen Referenzzeitraums, die für jedes entsprechende Klimamodell berechnet wurden.

Für das Winterhalbjahr (Abb. 4-28, links) nimmt die Variabilität sowohl im späteren Verlauf des Jahrhunderts als auch bei den Szenarien mit höheren Emissionen tendenziell zu. Für alle Zeiträume des RCP8.5-Szenarios prognostizieren mehr als die Hälfte der Klimamodelle eine Zunahme der Variabilität der halbjährlichen Netto-Grundwasserneubildung. Allerdings sind diese Änderungen in ihrer Größenordnung nicht allzu hoch. Für das Sommerhalbjahr (Abb. 4-28, rechts) zeigen die Ergebnisse eine generelle - aber nicht ausschließliche - Zunahme der Variabilität der Netto-Grundwasserneubildung, wobei mehr als die Hälfte der Klimamodelle eine Zunahme bei allen drei RCP-Szenarien in jedem Zeitraum zeigt. Die Veränderungen der Variabilität sind in der Regel im Sommer höher als im Winter. Als Referenzgröße beträgt die Standardabweichung der Ergebnisse für die Netto-Grundwasserneubildung, die auf der Grundlage des beobachteten klimatischen Inputs für 1971-2000 simuliert wurde, 38 mm für das Winterhalbjahr und 39 mm für das Sommerhalbjahr

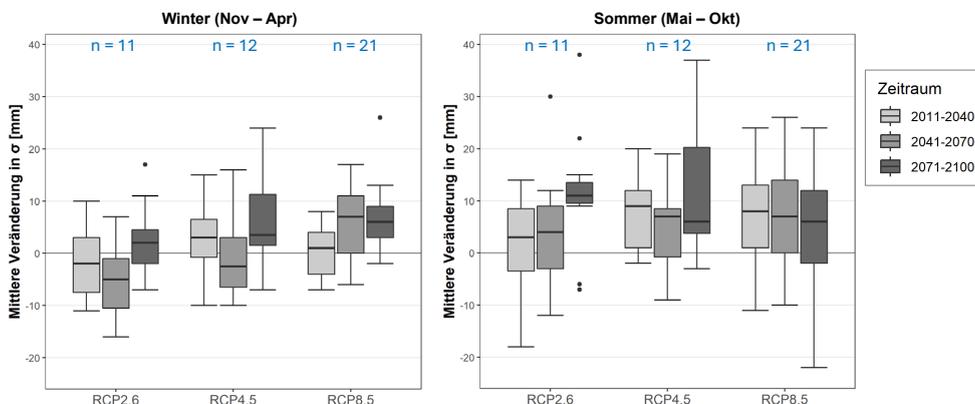


Abbildung 4-28: Boxplots der Veränderung der Standardabweichung der halbjährlichen Netto-Grundwasserneubildung für alle 44 Klimamodelle für die 30-Jahres-Zeiträume 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000. Die Werte für 1971-2000 wurden aus den historischen Teilen der entsprechenden Klimamodelle berechnet. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar.

Für einige wasserwirtschaftliche Fragestellungen kann es von Bedeutung sein, wie sich die Zeiträume mit extrem niedriger Grundwasserneubildung im Vergleich zum historischen Referenzzeitraum verändern werden. Zu diesem Zweck wurden sowohl einzelne Jahre als auch Zeiträume von 2, 3, 5 und 10 aufeinanderfolgenden Jahren berücksichtigt.

Für das Beispiel „5 aufeinanderfolgende Jahre“ wurde für jedes einzelne Klimamodell zunächst das gleitende Mittel der jährlichen Netto-Grundwasserneubildung über einen 5-Jahres-Abschnitt im gesamten Zeitraum 1971-2100 berechnet<sup>10</sup>, d. h. sowohl der historische als auch der zukünftige Teil des Klimamodells wurde einbezogen. Innerhalb des Referenzzeitraums 1971-2000 sowie innerhalb der drei Auswertungszeiträume wurde dann der niedrigste Wert des gleitenden Mittels ermittelt. Abb. 4-29 zeigt die Ergebnisse der trockensten Phasen in aufeinanderfolgenden Jahren für alle ausgewerteten Perioden und Klimamodelle in Form von Boxplots. Für den Zeitraum „ein Jahr“ bedeutet diese Vorgehensweise einfach, dass das Jahr mit der niedrigsten Netto-Grundwasserneubildung bestimmt wurde.

Wie Abb. 4-29 zeigt, sind bei den meisten Klimamodellen und in den meisten Zeiträumen die Grundwasserneubildungsraten in den trockensten Abschnitten im Allgemeinen höher als in den entsprechenden trockensten Abschnitten der historischen Referenzperiode. Dies ist nicht unerwartet, da die Mehrheit der Klimamodelle einen generellen Anstieg der langjährigen mittleren Grundwasserneubildungsraten zeigt. Es gibt jedoch einige Kombinationen, die auf einen potenziellen Rückgang der Grundwasserneubildung über kurze Zeiträume im Vergleich zu historischen Trockenperioden hindeuten. Dies gilt insbesondere für das RCP2.6-Szenario bei Abschnitten von bis zu fünf aufeinanderfolgenden Jahren im Zeitraum 2071-2100 sowie für das RCP8.5-Szenario für einzelne Jahre in den Zeiträumen 2041-2070 und 2071-2100.

---

<sup>10</sup> Wie zuvor (s. Kap. 4.5) handelt es sich bei den dargestellten Werten nicht die absoluten Werte der Netto-Grundwasserneubildung, die aus den einzelnen Klimamodellen berechnet wurden. Die Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung wurden für jedes Klimamodell in Bezug auf seine historische Referenzperiode berechnet und zu den Grundwasserneubildungsraten addiert bzw. subtrahiert, die anhand der beobachteten historischen Klimaeingaben berechnet wurden.

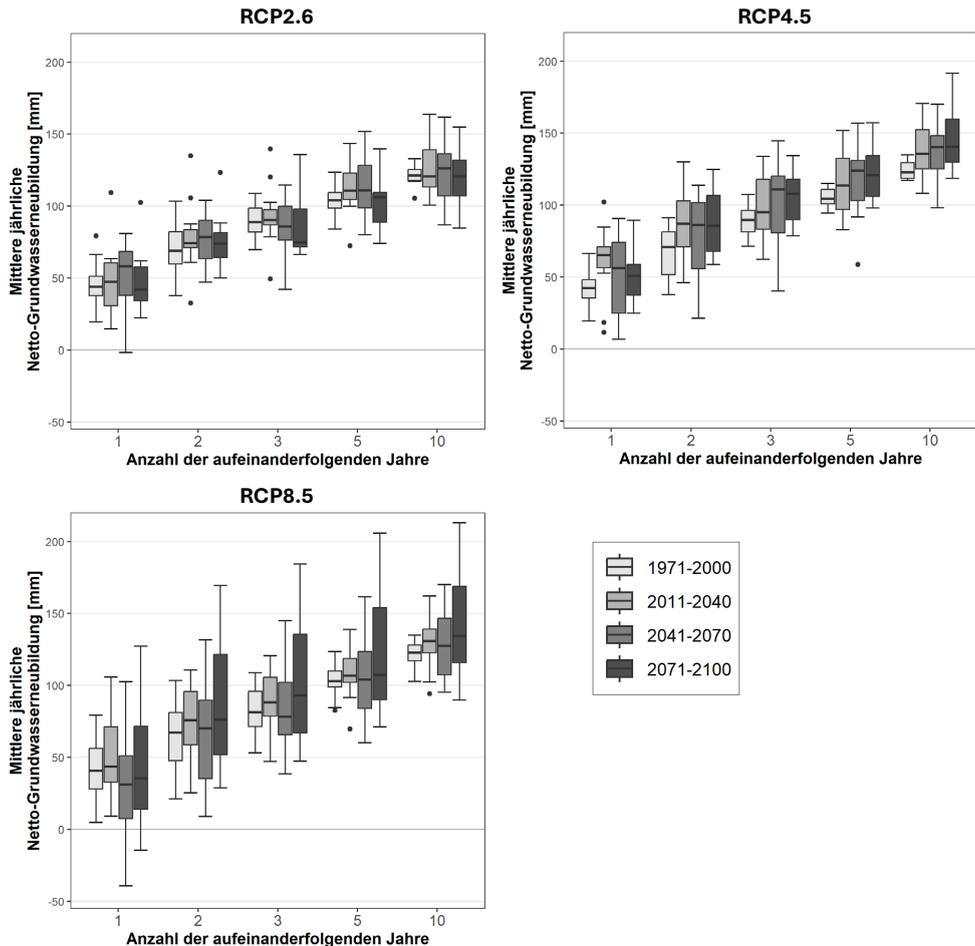


Abbildung 4-29: Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung in Trockenperioden. Die x-Achse zeigt die Anzahl der betrachteten aufeinanderfolgenden Jahre und die y-Achse die niedrigste mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung, die über diesen Zeitabschnitt berechnet wurde. Die Werte für 1971-2000 wurden aus dem historischen Teil der entsprechenden Klimamodelle berechnet. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar.

Die gleiche Auswertung wurde für die nassen Perioden durchgeführt, die Ergebnisse sind in Abb. 4-30 dargestellt. Während die Veränderungen für das RCP2.6-Szenario recht gering sind, zeigen die meisten RCP4.5- und RCP8.5-Klimamodelle eine erhöhte Grundwasserneubildung für extrem nasse Perioden.

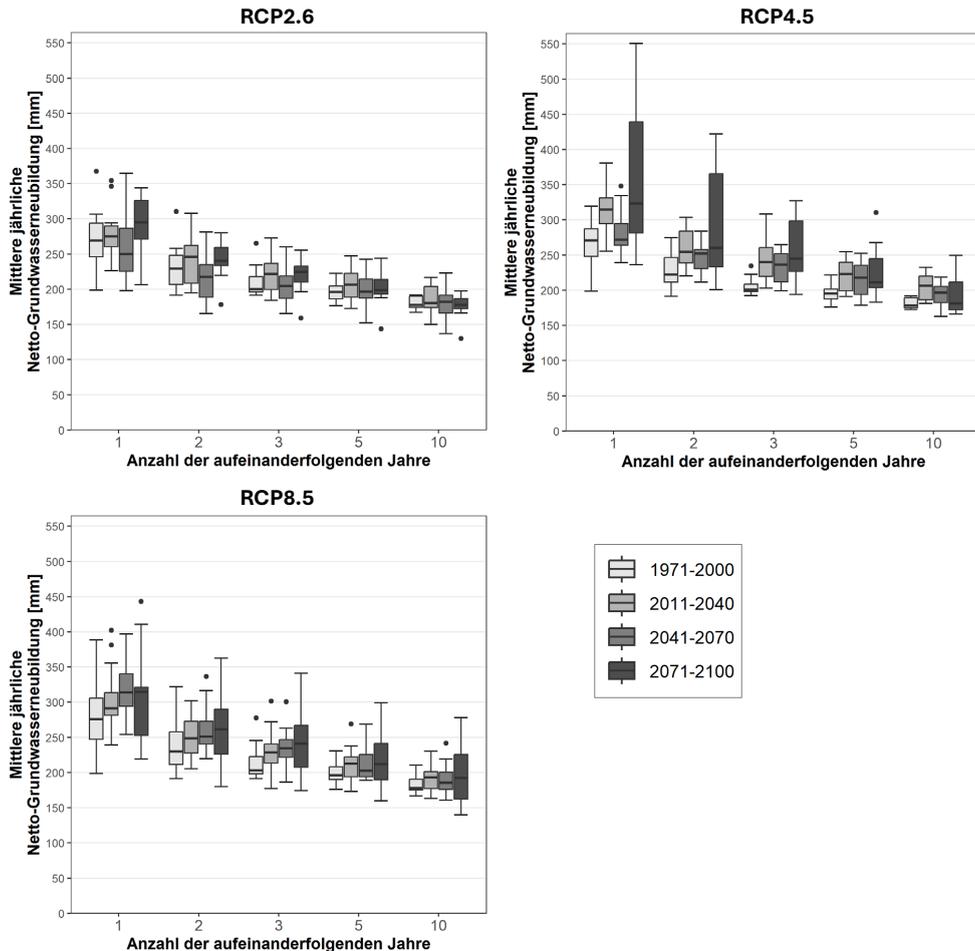


Abbildung 4-30: Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung in Nassperioden. Die x-Achse zeigt die Anzahl der betrachteten aufeinanderfolgenden Jahre und die y-Achse die höchste mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung, die über diesen Zeitabschnitt berechnet wurde. Der obere und untere Teil des ausgefüllten Kästchens zeigt das dritte und erste Quartil, die Linie in der Mitte den Median. Die Whisker reichen bis zum weitesten Punkt, der weniger als das 1,5-Fache des Interquartilabstands vom jeweiligen Quartil entfernt ist. Die Punkte stellen die Ausreißer dar.

#### 4.8 Auswertung der Kern-Ensembles

Aufgrund des hohen Zeit- und Rechenaufwands für die Bewertung vollständiger Klima-Ensembles kann es in einigen Fällen vorteilhaft sein, Kern-Ensembles zu verwenden (DWD, 2021). Ein Ziel dieser Studie war es, neben der Auswertung des Gesamtensembles auch die Eignung von Kern-Ensembles für hydrologische Untersuchungen des Klimawandels in Schleswig-Holstein zu prüfen.

Das DWD-Kern-Ensembles (s. Kap. 2) besteht aus 5 RCP2.6-, 6 RCP4.5- und 6 RCP8.5-Klimamodellen (Dalelane, 2021; DWD, 2023b). Die Abb. 4-31 zeigt die 30-jährigen gleitenden

Mittelwerte der jährlichen Netto-Grundwasserneubildung für alle Mitglieder des DWD-Referenz-Ensembles für die drei RCP-Szenarien (vgl. Abb. 4-15 bis Abb. 4-17). Die Mitglieder des DWD-Kern-Ensembles sind in schwarzer Farbe dargestellt, die nicht zugehörigen in hellgrau.

Während die Auswahl der RCP2.6-Klimamodelle im Allgemeinen die gesamte Bandbreite aller Modellmitglieder abdeckt, ist dies bei den Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 nicht der Fall. Beim RCP4.5-Szenario werden die oberen Simulationen der Grundwasserneubildung sowohl zu Beginn als auch am Ende des 21. Jahrhunderts nicht erfasst. Beim RCP8.5-Szenario werden beide Extreme in der ersten Hälfte des Jahrhunderts nicht abgedeckt und der obere Bereich der Werte wird in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts nicht erfasst. Das DWD-Kern-Ensemble wurde anhand von Analysen auf der deutschen Raumskala ausgewählt, was ein Grund dafür sein könnte, dass es nicht die gesamte Bandbreite der mit dem vollständigen Ensemble für Schleswig-Holstein prognostizierten Ergebnisse erfasst. Aus diesem Grund wird empfohlen, dass weitere Entscheidungsverfahren in Schleswig-Holstein auf den Ergebnissen des gesamten DWD-Referenz-Ensembles basieren sollten.

Das „Bayern\_Ensemble\_v1“ wurde auf der Grundlage einer Auswertung von Klimamodellen über ein Untersuchungsgebiet ausgewählt, das die Landesfläche von Bayern vollständig abdeckt, im Norden und Westen etwas nach Thüringen, Hessen und Baden-Württemberg hineinreicht und auch im Süden und Osten über die bayerische Grenze hinausgeht (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2020). Da dieser geografische Bereich weit von Schleswig-Holstein entfernt ist und die Ergebnisse auch die Untauglichkeit für eine Anwendung in Schleswig-Holstein zeigen, wird diese Auswertung lediglich in Appendix H aufgeführt.

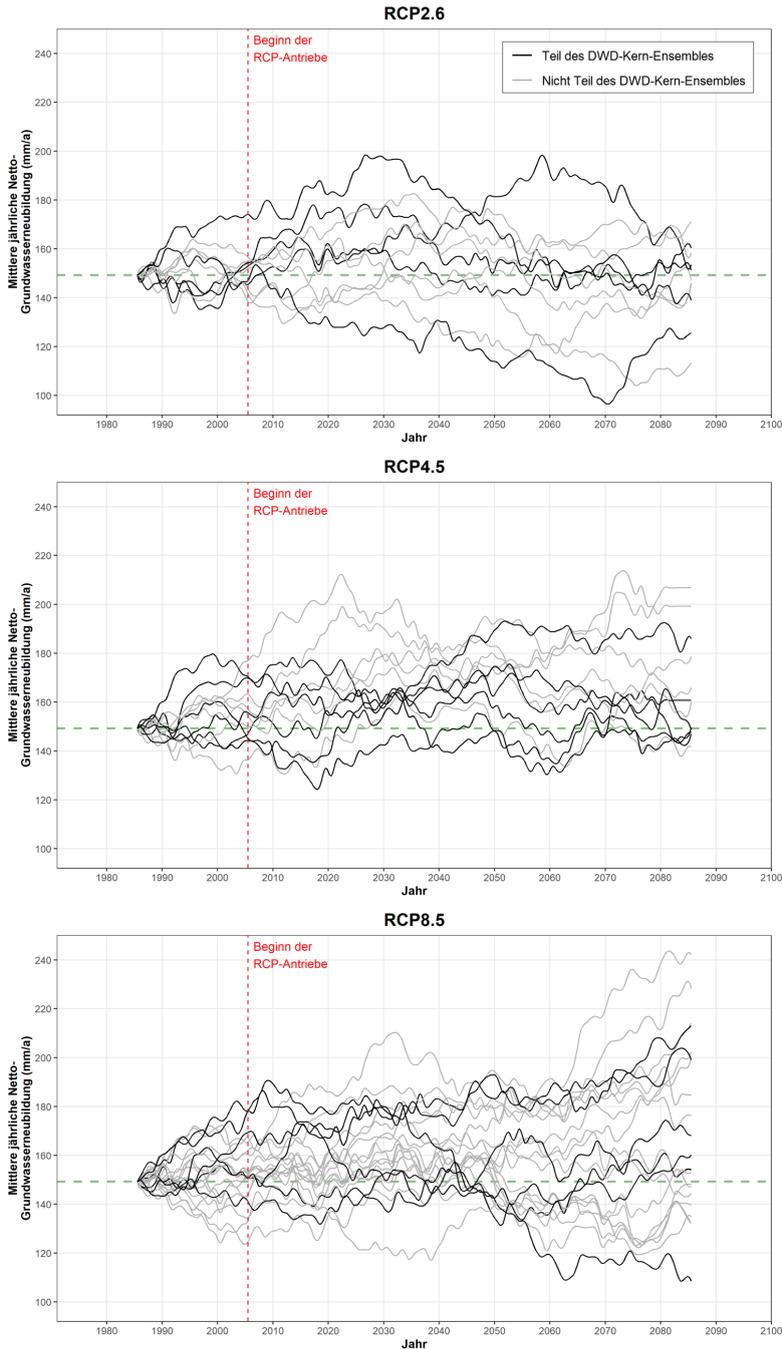


Abbildung 4-31: Vergleich des DWD-Kern-Ensembles mit dem DWD-Referenz-Ensembles für alle RCP-Szenarien. Dargestellt sind die 30-jährigen gleitenden Mittelwerte der jährlichen Netto-Grundwasserneubildung für alle Klimamodelle. Diejenigen Modelle des DWD-Kern-Ensembles sind in schwarz und diejenigen des DWD-Referenz-Ensembles, die nicht zum DWD-Kern-Ensembles gehören, sind in grau dargestellt. Der Referenzwert für 1971-2000 wird durch die gestrichelte grüne Linie dargestellt.

## 5 Diskussion und Ausblick

### 5.1 Vergleich mit anderen Studien

#### Veränderungen der Grundwasserneubildung

Auf europäischer Skala zeigt eine vor kurzem erschienene Studie von Kumar et al. (2024)<sup>11</sup> einen starken Nord-Süd-Gradienten bei der zukünftig zu erwartenden Grundwasserneubildung in Europa. Für alle drei betrachteten globalen Temperaturanstiege (1.5 °C, 2.0 °C, und 3.0 °C) zeigt der Mittelwert des implementierten Multi-Modell-Ensembles einen starken Rückgang der Grundwasserneubildung in Südeuropa und erhöhte Grundwasserneubildungen in Nordeuropa. Die Wendepunkte (d. h. die Gebiete, an denen die Veränderungen annähernd bei Null liegen) befinden sich räumlich im Bereich des mittleren Breitengrades von Deutschland, weshalb die Ergebnisse im größten Teil von Deutschland nur minimale Veränderungen zeigen. In der Region Schleswig-Holstein liegen die Veränderungen in der Größenordnung von 0 bis 10 %, was mit den Ergebnissen dieser Studie übereinstimmt.

Dieses Nord-Süd-Gefälle in Europa ist auch in den fünf von Hiscock et al. (2011) untersuchten Gebieten zu beobachten, auch wenn keines der untersuchten Gebiete in Deutschland liegt. Sie verwendeten vier GCM, die auf dem älteren SRES A1F1-Szenario basieren, für Einzugsgebiete in Dänemark, England, Frankreich, Italien und Spanien. Das Einzugsgebiet, das Schleswig-Holstein geografisch am nächsten liegt, ist Aarhus in Dänemark, in dem für alle vier GCM in den drei untersuchten Zeiträumen ein Anstieg der Grundwasserneubildung zwischen 8 % und 37 % modelliert wurde. Diese Werte sind etwas höher als die Schätzungen in dieser Studie für Schleswig-Holstein, was jedoch für ein Einzugsgebiet weiter nördlich zu erwarten ist.

Für die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Hamburg wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung mit dem mGROWA-Modell analysiert (Herrmann et al., 2016b, 2017a, 2021). In Nordrhein-Westfalen, wo eine reduzierte Auswahl des DWD-Referenz-Ensembles v2018 verwendet wurde, wird für die meisten Ensemblemitglieder eine allgemeine Zunahme der Netto-Grundwasserneubildung simuliert. Die medianen Veränderungen der Grundwasserneubildung (im Vergleich zu 1971-2000) für die RCP2.6-Klimamodelle betragen +11 mm/a (2011-2040), +5 mm/a (2041-2070) und 0 mm/a (2071-2100). Für RCP4.5 waren es +14 mm/a (2011-2040), +8 mm/a (2041-2070) und +5 mm/a (2071-2100), für RCP8.5 waren es +5 mm/a (2011-2040), +11 mm/a (2041-2070) und +9 mm/a (2071-2100). Ähnlich wie in dieser Studie ist die Zunahme der Grundwasserneubildung in den Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 am größten. In Niedersachsen, wo die älteren IPCC-SRES-Emissionsszenarien verwendet wurden, wurden keine eindeutig durch den Klimawandel verursachten Änderungen der Grundwasserneubildung simuliert. In der Studie von Herrmann et al. (2017a) wurden nur ein GCM und zwei RCM verwendet, wobei sich die Ergebnisse der jeweiligen RCM-Modelle stark voneinander unterscheiden. Deshalb sind Schlussfolgerungen über wahrscheinliche Veränderungen der Grundwasserneubildung nur schwer zu ziehen. Die Ergebnisse für Hamburg aus Herrmann et al. (2016b) sind nicht direkt vergleichbar, da sie als ein Verhältnis von Bewässerungsbedarf zur Grundwasserneubildung berechnet wurden.

Eine Studie von Jing et al. (2020) über das Nängelstedter Becken (Thüringen und Sachsen-Anhalt) belegt ebenfalls einen insgesamt leichten Anstieg der Grundwasserneubildung. Ähnlich wie Kumar et al. (2024) bewerteten sie auch die Veränderungen bei den Temperaturanstiegen von 1,5 °C, 2,0 °C und 3,0 °C für fünf GCM unter drei RCP-Szenarien. Die mittlere Zunahme der Grundwasserneubildung lag bei allen Modellen für die drei Temperaturniveaus zwischen 7 % und 9 %, wobei die Spanne aller Modellergebnisse ca. -7 % bis +32 % betrug.

---

<sup>11</sup> Zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Berichts lag diese Studie nur als Preprint vor, der das Peer-Review-Verfahren noch nicht abgeschlossen hatte.

Einige Studien in Deutschland prognostizieren abnehmende Grundwasserneubildungsraten. Hattermann et al. (2008) simulierten für den größten Teil des Elbeinzugsgebiets eine erhebliche Abnahme der Grundwasserneubildung bis Mitte des 21. Jahrhunderts (mediane Abnahme von 22 % aus den 100 durchgeführten Klimarealisierungen). Neukum & Azzam (2012) untersuchten ein Einzugsgebiet im Schwarzwald und zeigten einen Rückgang der Grundwasserneubildung in den Sommermonaten in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts, der nur teilweise durch eine steigende Grundwasserneubildung in den Wintermonaten kompensiert wird. Die Ergebnisse zeigen ein ähnliches Muster wie in Schleswig-Holstein. Die relativen Veränderungen im Winterhalbjahr sind oftmals positiver als im Sommerhalbjahr.

Wunsch et al. (2022) verwendeten ein *machine-learning*-Verfahren (*convolutional neural networks*) zur Vorhersage des Grundwasserspiegels bis zum Jahr 2100 für 118 Standorte in Deutschland (davon sieben in Schleswig-Holstein). Sie prognostizierten für das RCP8.5-Szenario eine generelle Absenkung des Grundwasserspiegels in ganz Deutschland, und innerhalb Schleswig-Holsteins prognostizierten einige Klimamodelle eine Absenkung des Grundwasserspiegels, während andere keine signifikanten Veränderungen vorhersagten. Für die meisten Klimamodelle wurden in den RCP2.6- und RCP4.5-Szenarien keine signifikanten Veränderungen über Schleswig-Holstein prognostiziert.

Die Studien, die für einen Vergleich als am geeignetsten erachtet werden, sind diejenigen mit den aktuellsten Klimamodellen und in geografischen Regionen, die nahe an Schleswig-Holstein liegen (z. B. Herrmann et al., 2021; Wunsch et al. 2022; Kumar et al., 2024). Im Vergleich zu den Ergebnissen von Herrmann et al. (2021) und Kumar et al. (2024) erscheinen die Ergebnisse dieser Studie sehr plausibel. Studienübergreifend zeigt sich für die meisten verwendeten Klimamodelle ein geringer Anstieg der Grundwasserneubildung. Im Vergleich zu Wunsch et al. (2022) prognostiziert diese Studie für die RCP2.6- und RCP4.5- Szenarien keine signifikanten Veränderungen. Für das Emissionsszenario RCP8.5 wird im Gegensatz zu Wunsch et al. (2022) jedoch keine signifikante Abnahme der Grundwasserneubildung vorhergesagt. Hier ist anzumerken, dass Wunsch et al. (2022) die Grundwasserstände und nicht die Grundwasserneubildungsraten simulierten. Darüber hinaus ist die Anwendbarkeit von Maschinenlernverfahren zur adäquaten Vorhersage hydrologischer Auswirkungen des Klimawandels umstritten (Wi & Steinschneider, 2022). Abschließend sei angemerkt, dass sich aus dem Vergleich mit den zitierten Studien nur schwer direkte Schlussfolgerungen im Hinblick auf die zu erwartenden Veränderungen der Grundwasserneubildung ziehen lassen, da unterschiedliche hydrologische Modelle, Emissionsszenarien und Klimamodelle, Auswertungsmethoden usw. verwendet wurden.

### **Robustheit der modellierten Änderungen**

Robustheitstests bewerten die Belastbarkeit von Ensemble-Projektionen, indem sie prüfen, ob mehrere Klimamodelle die gleichen Entwicklungen prognostizieren (s. Kap 4.4). In dieser Studie werden beide Kriterien der Robustheit von keinem der RCP-Szenarien für keinen der untersuchten Zeiträume erfüllt. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass für keines der RCP-Szenarien mit Sicherheit gesagt werden kann, ob die Grundwasserneubildung zunehmen oder abnehmen wird. Von den anderen in den obigen Absätzen beschriebenen Studien berichten lediglich Herrmann et al. (2021) und Kumar et al. (2024) über eine Analyse der Robustheit ihrer Ergebnisse.

Für Nordrhein-Westfalen verwendeten Herrmann et al. (2021) die gleichen Kriterien zur Bewertung der Robustheit auf der Grundlage von Pfeifer et al. (2015) wie in dieser Studie. Auch sie kamen zu dem Schluss, dass keines der Ergebnisse für irgendein RCP-Szenario als robust eingestuft werden kann. Dies ist nicht überraschend, da dasselbe hydrologische Modell, dieselbe Methode zur Bewertung der Robustheit und ein ähnlicher Satz von Klimamodellen (eine reduzierte Auswahl des DWD-Referenz-Ensembles v2018) verwendet wurden und die Untersuchungsgebiete nicht allzu weit voneinander entfernt sind.

Kumar et al. (2024) haben die Robustheit durch die Berechnung eines „*signal-to-noise*“-Verhältnisses bewertet, das sich aus dem Mittelwert (*signal*) geteilt durch die Standardabweichung (*noise*) der Projektionen des Multi-Modell-Ensembles ergibt. Die Werte für Schleswig-

Holstein lagen meist zwischen 0,25 und 0,50, was bedeutet, dass die Robustheit der prognostizierten Änderungen eher gering ist.

## 5.2 Prognosen zum Klimawandel

Die Debatte darüber, welches RCP-Szenario am wahrscheinlichsten eintreten wird, ist weiterhin Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion. Das RCP8.5-Szenario entsprach am besten den tatsächlichen kumulativen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitraum 2005-2020 und wurde einerseits als das wahrscheinlichste Szenario bis mindestens zur Mitte des Jahrhunderts bezeichnet (Schwalm et al., 2020). Andererseits wird vermutet, dass es aufgrund der diesem Szenario zugrunde liegenden Annahmen über den künftigen Kohleverbrauch unwahrscheinlich ist, dass so hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen auftreten werden (Ritchie & Dowlatabadi, 2017; Hausfather & Peters, 2020). Wichtig ist auch zu beachten, dass die hohen Unsicherheiten in den RCP-Szenarien nicht nur auf politische Entscheidungen zurückzuführen sind, sondern auch auf Unsicherheiten bei der Reaktion des terrestrischen Kohlenstoffkreislaufs (Friedlingstein et al., 2014).

Die für diese Studie verwendeten Klimaprojektionen (DWD-Referenz-Ensembles v2018) stammen aus der CMIP5-EURO-CORDEX und ReKliEs-De-Phase. Die GCM der CMIP6-Simulationen, die einen geänderten RCP-Antrieb ab 2015 berücksichtigen, sind bereits veröffentlicht (Chen et al., 2021), doch der angestrebte Abschluss des Downscaling der Projektionen und die Auswahl eines Referenz-Ensembles für Deutschland ist erst im Jahr 2026 vorgesehen (Steger, 2024).

Ein Vergleich der globalen CMIP5- und CMIP6-Modelle über Europa für das RCP8.5-Emissionsszenario zeigt, dass die CMIP6-Projektionen für Mittel- und Nordeuropa einen höheren Temperaturanstieg im Sommer vorhersagen als CMIP5-Simulationen (Palmer et al., 2021). Die genannte Studie zeigt auch eine vergleichsweise niedrigere Niederschlagsmenge in den Sommermonaten. In den Wintermonaten sind weder die Temperatur- noch die Niederschlagsänderungen besonders ausgeprägt. Da die Ergebnisse von Palmer et al. (2021) über ein großes Gebiet aggregiert sind und für GCM ermittelt wurden, sollten sie nicht unbedingt als repräsentativ für die in Schleswig-Holstein zu erwartenden Veränderungen angesehen werden. Erst wenn das neue DWD-Ensembles der herunterskalierten RCM-Modelle für Deutschland bzw. für Schleswig-Holstein zur Verfügung steht, lässt sich mit größerer Sicherheit feststellen, ob die europaweiten Unterschiede in den globalen Modellen zwischen CMIP5 und CMIP6 auch in den RCM auf der lokalen Skala auftreten.

## 5.3 Mögliche Änderungen der Grundwasserstände

Im Modell mGROWA wird der monatliche Grundwasserstand im Boden in Anlehnung an Bug et al. (2020) für grundwasserbeeinflusste Flächen als Randbedingung gesetzt. Da es über den historischen Zeitraum keine erkennbaren Trends in der Grundwasserneubildung gab (vgl. Teil 1, Abb. 5-1), wurden die monatlichen Grundwasserstände in dieser Studie als konstant angenommen.

In Zukunft könnten sich die monatlichen Grundwasserstände jedoch durch eine Reihe von Einflüssen ändern. Erstens können längere Phasen mit einer durch den Klimawandel bedingten höheren oder niedrigeren Grundwasserneubildung die Höhe des Grundwasserspiegels beeinflussen. Außerdem könnten sich sinkende Grundwasserstände durch Veränderungen der Vegetation oder eine eventuell zunehmende Grundwasserentnahme für die Bewässerung ergeben. Steigende Grundwasserstände könnten sich durch den Anstieg des Meeresspiegels ergeben. Bis zum Jahr 2100 wird ein globaler Meeresspiegelanstieg zwischen ca. 30 cm und 1 m erwartet (Fox-Kemper et al., 2021), wobei auch für Schleswig-Holstein ein regionaler Meeresspiegelanstieg in einer ähnlichen Größenordnung erwartet wird (Grinsted et al., 2015). Da ein großer Teil Schleswig-Holsteins eine sehr niedrige Höhenlage aufweist (vgl. Teil 1,

Abb. 3.5), könnte sich dieser Meeresspiegelanstieg auf den Grundwasserstand in den Küstenregionen auswirken (Habel et al., 2024).

#### **5.4 Weitere statische Eingangsgrößen**

Es gibt drei weitere Eingangsgrößen im mGROWA-Modell, die sich im Laufe des Jahrhunderts eventuell ändern werden, obwohl sie über den gesamten Klimamodellierungszeitraum als statisch angenommen wurden: Die versiegelten Flächen, die Landbedeckung und die künstlich entwässerten Flächen können sich infolge des Klimawandels, des Bevölkerungswachstums oder der wirtschaftlichen Entwicklung zukünftig ändern. Allerdings beinhaltet jede Schätzung bezüglich der zukünftigen Änderung dieser Eingangsgrößen ein sehr hohes Maß an Unsicherheit. Ein entscheidender Vorteil, diese Eingangsgrößen für den gesamten Modellierungszeitraum als statisch beizubehalten, liegt darin, dass die Auswirkungen der Änderungen durch den klimatischen Input unabhängig von allen anderen Einflüssen bewertet werden können.

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ziel der in diesem Teil 2 beschriebenen Studie war es, die Entwicklung der Grundwasserneubildung für das Land Schleswig-Holstein flächendifferenziert bis zum Jahr 2100 zu projizieren. Dies erfolgte basierend auf dem in Teil 1 dieses Berichtes beschriebenen mGROWA-Modells. Anstelle von gemessenen (historischen) Klimavariablen (Niederschlag, potenzielle Evapotranspiration) wurde das mGROWA-Modell mit allen 44 Mitgliedern des DWD-Referenz-Ensembles v2018 als klimatischem Modellinput betrieben. Von den 44 Klimamodellen des DWD-Referenz-Ensembles entstammen 11 dem RCP2.6-, 12 dem RCP4.5- und 21 dem RCP8.5-Szenario.

Aufgrund der komplexen Beschaffenheit der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsmuster wurde eine Bias-Korrektur der Niederschlagsdaten vorgenommen, sodass tägliche Niederschlagswerte als Direktoutput für die Ensemble-Klimamodelle bereitgestellt wurden. Da die potenzielle Evapotranspiration nicht für die Klimamodelle zur Verfügung steht, wurde sie für die meisten Modellmitglieder nach der in ATV-DVWK (2002) beschriebenen Methode abgeleitet.

Aus den Bias-korrigierten täglichen Niederschlagsdaten und den abgeleiteten täglichen potenziellen Evapotranspirationsdaten für alle Gitterpunkte der Klimamodelle wurde eine bilineare Interpolation vorgenommen, um die benötigten Klimaeingaben in der räumlichen Auflösung von 100 m des schleswig-holsteinischen mGROWA-Modellgitters zu erzeugen. Für jeden der drei 30-Jahres-Zeiträume, die im Hinblick auf die Analyse der Auswirkungen des Klimawandels für diese Studie ausgewählt wurden (2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100), wurden die Veränderungen dieser beiden Klimainputs in Bezug auf den Referenzzeitraum (1971-2000) quantifiziert. Es zeigte sich, dass die meisten Klimamodelle für alle evaluierten Zeiträume und RCP-Szenarien sowohl eine erhöhte mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration als auch einen erhöhten Niederschlag aufweisen. Dabei ist die Spannweite der zu erwartenden Veränderung gegenüber dem Referenzzeitraum für den Niederschlag höher.

Alle anderen Modelleingangsgrößen des mGROWA-Modells wurden für die projizierten Grundwasserneubildungsdaten unverändert übernommen, so dass alle Änderungssignale bei der Grundwasserneubildung ausschließlich auf die geänderten Klimaeingaben zurückzuführen sind.

Zunächst wurde mit Hilfe von Taylor-Diagrammen, der *Kling-Gupta-Efficiency* und der absoluten Differenz nachgewiesen, dass die für die historische Referenzperiode (1971-2000) berechnete Netto-Grundwasserneubildung für die einzelnen Klimamodelle im Vergleich zu den Netto-Grundwasserneubildungswerten, die auf der Grundlage beobachteter Klimadaten berechnet wurden, einen hinlänglich geringen Bias aufweist. Somit ist davon auszugehen, dass die zukünftigen Teile der Klimamodelle für eine Analyse des Einflusses des Klimawandels in Schleswig-Holstein geeignet sind.

Die für diese Studie relevanten Ergebnisse sind insbesondere die Veränderungen der modellierten Netto-Grundwasserneubildung für jedes Klimamodell über die drei Auswertungszeiträume (2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100), die sich gegenüber der modellierten Netto-Grundwasserneubildung für 1971-2100 anhand des historischen Teils der entsprechenden Klimamodelle ergeben. Um Abschätzungen zur Entwicklung der Netto-Grundwasserneubildung unter den Bedingungen des Klimawandels zu gewinnen, wurden die Änderungen der modellierten Netto-Grundwasserneubildung für jedes Klimamodell zu den Ergebnissen der Netto-Grundwasserneubildung addiert bzw. subtrahiert, die durch die beobachteten historischen klimatischen Inputs im Teil 1 dieses Berichts gewonnen wurden.

Bei den 11 RCP2.6-Klimamodellen zeigen die meisten Klimamodelle verhältnismäßig geringe Veränderungen der mittleren jährlichen Netto-Grundwasserneubildung, wobei das erste und dritte Quartil bei allen drei ausgewerteten Zeiträumen zwischen -20 mm/a und +20 mm/a liegt.

Bei den 12 RCP4.5-Klimamodellen ist eine hohe Konsistenz der Ergebnisse festzustellen, wobei die Mehrheit der Klimamodelle eine Zunahme der Grundwasserneubildung angibt (mediane Veränderungen zwischen 14 mm/a und 17 mm/a für die drei Zeiträume). Für die 21 RCP8.5-Klimamodelle sind die medianen jährlichen Veränderungen ebenfalls positiv (zwischen 7 mm/a und 11 mm/a). Die Bandbreite der Ergebnisse nimmt dabei für den Zeitraum 2071-2100 erheblich zu (von -41 mm/a bis +93 mm/a). Für alle drei RCP-Szenarien ist der allgemeine Anstieg der jährlichen Netto-Grundwasserneubildung meistens auf eine Zunahme in den Wintermonaten zurückzuführen.

Um die Belastbarkeit der Ergebnisse der RCP-Szenarien zu bewerten, wurden Robustheitstests durchgeführt. Als „robust“ wurden die Ergebnisse angesehen, wenn zwei Kriterien erfüllt waren:

1. Mindestens 66 % der Modelle müssen in der Richtung der Veränderung (Zu- oder Abnahme) übereinstimmen; und
2. mindestens 66 % der Ensemblemitglieder müssen eine signifikante Änderung in der Verteilung der Jahreswerte aufweisen.

Bei Anwendung dieser Kriterien konnte keine der Änderungen der Grundwasserneubildung in einem der 30-Jahres-Zeiträume (2011-2040, 2041-2070 oder 2071-2100) für irgendeines der drei RCP-Szenarien als robust betrachtet werden. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass für keines der RCP-Szenarien mit Sicherheit gesagt werden kann, dass die Grundwasserneubildung zunehmen oder abnehmen wird.

Als weitere Methode zur Quantifizierung der zu erwartenden klimawandelbedingten Veränderungen in der Grundwasserneubildung wurde das Konzept der „klimatischen Leitplanken“ umgesetzt, welches die Bandbreite vom 15. Perzentil bis zum 85. Perzentil der Ergebnisse umfasst. Die Spannweite der „klimatischen Leitplanken“, die mit gleitenden 30-jährigen Mittelwerten berechnet wurden, erstreckt sich in den meisten Jahren sowohl in den positiven als auch in den negativen Bereich. Je höher das Emissionsszenario ist, desto stärker weichen die Unter- und Obergrenzen der „klimatischen Leitplanken“ im Laufe des Jahrhunderts voneinander ab.

Als Kernergebnis der Studie sind in der folgenden Tabelle die Mediane (50 %) und die „klimatischen Leitplanken“ (15 % und 85 %) der mittleren jährlichen Netto-Grundwasserneubildung für die drei Auswertungszeiträume noch einmal dargestellt. Bei dem ersten Wert (in mm/a) in jeder Zelle handelt es sich um den Absolutwert der Grundwasserneubildung, während der Wert in Klammern (ebenfalls in mm/a) die Veränderung gegenüber dem Referenzzeitraum angibt.

Zeitraum	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	15 %	50 %	85 %	15 %	50 %	85 %	15 %	50 %	85 %
2011-2040	140 (-10)	156 (+6)	176 (+26)	152 (+2)	164 (+14)	186 (+36)	144 (-6)	156 (+6)	177 (+27)
2041-2070	119 (-31)	150 (0)	159 (+9)	142 (-8)	165 (+15)	185 (+35)	136 (-14)	159 (+9)	180 (+30)
2071-2100	128 (-22)	147 (-3)	160 (+10)	147 (-3)	160 (+10)	195 (+45)	134 (-16)	160 (+10)	213 (+63)

Das Konzept der „klimatischen Leitplanken“ wurde auch angewandt, um die wahrscheinlichen Veränderungen der Netto-Grundwasserneubildung auf verschiedenen räumlichen Skalen zu bewerten, nämlich für die Planungseinheiten nach EU-WRRL, die Kreise und kreisfreien Städte sowie für die hydrogeologischen Teilräume.

Auf der räumlichen Ebene der Planungseinheiten zeigen die RCP2.6-Szenarien für den Median (50 %) minimale Veränderungen für alle Zeiträume. Für das 15. Perzentil ist die Verringerung der Grundwasserneubildung im Nordwesten am stärksten, während für das 85. Perzentil die Zunahme im Zeitraum 2011-2040 nur im Westen erheblich ist. Für die RCP4.5-Szenarien deutet der Median auf einen Anstieg der Grundwasserneubildung hin. Für das 15. Perzentil ist eine Verringerung der Grundwasserneubildung nur im Nordwesten festzustellen,

während für das 85. Perzentil die Zunahmen überall relativ einheitlich sind. Im Östlichen Hügelland, wo die Referenzwerte am niedrigsten sind, ist auch die Zunahme der Grundwasserneubildung am geringsten. Bei den RCP8.5-Szenarien werden die räumlichen Unterschiede zwischen den Planungseinheiten deutlicher, insbesondere beim Median und beim 15. Perzentil.

Betrachtet man die Klimaprojektionen auf der räumlichen Skala der Kreise und kreisfreien Städte, so sind die Veränderungen beim RCP2.6-Szenario für den Median bis zum letzten Auswertungszeitraum recht homogen, wobei ein Ost-West-Gefälle der erwarteten Veränderungen zu erkennen ist. Bei Betrachtung des 15. Perzentils findet die größte Verringerung der Grundwasserneubildung entlang der Westküste statt, und beim 85. Perzentil treten die höchsten Zunahmen in den zentral gelegenen Kreisen im Zeitraum 2011-2040 auf. Für das RCP4.5-Szenario gelten diese Muster ebenso, allerdings mit allgemein höheren Werten für die Veränderungen der Grundwasserneubildung. Das Auftreten allgemein höherer Werte für die Grundwasserneubildungsänderung liegt darin begründet, dass beim RCP4.5-Szenario die höchste mediane Zunahme der Grundwasserneubildung vorherrscht. Für das RCP8.5-Szenario ergibt sich eine größere Veränderung der relativen räumlichen Muster von einer Periode zur nächsten. Auch hier ist die Variabilität der erwarteten Veränderungen in den westlichen Regionen hoch.

Die Eingaben für das mGROWA-Modell werden stark von den hydrogeologischen Bedingungen beeinflusst. Bei Betrachtung der hydrogeologischen Teilräume zeigt sich daher eine wesentlich größere räumliche Differenzierung der Netto-Grundwasserneubildungsraten als bei den Planungseinheiten oder den Kreisen und kreisfreien Städten. Bei dem RCP2.6-Szenario sind die im 15. Perzentil gezeigten Abnahmen stärker um die Gebiete mit Grundwasserbeeinflussung konzentriert, während die größten Zunahmen im 85. Perzentil in den Gebieten liegen, die weder oberflächennahes Grundwasser noch bindige Deckschichten aufweisen. Dieser Effekt ist bei der Darstellung des RCP4.5-Szenarios noch ausgeprägter, da im Zeitraum 2071-2100, der die höchsten potenziellen Evapotranspirationsraten aufweist, sowohl das 15. Perzentil als auch der Median einige Gebiete mit einer Zunahme und einige mit einer Abnahme der Grundwasserneubildung zeigen. Dies liegt daran, dass die mit dem Klimawandel verbundenen höheren Temperaturen und die dadurch bedingte höhere potenzielle Evapotranspiration einen größeren Einfluss auf die dem Grundwasser durch Transpirationsprozesse entzogenen Wassermengen haben. Für das RCP8.5-Szenario zeigt der Median dieselbe hohe Variabilität, die gegen Ende des Jahrhunderts zunimmt. Beim 15. Perzentil wird das Muster größerer Abnahmen der Neubildung im Westen während der späteren Zeiträume sehr deutlich. Bei Betrachtung des 85. Perzentils zeigt sich jedoch ein gleichmäßigerer Anstieg der Grundwasserneubildung.

Die Ergebnisse auf verschiedenen räumlichen Skalen belegen, dass die Entscheidung über die für die Aggregation verwendeten räumlichen Einheiten die gewonnenen Ergebnisse erheblich beeinflussen kann. Aus geowissenschaftlicher Sicht wäre es zielführend, die hydrogeologischen Räume für Entscheidungsprozesse zur Bewirtschaftung des Grundwassers in Schleswig-Holstein zu verwenden.

## Literatur

- Abdalla, E. M. H., Alfredsen, K., Muthanna, T. M. (2022): Towards improving the calibration practice of conceptual hydrological models of extensive green roofs, *Journal of Hydrology*, vol. 607, 127548. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127548>.
- Ad-hoc-AG Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*: [KA 5]; mit 103 Tabellen und 31 Listen. Schweizerbart.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998): Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
- Arias, P. A., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R. G., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M. D., Plattner, G.-K., Rogelj, J. et al., (2021): Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144.
- Arbeitskreis KLIWA (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien. KLIWA-Berichte, Heft 17.
- ATV-DVWK (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. ATV-DVWK-Regelwerk, Merkblatt, M 504. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Germany, 144 pp.
- Barth, C. (2003): Die Wirksamkeit der Kapillarsperre als Deponieoberflächenabdichtung Feldversuche auf der Deponie Bayreuth, Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Baumgartner, A., Liebscher, H.-J. (1996): Lehrbuch der Hydrologie: Band 1: Allgemeine Hydrologie. Gebrüder Bornträger, Berlin Stuttgart, 694 pp.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2020): Das Bayerische Klimaprojektionsensemble – Audit und Ensemblebildung. UmweltSpezial. Augsburg: 55 S. Online verfügbar unter: [https://www.lfu.bayern.de/publikationen/get\\_pdf.htm?art\\_nr=lfu\\_klima\\_00169](https://www.lfu.bayern.de/publikationen/get_pdf.htm?art_nr=lfu_klima_00169)
- Becker, A., Serban, P. (1990): Hydrological Models for Water-Resources System Design and Operation. World Meteorological Organization.
- Beer, A., Fritsche, J.-G., Hübschmann, M., Kärcher, T., Nommensen, B., Reutter, E., Schuster, H., Wagner, B., Zaepke, M. (2016): Regionale Hydrogeologie von Deutschland: die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung. – Geol. Jb. 163: 452 S.; Stuttgart (Schweizerbarth).
- Bogena, H., Kunkel, R., Schöbel, T., Schrey, H.P., Wendland, F. (2003): Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen. Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Umwelt/Environment 37, Forschungszentrum Jülich, Zentralbibliothek, Verlag.
- Bug, J., Heumann, S., Müller, U., Waldeck, A. (2020): GeoBerichte19. Auswertungsmethoden im Bodenschutz. [https://www.lbeg.niedersachsen.de/karten\\_daten/publikationen/publikationen/geoberichte/geoberichte-19-100055.html](https://www.lbeg.niedersachsen.de/karten_daten/publikationen/publikationen/geoberichte/geoberichte-19-100055.html).
- Burbaum, B., Filipinski, M. (2012): Die Böden Schleswig-Holsteins: Entstehung, Verbreitung, Nutzung, Eigenschaften und Gefährdung, *Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und Ländliche Räume Schleswig-Holstein*, Flintbek, Germany, p. 108.
- Chen, D., Rojas, M., Samset, B. H., Cobb, K., Diongue Niang, A., Edwards, P., Emori, S., Faria, S. H., Hawkins, E., Hope, P. et al. (2021): Framing, Context, and Methods. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 147–286, doi:10.1017/9781009157896.003.

- Copernicus Climate Change Service (2021): What is bias correction? Infosheet. <https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2021-01/infosheet7.pdf>
- Dalelane, C. (2021): Die DWD-Referenz-Ensembles und die DWD-Kern-Ensembles, *promet*, Heft 104, 27-29.
- Demuth, S. (1993): Untersuchungen zum Niedrigwasser in West-Europa. Freiburger Schriften zur Hydrologie, 1. Institut für Hydrologie, Universität Freiburg.
- DHI Group (2003): MIKE 11. A Modelling System for Rivers and Channels. User Guide. DHI Software.
- Dietrich, O., Behrendt, A., Wegehenkel, M. (2021): The Water Balance of Wet Grassland Sites with Shallow Water Table Conditions in the North-Eastern German Lowlands in Extreme Dry and Wet Years, *Water*, 13(16), 2259; <https://doi.org/10.3390/w13162259>
- DIN 4049-1 (1994): Deutsches Institut für Normung e.V.: Hydrogeologie Teil 1: Grundbegriffe. DIN-Taschenbuch, 211, Beuth-Verlag; Berlin 1994, S. 210-212.
- DIN 4049-3 (1994): Deutsches Institut für Normung e.V.: Hydrogeologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. DIN-Taschenbuch, 211, Beuth-Verlag; Berlin 1994, S. 242ff.
- Disse, M. (1995): Modellierung der Verdunstung und der Grundwasserneubildung in Ebenen Einzugsgebieten. Ph.D. Thesis, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany.
- Dommermuth, H., Trampf, H. (1991): Die Verdunstung in der Bundesrepublik 1951 bis 1980, Teile 1 - 3. Deutscher Wetterdienst, Eigenverlag, Offenbach.
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M., Cerezo-Mota, R., Cherchi, A., Gan, T. Y., Gergis, J. et al. (2021): Water Cycle Changes. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1055–1210, doi:10.1017/9781009157896.010.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft. Wirtschafts- und Verlags-Gesellschaft Gas Wasser, Bonn, Germany.
- DWD (2018): Monatliche Raster der Summe der potentiellen Evapotranspiration über Gras.
- DWD (2020): Grids of monthly total precipitation over Germany, version v1.0.
- DWD (2021): Klimavorhersagen und Klimaprojektionen; Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 36 Seiten
- DWD (2023a): Liste der Klimaprojektionen (DWD-Referenz-Ensembles v2018). [https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimaprojektionen/referenz-ensemble\\_tabelle.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimaprojektionen/referenz-ensemble_tabelle.html)
- DWD (2023b): Datensätze auf der Basis der RCP – Szenarien. [https://www.dwd.de/DE/forschung/klima\\_umwelt/klimaprojektionen/fuer\\_deutschland/fuer\\_dtsl\\_rcp-datensatz\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtsl_rcp-datensatz_node.html)
- Ehlers, L., Herrmann, F., Blaschek, M., Duttmann, R., Wendland, F., (2016): Sensitivity of mGROWA-simulated groundwater recharge to changes in soil and land use parameters in a Mediterranean environment and conclusions in view of ensemble-based climate impact simulations. *Science of The Total Environment*, 543: 937-951. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.122.
- Engel, N., Müller, U., Schäfer, W. (2012): BOWAB - Ein Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell. - *GeoBerichte - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie*, 20: 85-98.
- EURO-CORDEX (2018): EURO-CORDEX - Coordinated Downscaling Experiment - European Domain. <https://euro-cordex.net/index.php.en>.
- Finch, J. W. (2007): Empirical factors for estimating open-water evaporation from potential evaporation, *Water and Environment Journal*, vol. 17, Iss. 1, pp. 51-53. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2003.tb00431.x>
- Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., Gолledge, N. R., Hemer, M., Kopp, R. E., Krinner, G. et al. (2021): Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. et al. (eds.)].

- Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211–1362, doi:10.1017/9781009157896.011.
- Friedlingstein, P., Meinshausen, M., Arora, V. K., Jones, C. D., Anav, A., Liddicoat, S. K., Knutti, R. (2014): Uncertainties in CMIP5 Climate Projections due to Carbon Cycle Feedbacks, *Journal of Climate*, 27 (2), pp. 511-526. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00579.1>
- Giorgi, F. (2010): Uncertainties in climate change projections, from the global to the regional scale, *EPJ Web of Conferences*, 9, 115–129.
- Giorgi, F. (2019): Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 5696–5723.
- Golf, W. (1981): Ermittlung der Wasserressourcen im Mittelgebirge. *Wasserwirtsch-Wassertech* 31:93–95.
- Grinsted, A., Jevrejeva, S., Riva, R. E. M., Dahl-Jensen, D. (2015): Sea level rise projections for northern Europe under RCP8.5. *Climate Research*, vol. 64, 15–23.
- Groh, J., Putz, T., Vanderborght, J., Vereecken, H. (2015): Estimation of evapotranspiration and crop coefficient of an intensively managed grassland ecosystem with lysimeter measurements, 16. Gumpensteiner Lysimetertagung 2015, 107 – 112, ISBN 13: 978-3-902849-19-9
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., Martinez, G. F. (2009): Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *Journal of Hydrology*, vol. 377, Iss. 1-2, pp. 80-91.
- Habel, S., Fletcher, C. H., Barbee, M. M., Fornace, K. L. (2024): Hidden Threat: The Influence of Sea-Level Rise on Coastal Groundwater and the Convergence of Impacts on Municipal Infrastructure, *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 16:81–103.
- Haberlandt, U., Klöcking, B., Krysanova, V., Becker, A. (2001): Regionalisation of the base flow index from dynamically simulated flow components - a case study in the Elbe River Basin. *Journal of Hydrology*, 248, 35-53. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00391-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00391-2)
- Hargreaves, G. H., Samani, Z. A. (1985): Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), pp. 96-99.
- Hatterman, F. F., Post, J., Krysanova, V., Conrath, T., Wechsung, F. (2008): Assessment of Water Availability in a Central European River Basin (Elbe) Under Climate Change, *Advances in Climate Change Research*, 4 (Suppl.): 42-50.
- Hausfather, Z., & Peters, G. (2020): Emissions - The 'business as usual' story is misleading. *Nature*, 577, 618–620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>.
- Hennemuth, B., Benestad, R., Buonomo, E., Gutiérrez, J. M., Haensler, A., Illy, T., Jacob, D., Keup-Thiel, E., Katragkou, E., Kotlarski, S., et al. (2021): Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use. Version 1.1 - 2021.02., [https://euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex/guidance\\_for\\_euro-cordex\\_climate\\_projections\\_data\\_use\\_\\_2021-02\\_1\\_.pdf](https://euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex/guidance_for_euro-cordex_climate_projections_data_use__2021-02_1_.pdf)
- Herrmann, F., Chen, S., Heidt, L., Elbracht, J., Engel, N., Kunkel, R., Müller, U., Röhm, H., Vereecken, H., Wendland, F. (2013): Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Model mGROWA. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 57(5): 206-224.
- Herrmann, F., Wendland, F., Hübsch, L., Müller, U. (2014a): Auswirkung von möglichen Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung in der Metropolregion Hamburg. *energie | wasser-praxis*. 6/2014: S. 34f.
- Herrmann, F., Chen, S., Kunkel, R., Wendland, F. (2014b): Auswirkungen von Klimaänderungen auf das nachhaltig bewirtschaftbare Grundwasserdargebot und den Bodenwasserhaushalt in Nordrhein-Westfalen. Bericht. [https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/auswirkungen\\_klimaaenderungen\\_auf\\_grundwasserdargebot\\_und\\_bodenwasserhaushalt\\_nrw.pdf](https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/auswirkungen_klimaaenderungen_auf_grundwasserdargebot_und_bodenwasserhaushalt_nrw.pdf)
- Herrmann, F., Keller, L., Kunkel, R., Vereecken, H., Wendland, F. (2015): Determination of spatially differentiated water balance components including groundwater recharge on the Federal State level – A case study using the mGROWA model in North Rhine-Westphalia (Germany). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 294-312. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.018>
- Herrmann, F., Baghdadi, N., Blaschek, M., Deidda, R., Duttmann, R., La Jeunesse, I., Sellami, H., Vereecken, H., Wendland, F. (2016a): Simulation of future groundwater recharge using a climate model

- ensemble and SAR-image based soil parameter distributions — A case study in an intensively-used Mediterranean catchment. *Science of The Total Environment*, 543: 889-905. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.036.
- Herrmann, F., Kunkel, R., Ostermann, U., Vereecken, H., Wendland, F. (2016b): Projected impact of climate change on irrigation needs and groundwater resources in the metropolitan area of Hamburg (Germany). *Environ Earth Sci*, 75:1104 DOI: 10.1007/s12665-016-5904-y.
- Herrmann, F., Hübsch, L., Elbracht, J., Engel, N., Keller, L., Kunkel, R., Müller, U., Röhm, H., Vereecken, H., Wendland, F. (2017a): Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 61. 2017, H.4, 244-260.
- Herrmann, F., Andjelov, M., Bertalaníč, R., Dolinar, M., Frantar, P., Uhan, J., Wendland, F. (2017b): Links between the presence of snowpacks and groundwater recharge – Simulation results for the territory of Slovenia. 44. IAH Congress Dubrovnik.
- Herrmann, F., Wolters, T., Wendland, F. (2021): Projektionen der Grundwasserneubildung unter dem Einfluss des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA und dem Regionalen Klimaprojektionen Ensemble (ReKliEs) für Deutschland – LANUV Fachbericht 110. Kooperationsprojekt GROWA+ 2021 - Teil IX. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV). Recklinghausen. [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3\\_fachberichte/30110j.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30110j.pdf)
- Hiscock, K., Sparkes, R., Hodgson, A. (2011): Evaluation of future climate change impacts on European groundwater resources, In: *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations*, [Treidel, H., Martin-Bordes, J. L., Gurdak J. J. (eds.)]. CRC Press.
- Hübener, H., Hoffmann, P., Keuler, K., Pfeifer, S., Ramthun, H., Spekat, A., Steger, C., Warrach-Sagi, K. (2017a): Deriving user-informed climate information from climate model ensemble results, *Advances in Science and Research*, vol. 14, 261-269.
- Hübener, H., Bülow, K., Fooker, C., Früh, B., Hoffmann, P., Höpp, S., Keuler, K., Menz, C., Mohr, V., Radtke, K., et al. (2017b): ReKliEs-De Ergebnisbericht, <https://reklies.hlnug.de/fileadmin/tmp/reklies/dokumente/ReKliEs-De-Ergebnisbericht.pdf>.
- Hyndman, R. J., Fan, Y. (1996): Sample Quantiles in Statistical Packages, *The American Statistician*, Vol. 50, No. 4, pp. 361-365.
- Huber, W., Dickinson, R. (1988): Storm Water Management Model, Version 4: Users Manual, EPA600/3-88/001a. Environmental Research Laboratory, EPA, Athens, Georgia.
- IPCC (2013a): Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections [van Oldenborgh, G.J., M. Collins, J. Arblaster, J.H. Christensen, J. Marotzke, S.B. Power, M. Rummukainen and T. Zhou (eds.)]. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2013b): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., et al. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research, *Regional Environmental Change*, vol 14, pp 563–578.
- Jarvis, N., Koestel, J., Larsbo, M. (2016): Understanding Preferential Flow in the Vadose Zone: Recent Advances and Future Prospects. *Vadose Zone Journal*, vol. 15, Iss. 12, pp. 1-11. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.09.0075>
- Jing, M., Kumar, R., Heße, F., Thober, S., Rakovec, O., Samaniego, L., Attinger, S. (2020): Assessing the response of groundwater quantity and travel time distribution to 1.5, 2, and 3 °C global warming in a mesoscale central German basin, *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 1511–1526.
- Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M. (2012): Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios, *Journal of Hydrology*, 424–425, 264–277.

- Knoben, W. J., Freer, J. E., Woods, R. A. (2019): Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23, pp. 4323–4331.
- Köthe, R. (2007): Kurzdokumentation morphometrische Reliefparameter für das Testgebiet TK 25 1523/1524/1623/1624, Erstellt für das LLUR Schleswig-Holstein, Abt. Geologie und Boden.- Projektbericht sciLands, Göttingen, 13 S.
- Kreienkamp, F., Spekat, A., Hoffmann, P. (2017): Empirisch-Statistisches Downscaling – Eine Übersicht ausgewählter Methoden, *promet*, Heft 99, 20–28.
- Kumar, R., Samaniego, L., Thober, S., Rakovec, O., Marx, A., Wanders, N., Pan, M., Hesse, F., Attinger, S. (2024). Multi-model assessment of groundwater recharge across Europe under warming climate, *Manuskript eingereicht bei Earth's Future*.
- Kunkel, R. Wendland, F. (2002): The GROWA98 model for water balance analysis in large river basins—the river Elbe case study. *Journal of Hydrology*, 259, 152–162. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00579-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00579-0).
- Kunkel, R., Wendland, F. (2020): Einbeziehung mächtiger bindiger Deckschichten bei der Modellierung des Eintrags von Nitrat in den Hauptgrundwasserleiter. Projektbericht, 17 Seiten, unveröffentlicht
- Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (LANU) (2002): Nutzbares Grundwasserangebot in Südost-Holstein, ISBN 3-923339-79-8.
- Linke, C., Kreienkamp, F., Früh, B., Kotlarski, S., Olefs, M., Schausser, I., Schinko, T., Schwierz, C., Walter, A., Zimmer, M. (2024): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam, März 2024.
- Löpmeier, F.J. (1994): The calculation of soil moisture and evapotranspiration with agrometeorological models. *Zeitschrift fuer Bewaesserungswirtschaft*.
- Mann, H., Whitney, D. (1947): On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other, *Annals of Mathematical Statistics*, 18, S. 50–60.
- McNamara, I., Baez-Villanueva, O. M., Zomorodian, A., Ayyad, S., Zambrano-Bigiarini, M., Zaroug, M., Mersha, A., Nauditt, A., Mbuliro, M., Wamala, S., Ribbe, L. (2021): How well do gridded precipitation and actual evapotranspiration products represent the key water balance components in the Nile Basin?, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 37, 100884. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100884>.
- McNamara, I., Flörke, M., Uschan, T., Baez-Villanueva, O. Herrmann, F. (2024): Estimates of irrigation requirements throughout Germany under varying climatic conditions. *Agricultural Water Management*. Vol. 291, 108641. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108641>.
- Milinski, S., Maher, N., Olonscheck, D. (2020): How large does a large ensemble need to be?, *Earth System Dynamics*, Vol. 11, Iss. 4, pp. 885–901.
- Monteith, J. L. (1965): Evaporation and environment. In: Fogg, G.E. (Ed.), *Symposium of the Society for Experimental Biology. The State and Movement of Water in Living Organisms*, pp. 205–234.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R. et al. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, vol. 463, pp. 747–756.
- Müller, U. (2004): Auswertungsmethoden im Bodenschutz. Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). Arb.-H. Boden 2004/2, 1-409.
- Müller, U., Waldeck, A. (2011): Auswertungsmethoden im Bodenschutz. GeoBerichte, 19. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970): River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Neukum, C., Azzam, R. (2012): Impact of climate change on groundwater recharge in a small catchment in the Black Forest, Germany, *Hydrogeology Journal*, vol. 20, pp. 547–560.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti R., Kriegler, E., Lamarque, J., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., Sanderson, B. M. (2016): The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geoscientific Model Development*, 9, 3461–3482.

- Palmer, T. E., Booth, B. B. B., McSweeney, C. F. (2021): How does the CMIP6 ensemble change the picture for European climate projections? *Environmental Research Letters*, 16, 094042. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1ed9>.
- Pendergrass, A. G., Knutti, R., Lehner, F., Deser, C., Sanderson, B. M. (2017): Precipitation variability increases in a warmer climate. *Scientific Reports*, 7, 17966. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17966-y>.
- Peschke, G. (1997): Der komplexe Prozess der Grundwasserneubildung und Methoden zu ihrer Bestimmung. Freiburger Schriften zur Hydrologie. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg, Freiburg i.Br., Germany.
- Pfeifer, S., Bülow, K., Gobiet, A., Hänslar, A., Mudelsee, M., Otto, J., Rechid, D., Teichmann, C., Jacob, D. (2015): Robustness of Ensemble Climate Projections Analyzed with Climate Signal Maps: Seasonal and Extreme Precipitation for Germany, *Atmosphere*, 6(5), 677-698.
- Renger, M., Wessolek, G. (1990): Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Nutzungsänderungen auf die Grundwasserneubildung. – Mit. Inst. für Wasserwesen, Univ. der Bundeswehr München, 386: 295-307.
- Renger, M., Bohne, K., Facklam, M., Harrach, T., Riek, W., Schäfer, W., Wessolek, G., Zacharias, S. (2009): Boden-physikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. In: Wessolek G, Kaupenjohann M, Renger M, editors. 40. Technische Universität Berlin - Fachgebiet Bodenkunde/Standortkunde und Bodenschutz - Institut für Ökologie.
- Ritchie, J. & Dowlatabadi, H. (2017): Why do climate change scenarios return to coal? *Energy*, vol. 140, 1, pp. 1276-1291. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.083>
- Schindler, U., Thiere, J., Steidl, J., Müller, L. (2004): Bodenhydrologische Kennwerte heterogener Flächeneinheiten - Methodik der Ableitung und Anwendungsbeispiel für Nordostdeutschland. 87. Landesumweltamt Brandenburg (LUA).
- Schmidli, J., Frei, C., Vidale, P. L. (2006): Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *Int. J. Climatol.*, 26, 679–689.
- Schwalm, C. R., Glendon, S. & Duffy, P. B. (2020): RCP8.5 tracks cumulative CO<sub>2</sub> emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 117 (33): 19656– 19657. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117>.
- Schwarze, R., Herrmann, A., Münch, A., Grünwald, U., Schöne, M. (1991): Rechnergestützte Analyse von Abflußkomponenten und Verweilzeiten in kleinen Einzugsgebieten. *Acta hydrophys.* (2): 143-184.
- Schwärzel K, Šimůnek J, Stoffregen H, Wessolek G, van Genuchten M. T. (2006): Estimation of the Unsaturated Hydraulic Conductivity of Peat Soils. *Vadose Zone Journal*, 5: 628. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0061>.
- Shepard, D. (1968): A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. Proceedings - 1968 ACM National Conference.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B., Berntsen, T., Bindoff, N. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J. M., Hegerl, G. C., et al. (2007): Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Steger, C. (2024): Stand und Pläne in CMIP7 und CORDEX, DWD Nutzerworkshop 2024, 23. April.
- Taylor, K. E. (2001): Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, Iss. D7, pp. 7183-7192.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J. & Meehl, G. A. (2012): An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 93, Iss. 4. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Tazioli, A. (2011): Experimental methods for river discharge measurements: comparison among tracers and current meter, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 56, Iss. 7. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.607822>.
- Tetzlaff, B., Kuhr, P. (2011): Kartographische Erfassung potenziell gedränkter Flächen in Schleswig-Holstein. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

- Tetzlaff, B., Keller, L., Kuhr, P., Kreins, P., Kunkel, R., Wendland, F. (2017): Räumlich differenzierte Quantifizierung der Nährstoffeinträge ins Grundwasser und in die Oberflächengewässer Schleswig-Holsteins unter Anwendung der Modellkombination RAUMIS-GROWA-WEKU-MEPHOS. Endbericht zum Forschungsprojekt
- Tetzlaff, B., Kunkel, R., Ta, P., Wolters, T., Wendland, F. (2023): Modellierung der Nährstoffeinträge ins Grundwasser und die Oberflächengewässer Hessens mit regionaler und eintragungspfadbezogener Differenzierung. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). Forschungszentrum Jülich. Jülich (Bericht eingereicht zur Publikation)
- Tetzlaff, B., Hettler, W., Kunkel, R., Ta, P., Weber, M., Wendland, F. (2024): Weiterentwicklung von Modellansätzen zur optimierten Simulation von Nährstoffeinträgen in die Oberflächengewässer Schleswig-Holsteins.- Forschungsauftrag des Ministeriums für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein (MEKUN) - Laufzeit 01/2020 – 12/2023.- Endbericht, Jülich, 399 S.
- Teutschbein, C., Seibert, J. (2012): Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, vol. 456–457, pp. 12–29.
- Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., De Roo, A. (2012): Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin, *Journal of Hydrology*, vol. 499, pp. 324–338. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.012>.
- Touzé-Peiffer, L., Barberousse, A., Le Treut, H. (2020): The Coupled Model Intercomparison Project: History, uses, and structural effects on climate research. *WIREs Climate Change*, vol. 11, Iss. 4.
- Towner, J., Cloke, H. L., Zsoter, E., Flamig, Z., Hoch, J. M., Bazo, J., de Perez, E. C., Stephens, E. M. (2019): Assessing the performance of global hydrological models for capturing peak river flows in the Amazon basin, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 23, Iss. 7. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3057-2019>.
- Tröltzsch, J., Stein, U., Vidaurre, R., Bueb, B., Schmitt, H., Flörke, M., Herrmann, F., Wrieger-Bechtold, A. (2021): Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit - Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland. In: *WasserWirtschaft* 11/2021, pp. 44–48, Springer Professional.
- US Department of Agriculture (USDA) (2024): Basics of Global Climate Models, Available at: <https://www.climatehubs.usda.gov/hubs/northwest/topic/basics-global-climate-models>
- US Soil Conservation Service (1972): SCS National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology.
- van Genuchten, M. T. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44 (5), 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G., van Genuchten, M. T. (2010): Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten-Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. *Vadose Zone Journal*, 9(4): 795–820. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0045>
- Wendland, F., Kreins, P., Kuhr, P., Kunkel, R., Tetzlaff, B., Vereecken, H. (2010): Räumlich differenzierte Quantifizierung der N- und P-Einträge in Grundwasser und Oberflächengewässer in Nordrhein-Westfalen unter besonderer Berücksichtigung diffuser landwirtschaftlicher Quellen. Schriften des Forschungszentrums Jülicher Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, 88.
- Wendland, F., Herrmann, F., Kunkel, R., Ta, P., Tetzlaff, B., Wolters, T. (2021): Quantifizierung der Stickstoff- und Phosphoreinträge ins Grundwasser und in die Oberflächengewässer in Rheinland-Pfalz mit eintragungspfadbezogener und regionaler Differenzierung. In *Nährstoffmodellierung Rheinland-Pfalz - Projektteil Wasserwirtschaft*. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität (MKUEM). Mainz. 226 S.
- Wendling, U., Schellin, H.-G., Thoma, M. (1991): Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. – *Z. Meteorol.*, 34: 82–85
- Wessolek, G., Facklam, M., (1997): Standorteigenschaften und Wasserhaushalt von versiegelten Flächen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 160 (1), 41–46. <https://doi.org/10.1002/jpln.19971600109>
- Wi, S., Steinschneider, S. (2022): Assessing the Physical Realism of Deep Learning Hydrologic Model Projections Under Climate Change, *Water Resources Research*, Vol. 58, Iss. 9, <https://doi.org/10.1029/2022WR032123>.
- Wilcoxon, F. (1945): Individual Comparisons by Ranking Methods, *Biometrics Bulletin*, 1, pp. 80–83.

- Wohland, J. (2022), Process-based climate change assessment for European winds using EURO-CORDEX and global models, *Environmental Research Letters*, 17 (12).
- Wolters, T., Wendland, F. (2021): Berechnung der Grundwasserneubildung für klimarelevante Zeitperioden mit mGROWA18. Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA). Forschungszentrum Jülich. Jülich.
- Wolters, T., Ta, P., Tetzlaff, B., Wendland, F. (2022): Fortführung und Weiterentwicklung der Nährstoffmodellierung Sachsen-Anhalt. Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW). Magdeburg. 231 S.
- Wolters, T., McNamara, I., Tetzlaff, B., Wendland, F. (2023): Germany-Wide High-Resolution Water Balance Modelling to Characterise Runoff Components as Input Pathways for the Analysis of Nutrient Fluxes. *Water*, 15, 3468. <https://doi.org/10.3390/w15193468>.
- World Meteorological Organization (2017): WMO guidelines on the calculation of climate normals.
- Wundt, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. In: Grahmann, R., Wundt, W. (Eds.), *Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung*. Verlag der Bundesanstalt für Landeskunde, Remagen, Germany, pp. 47-54.
- Wunsch, A., Liesch, T., Broda, S. (2022): Deep learning shows declining groundwater levels in Germany until 2100 due to climate change, *Nature Communications*, 13, 1221.
- Zinnbauer, M., Eysholdt, E., Henseler, M., Herrmann, F., Kreins, P., Kunkel, R., Nguyen, H., Tetzlaff, B., Venohr, M., Wolters, T., and Wendland, F. (2023): Quantifizierung aktueller und zukünftiger Nährstoffeinträge und Handlungsbedarfe für ein deutschlandweites Nährstoffmanagement - AGRUM-DE, in *Thünen-Report. 2023*, Johann Heinrich von Thünen-Institut: Braunschweig. [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn066338.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn066338.pdf).

# Appendix A: Eingaben und Ausgaben für 1971-2000 und 1981-2010

## Niederschlag

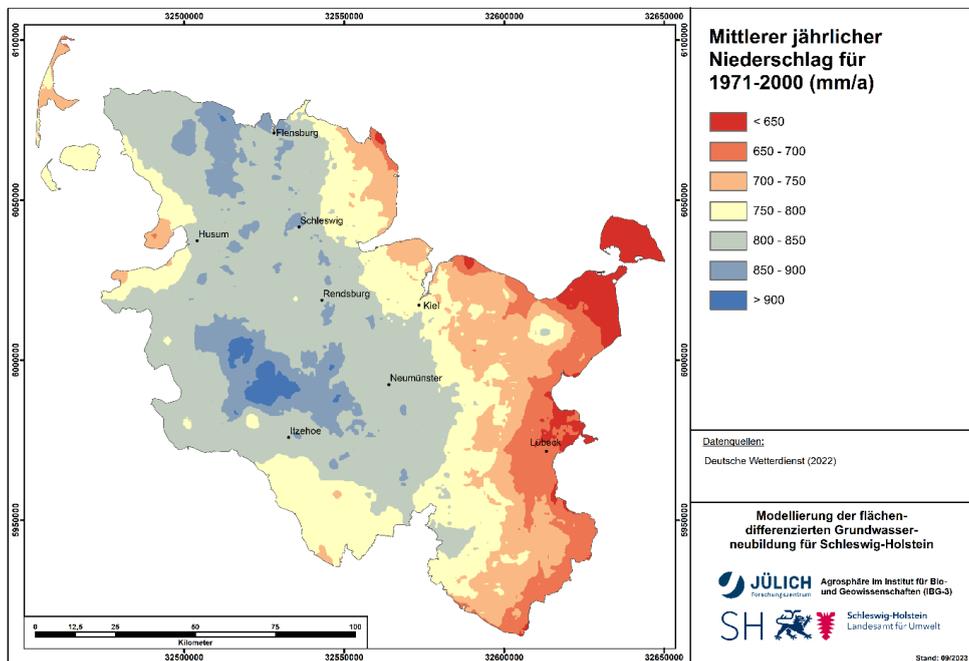


Abbildung A-1: Mittlere Jahresniederschlagshöhen für die Periode 1971 bis 2000.

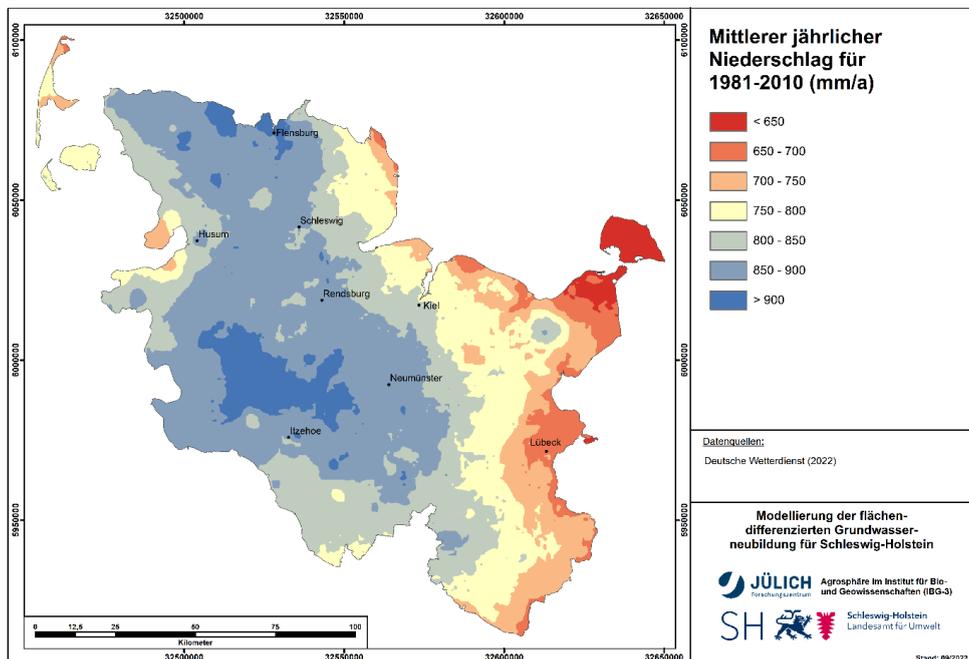


Abbildung A-2: Mittlere Jahresniederschlagshöhen für die Periode 1981 bis 2010.

### Potenzielle Evapotranspiration

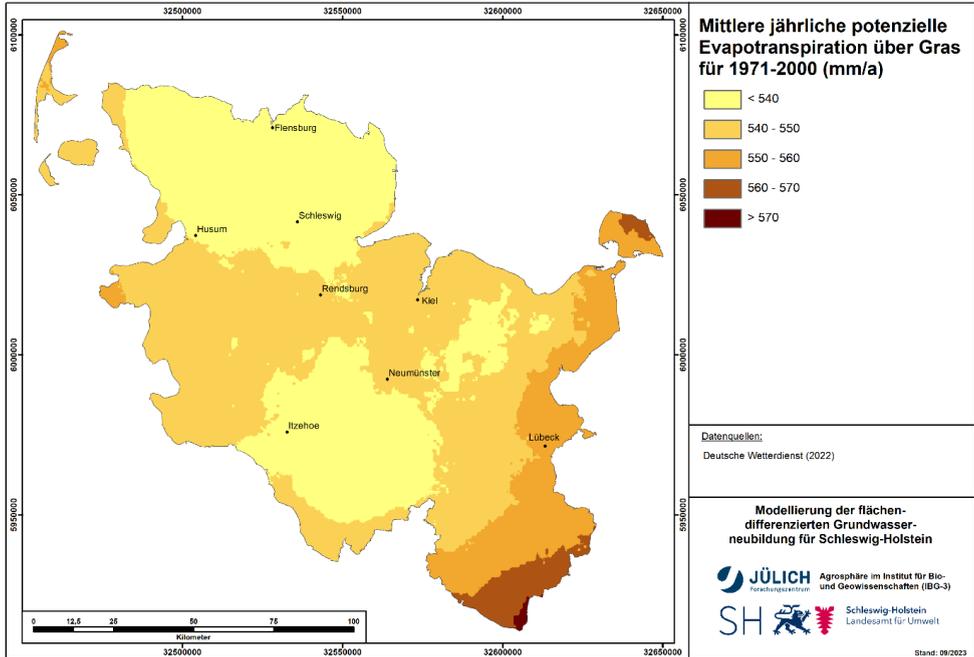


Abbildung A-3: Mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration (1971-2000).

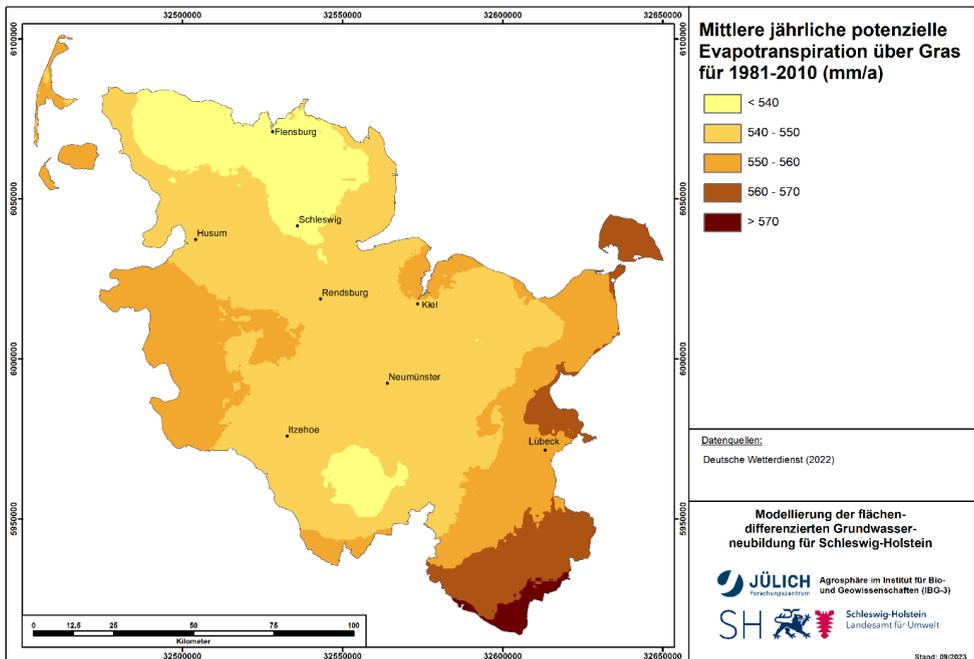


Abbildung A-4: Mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration (1981-2010).

## Tatsächliche Evapotranspiration

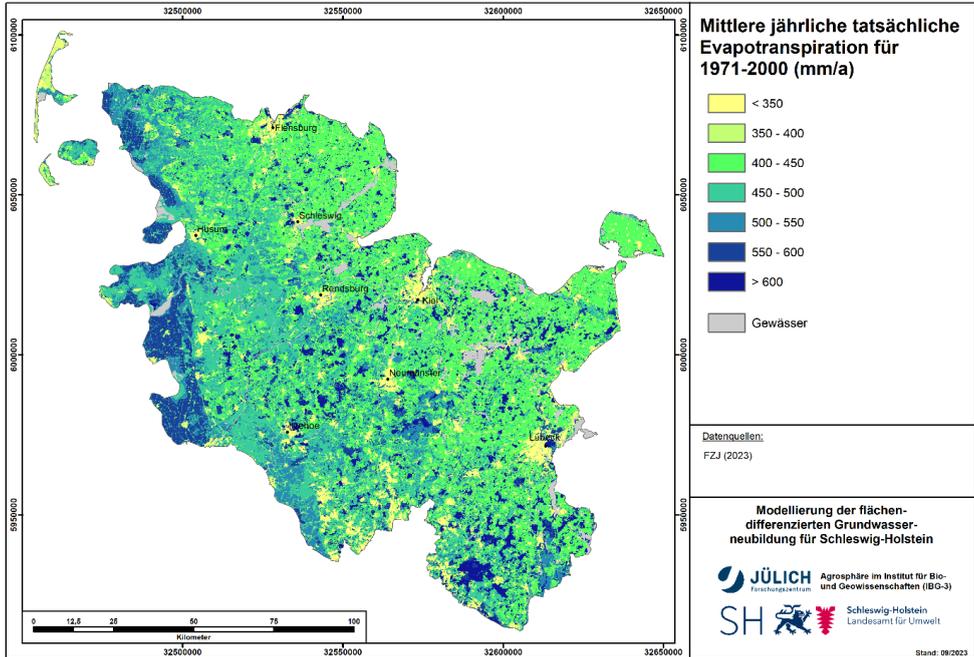


Abbildung A-5: Mittlere jährliche tatsächliche Evapotranspiration (1971-2000).

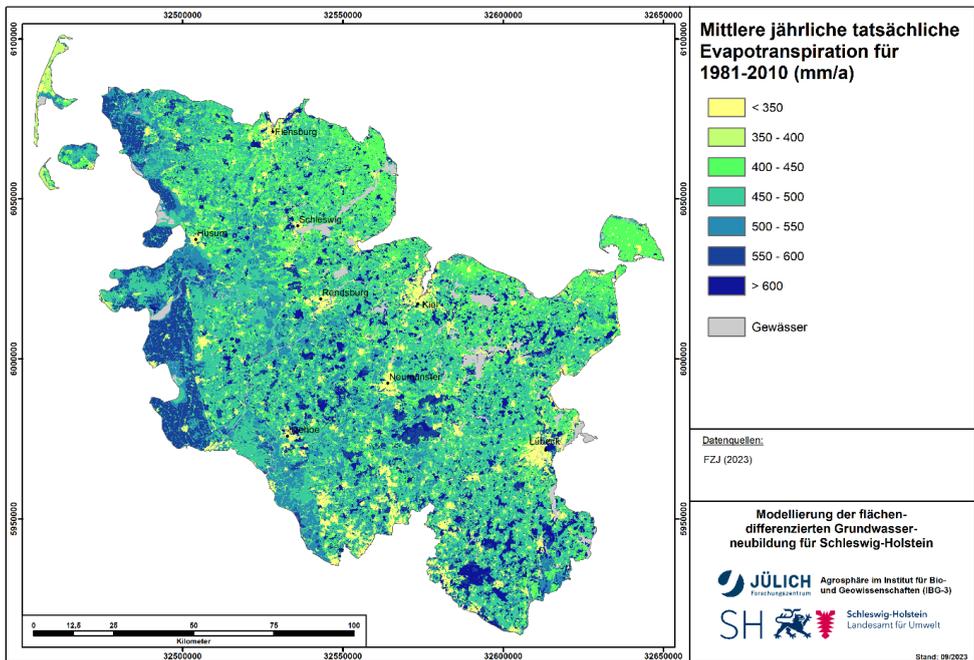


Abbildung A-6: Mittlere jährliche tatsächliche Evapotranspiration (1981-2010).

**Netto-Gesamtabfluss**

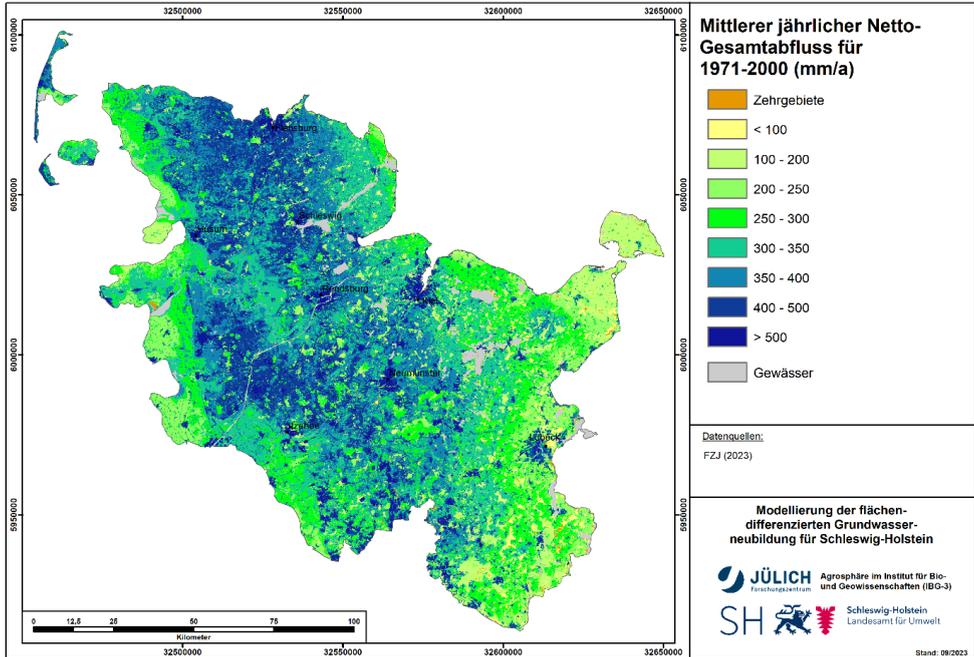


Abbildung A-7: Mittlerer jährlicher Netto-Gesamtabfluss (1971-2000).

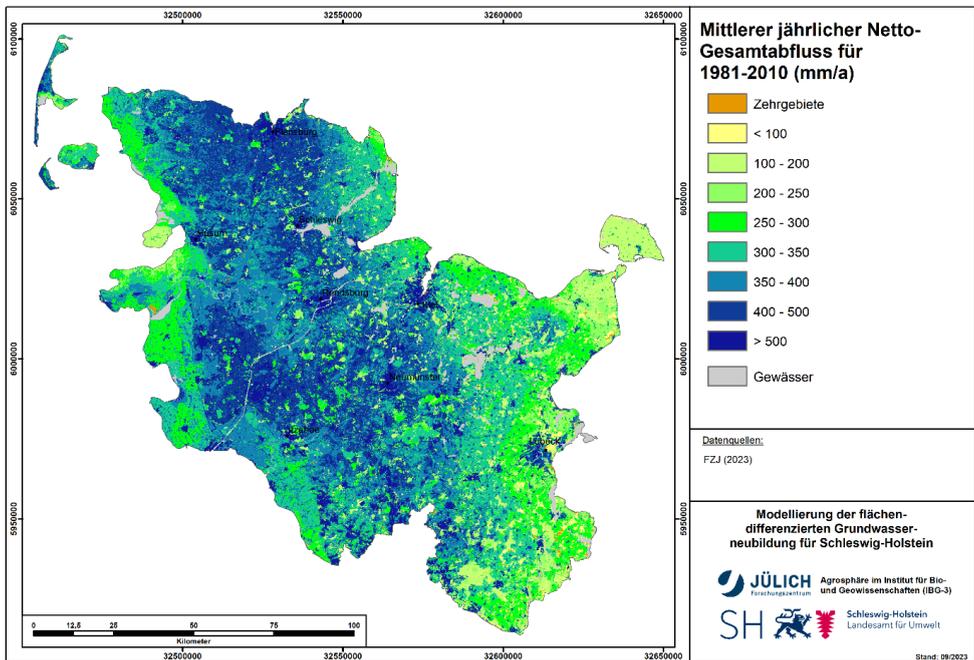


Abbildung A-8: Mittlerer jährlicher Netto-Gesamtabfluss (1981-2010).

## Brutto-Gesamtabfluss

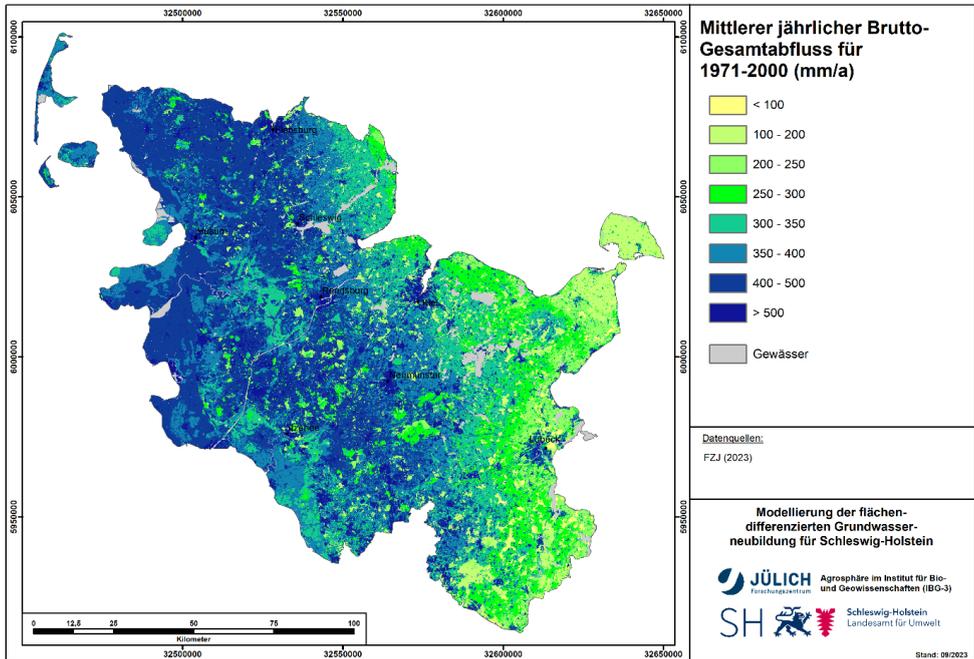


Abbildung A-9: Mittlerer jährlicher Brutto-Gesamtabfluss (1971-2000).

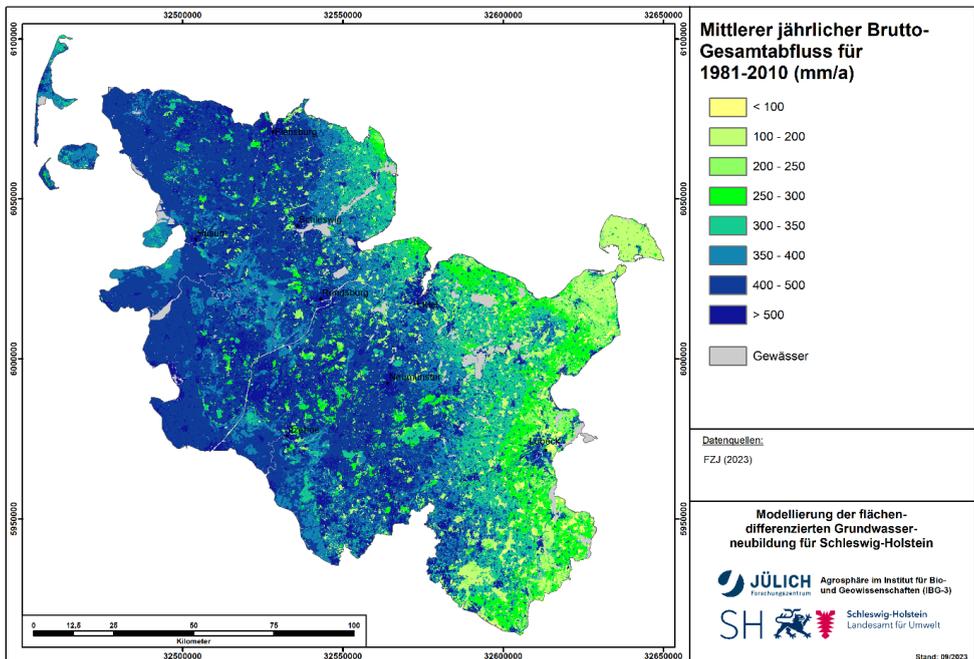


Abbildung A-10: Mittlerer jährlicher Brutto-Gesamtabfluss (1981-2010).

## Urbaner Direktabfluss

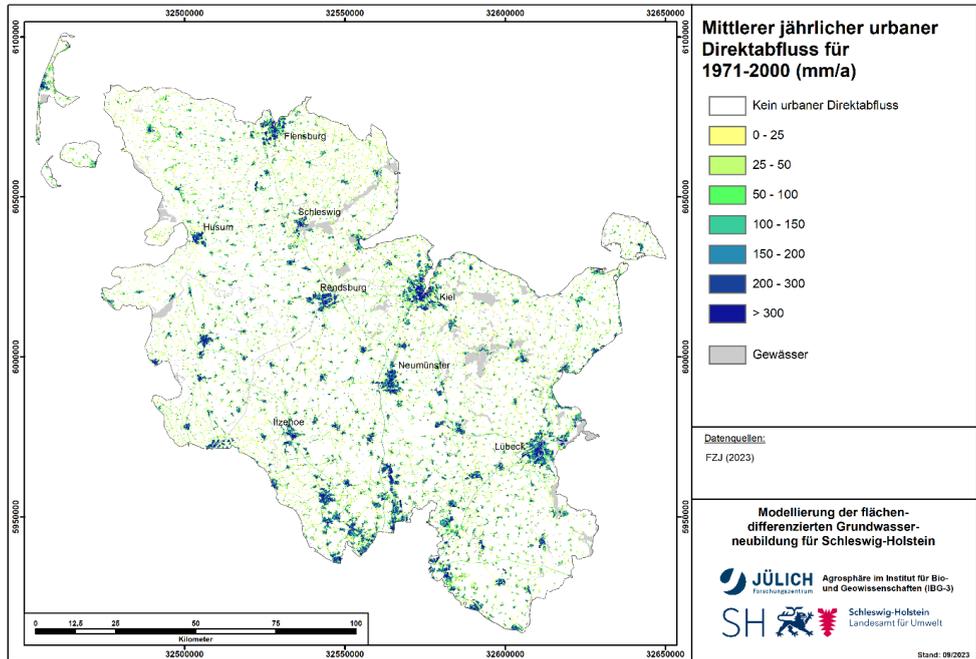


Abbildung A-11: Mittlerer jährlicher urbaner Direktabfluss (1971-2000).

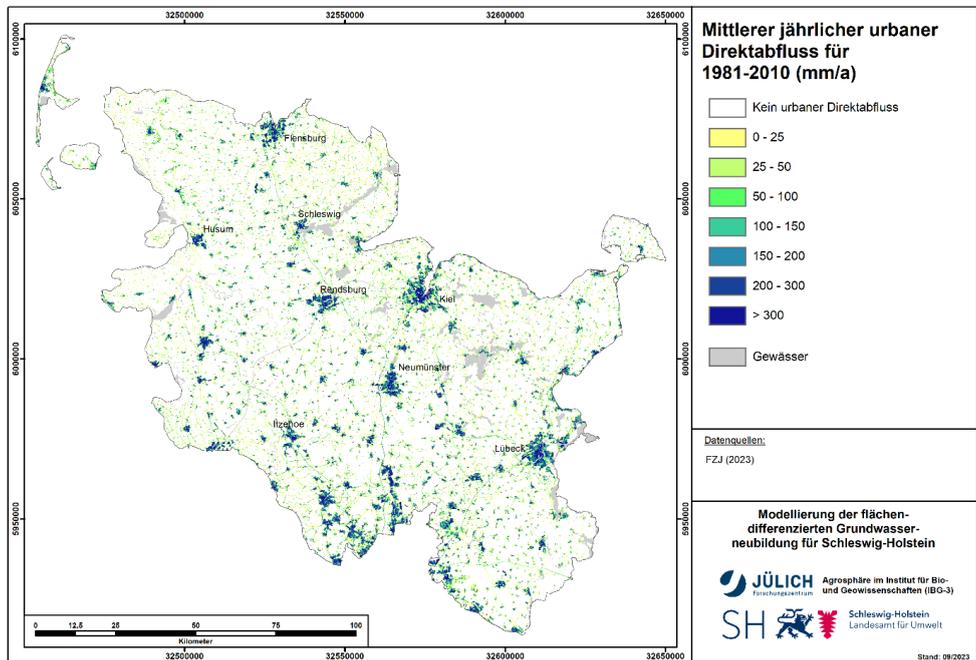


Abbildung A-12: Mittlerer jährlicher urbaner Direktabfluss (1981-2010).

## Netto-Grundwasserneubildung

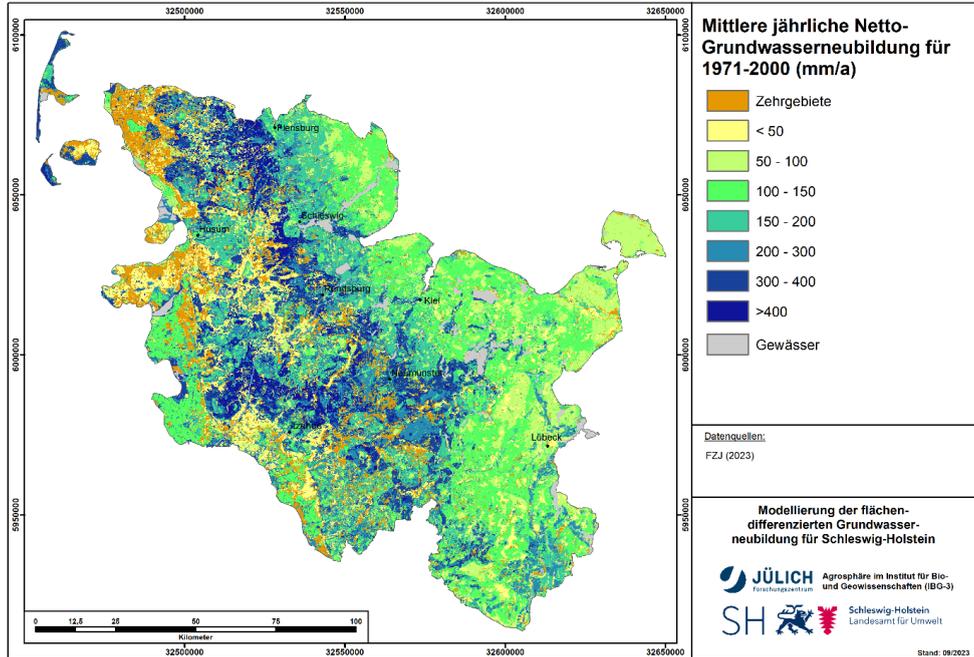


Abbildung A-13: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung (1971-2000).

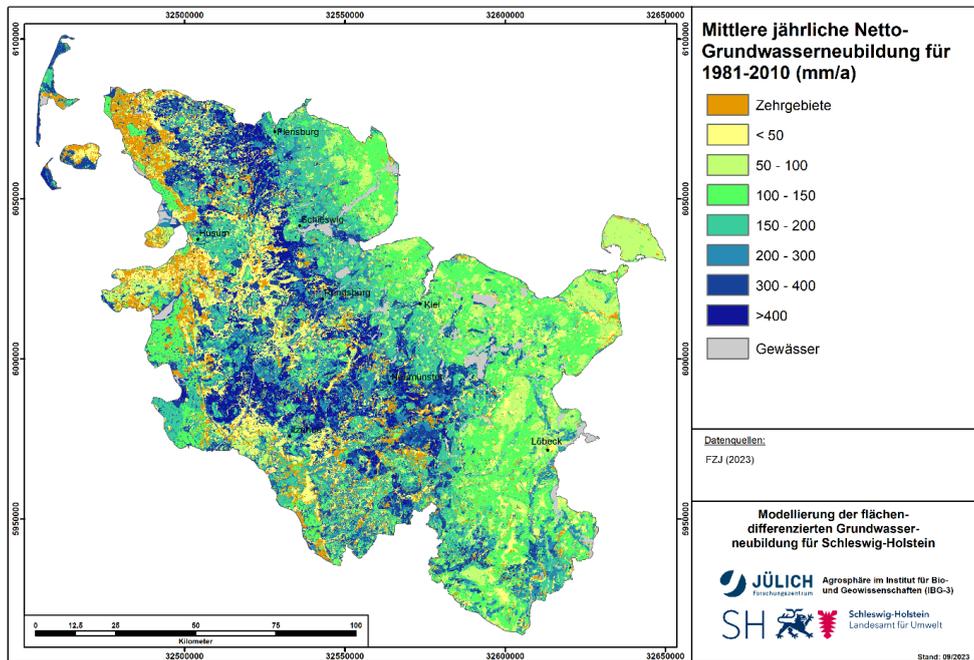


Abbildung A-14: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung (1981-2010).

## Brutto-Grundwasserneubildung

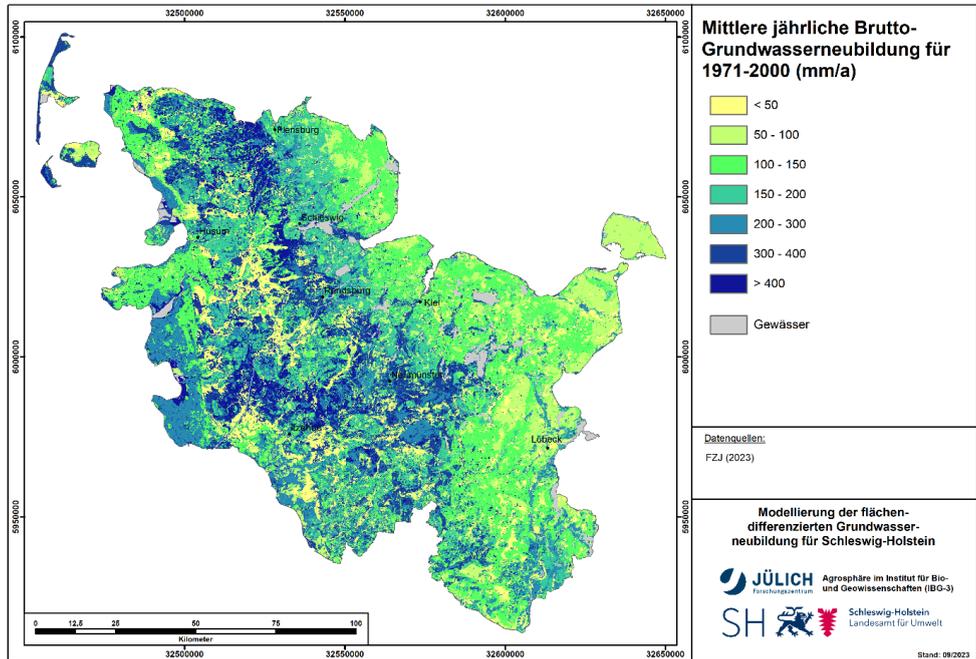


Abbildung A-15: Mittlere jährliche Brutto-Grundwasserneubildung (1971-2000).

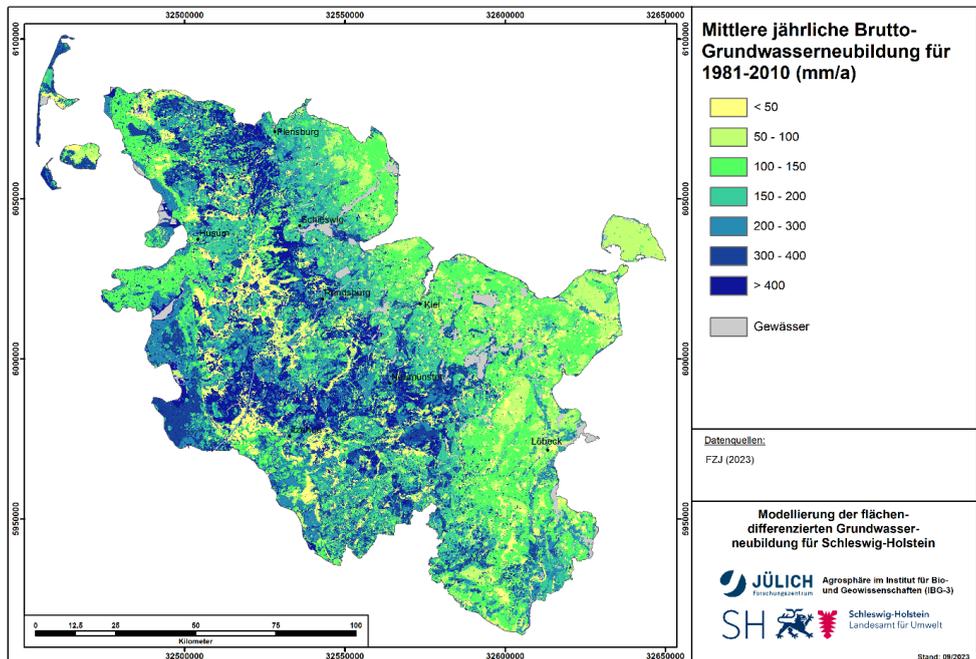


Abbildung A-16: Mittlere jährliche Brutto-Grundwasserneubildung (1981-2010).

Natürlicher Zwischenabfluss

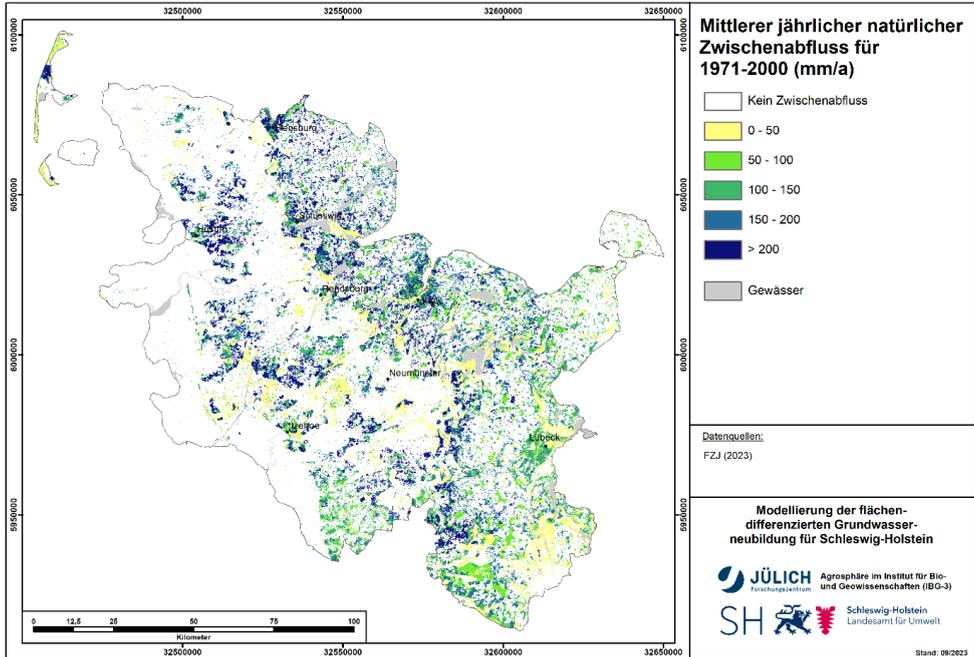


Abbildung A-17: Mittlerer jährlicher natürlicher Zwischenabfluss (1971-2000).

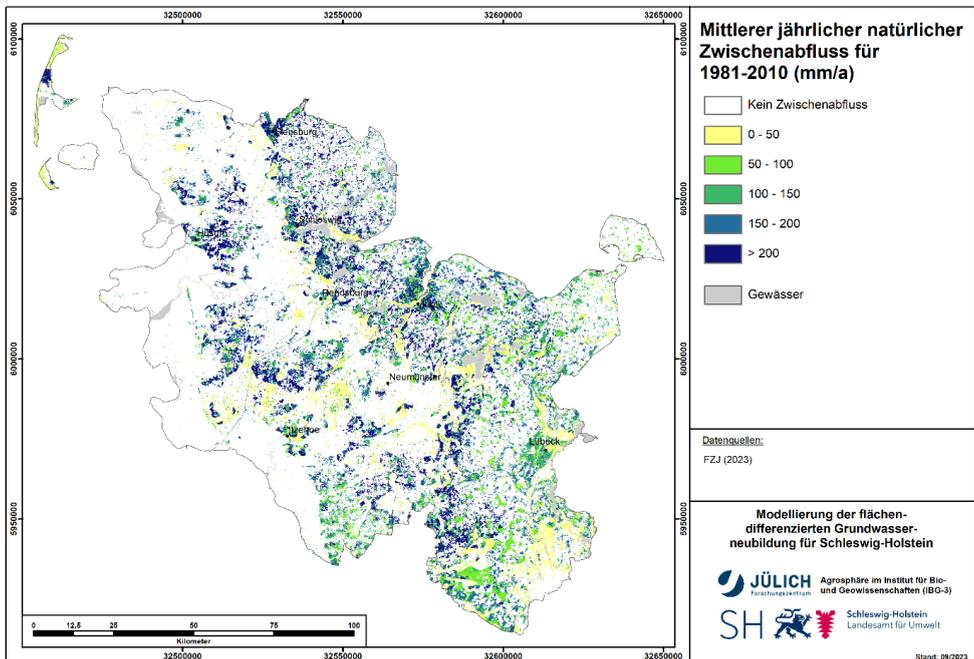


Abbildung A-18: Mittlerer jährlicher natürlicher Zwischenabfluss (1981-2010).

## Dränageabfluss

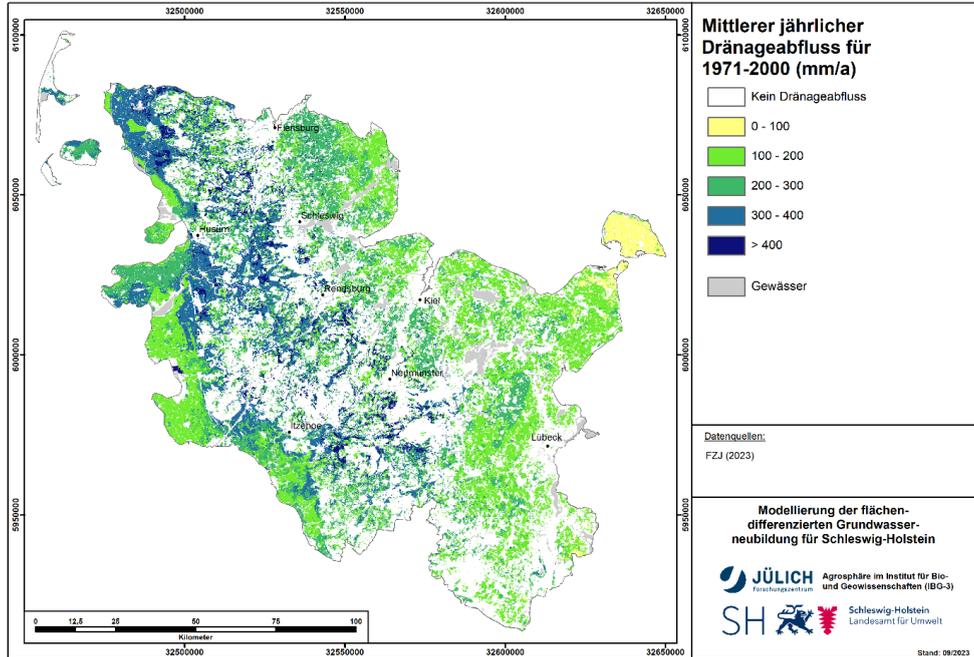


Abbildung A-19: Mittlerer jährlicher Dränageabfluss (1971-2000).

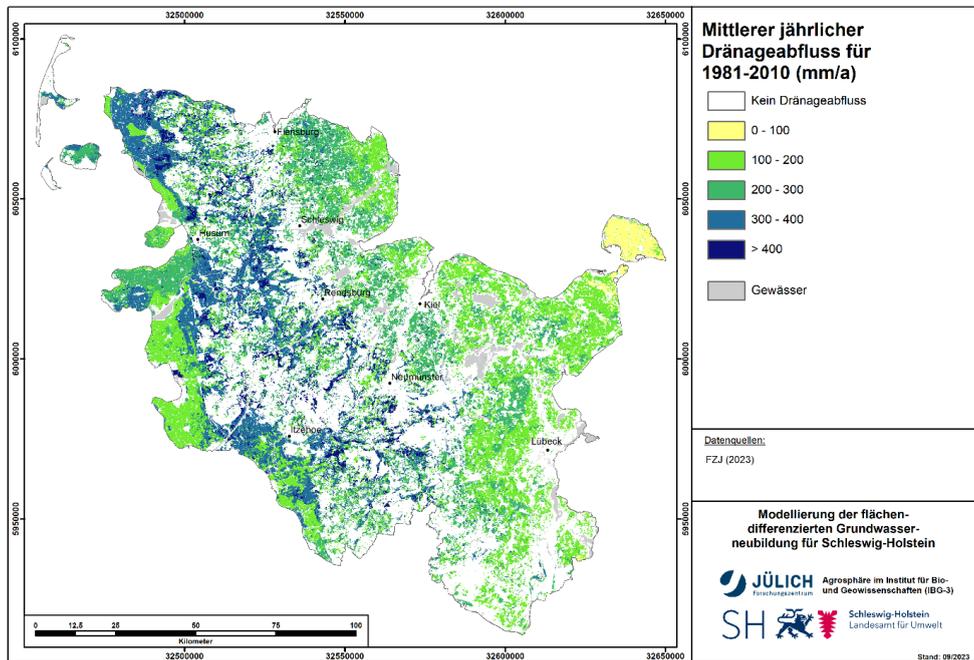


Abbildung A-20: Mittlerer jährlicher Dränageabfluss (1981-2010).

## Appendix B: Tabellierte Werte der Netto-Grundwasserneubildung

Tabelle B-1: Jahreswerte des räumlichen Mittelwertes der Netto-Grundwasserneubildung.

Hyd. Jahr	Räumlicher Mittelwert (mm)	Jahr	Räumlicher Mittelwert (mm)
1961	193	1992	107
1962	189	1993	208
1963	98	1994	211
1964	93	1995	184
1965	149	1996	5
1966	245	1997	124
1967	203	1998	213
1968	182	1999	173
1969	81	2000	149
1970	162	2001	178
1971	103	2002	252
1972	65	2003	88
1973	89	2004	169
1974	132	2005	121
1975	138	2006	125
1976	40	2007	210
1977	107	2008	194
1978	175	2009	79
1979	135	2010	189
1980	238	2011	212
1981	236	2012	150
1982	95	2013	126
1983	182	2014	114
1984	187	2015	162
1985	137	2016	159
1986	158	2017	177
1987	231	2018	99
1988	229	2019	80
1989	98	2020	113
1990	174	2021	111
1991	167		

Tabelle B-2: Monatswerte des räumlichen Mittelwertes der Netto-Grundwasserneubildung.

Hyd. Jahr	Räumlicher Mittelwert (mm)											
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
1961	32	67	20	25	10	14	-3	-11	-1	28	0	12
1962	17	41	46	28	6	22	-1	-10	-2	13	29	0
1963	6	24	1	1	17	5	-2	-11	-8	22	3	40
1964	58	4	9	10	6	11	-7	-8	-5	-3	9	9
1965	11	28	36	7	8	10	12	-9	2	15	10	20
1966	19	94	23	31	14	37	-6	-9	7	6	8	21
1967	14	59	32	26	25	18	-7	-9	-4	4	6	39
1968	14	40	31	13	11	-3	5	-10	2	-9	28	58
1969	21	14	23	17	4	12	8	-2	-3	-7	-3	-3
1970	43	19	3	28	21	43	-1	-16	-6	0	11	20
1971	61	24	10	14	7	3	-13	-5	-4	-1	-2	11
1972	18	16	6	5	4	21	-4	10	-6	1	-3	-2
1973	26	10	6	19	7	13	3	-12	-5	-4	-4	29
1974	40	48	26	16	4	-7	-11	-9	-3	0	4	24
1975	30	67	39	12	5	22	-6	-13	-14	-10	-4	10
1976	6	18	56	6	2	1	-10	-13	-19	-10	-5	7
1977	5	25	15	34	12	29	-3	-10	-9	0	1	10
1978	50	11	36	5	32	14	-8	-11	4	-6	17	31
1979	9	29	18	6	48	16	7	-3	-7	5	1	5
1980	28	55	19	23	3	7	-11	-1	44	10	28	34
1981	54	40	33	21	40	4	-9	0	3	5	-2	46
1982	31	22	28	15	16	-1	-4	-10	-8	-4	-2	12
1983	22	38	31	24	21	25	28	-6	-15	-12	0	27
1984	7	46	51	20	3	3	-10	9	4	-1	6	48
1985	26	23	12	10	10	26	-5	-2	0	15	14	7
1986	30	49	42	1	7	17	-4	-6	-9	-6	12	27
1987	41	33	35	11	8	10	1	18	7	18	21	29
1988	36	16	49	39	37	4	-11	-5	8	0	6	50
1989	12	38	9	11	23	8	-5	-13	-9	-2	14	12
1990	9	38	20	29	23	1	-8	2	9	-3	29	26
1991	55	21	40	7	9	4	-3	0	13	-3	-3	27
1992	29	32	15	14	27	6	4	-19	-15	-6	6	12
1993	45	33	33	23	3	-2	-13	-8	-3	23	31	44
1994	10	60	40	19	42	19	-8	-4	-15	-3	48	4
1995	37	31	51	48	17	15	-9	7	-14	-12	3	9
1996	8	7	4	12	6	-4	-5	-7	-10	-8	-2	4
1997	34	29	3	20	12	7	8	-9	-2	3	0	17
1998	8	24	50	7	24	14	1	1	17	8	12	46
1999	74	26	34	23	27	3	-9	-6	-11	-5	-3	19
2000	8	75	17	40	27	4	-12	-6	-5	-4	0	5
2001	17	22	12	20	18	13	-2	-3	-1	7	47	27
2002	27	37	25	51	32	-1	5	-8	59	18	-5	11

Hyd. Jahr	Räumlicher Mittelwert (mm)											
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
2003	55	6	30	13	6	-6	8	-9	-6	-11	-5	8
2004	12	22	34	41	10	1	-9	-3	19	-4	21	24
2005	29	21	31	14	22	1	0	-5	-5	14	-4	2
2006	15	26	17	14	11	31	-3	-8	-19	9	18	15
2007	30	21	55	22	26	-9	-8	0	38	12	9	14
2008	22	44	30	12	31	7	-16	-16	1	23	2	54
2009	30	15	12	15	14	4	-11	-3	-2	-5	3	8
2010	43	31	12	17	27	9	-3	-4	-16	3	39	31
2011	60	16	29	23	2	-7	-16	-5	9	32	51	18
2012	1	55	49	10	1	1	-9	-6	14	2	3	29
2013	15	35	24	32	4	-1	3	6	-5	-7	6	15
2014	31	31	27	13	2	6	5	-11	-10	5	0	15
2015	4	67	36	15	11	11	-6	-8	-10	13	15	13
2016	49	37	20	46	8	3	-7	-6	8	-3	1	5
2017	12	16	18	11	26	2	-5	-7	7	11	24	64
2018	29	47	45	17	14	10	-13	-15	-20	-10	-3	-2
2019	1	16	12	17	26	-5	-10	-9	-13	-3	4	45
2020	29	27	19	51	25	-9	-12	-13	-5	-9	2	9
2021	10	19	34	10	14	2	6	-7	-8	4	-1	30

## Appendix C: Liste der Akronyme der Klimamodellnamen

Tabelle C-1: Abkürzungsliste für alle GCM und RCM des DWD-Referenz-Ensembles v2018.

Abkürzung <sup>a</sup>	Bedeutung
CanESM	Canadian Earth System Model
CCCma	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
CCLM	COSMO-CLM <sup>b</sup>
CLMcom	Climate Limited-area Modelling Community
CSC	Climate Service Center Germany
EC-EARTH	European Centre – Earth System model
ES	Earth-System
GERICS	Climate Service Center Germany
HadGEM	Hadley Centre Global Environment Model
ICHEC	Irish Centre for High-End Computing
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
IPSL-CM	Institut Pierre Simon Laplace – Climate Model
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
LR	Low Resolution
MIROC	Model for Interdisciplinary Research on Climate
MOHC	Met Office Hadley Centre
MPI	Max-Planck-Institut
MPI-M	Max-Planck-Institut für Meteorologie
MPI-ESM	Max-Planck-Institut, Earth System Model
MR	Mid-Resolution
RACMO	Regional Atmospheric Climate Model
RCA	Rosby Centre Regional Atmospheric Model
REMO	REgional MOdel
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
UHOH	Universität Hohenheim
WRF	Weather Research and Forecasting

a: Die numerischen und alphanumerischen Versionsnummern der verschiedenen Klimamodelle (s. Tabelle 3-1) sind in dieser Tabelle nicht aufgeführt

b: COSMO-CLM steht für „COSMO model in CLimate Mode“, wobei COSMO für „COnsortium for Small-scale Modelling“ steht.

## Appendix D: Überblick der klimatischen Eingaben bezüglich des Winter- und Sommerhalbjahrs

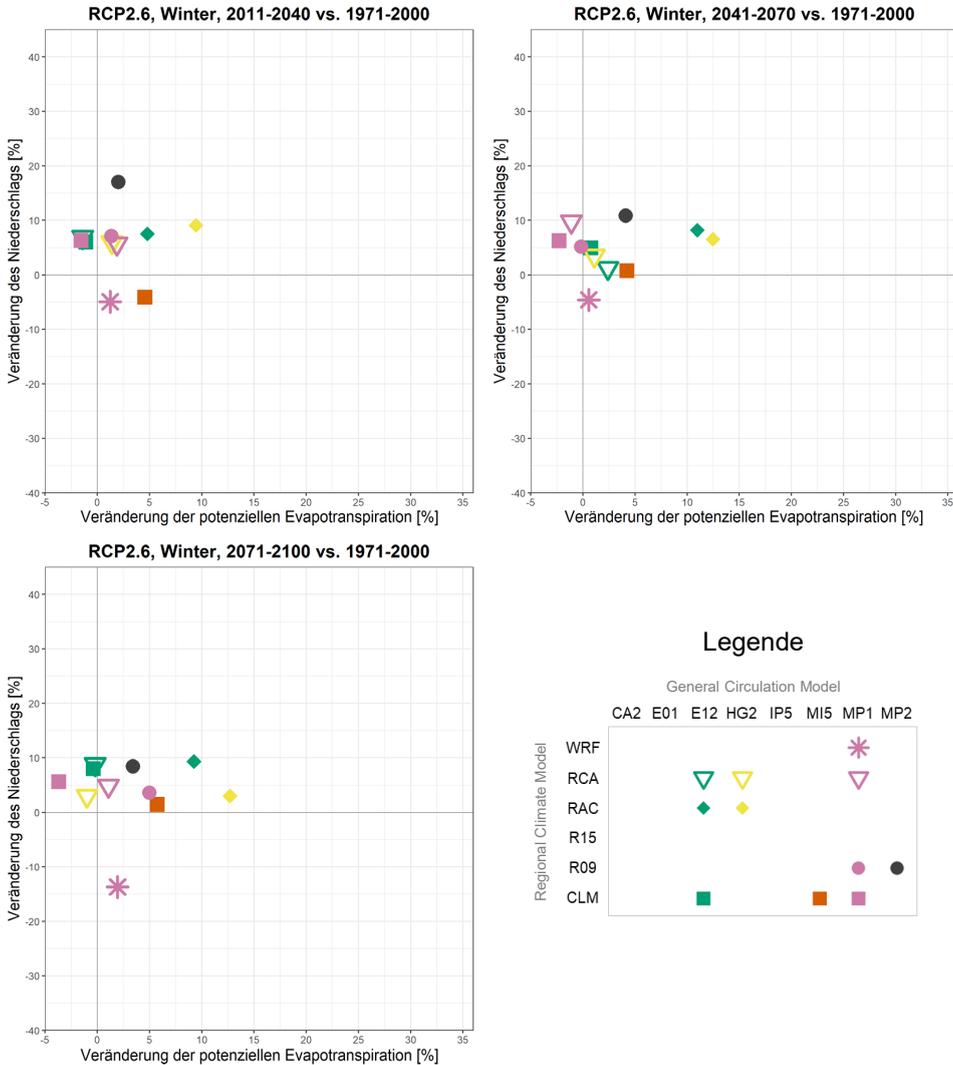


Abbildung D-1: Mittlere halbjährliche Veränderungen der potenziellen Evapotranspiration und des Niederschlags für das Winterhalbjahr im Vergleich zum entsprechenden Referenzzeitraum 1971-2000 für alle RCP2.6-Modelle.

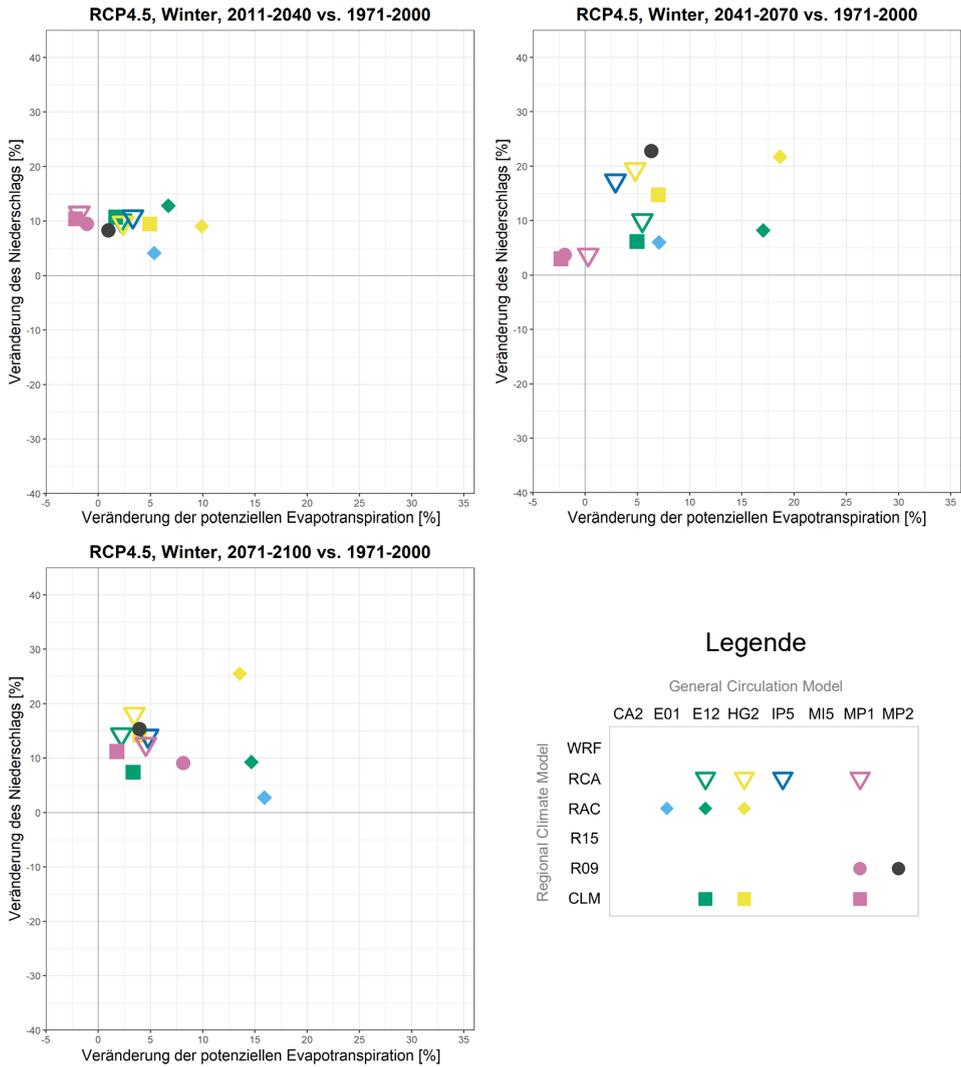


Abbildung D-2: Mittlere halbjährliche Veränderungen der potenziellen Evapotranspiration und des Niederschlags für das Winterhalbjahr im Vergleich zum entsprechenden Referenzzeitraum 1971-2000 für alle RCP4.5-Modelle.

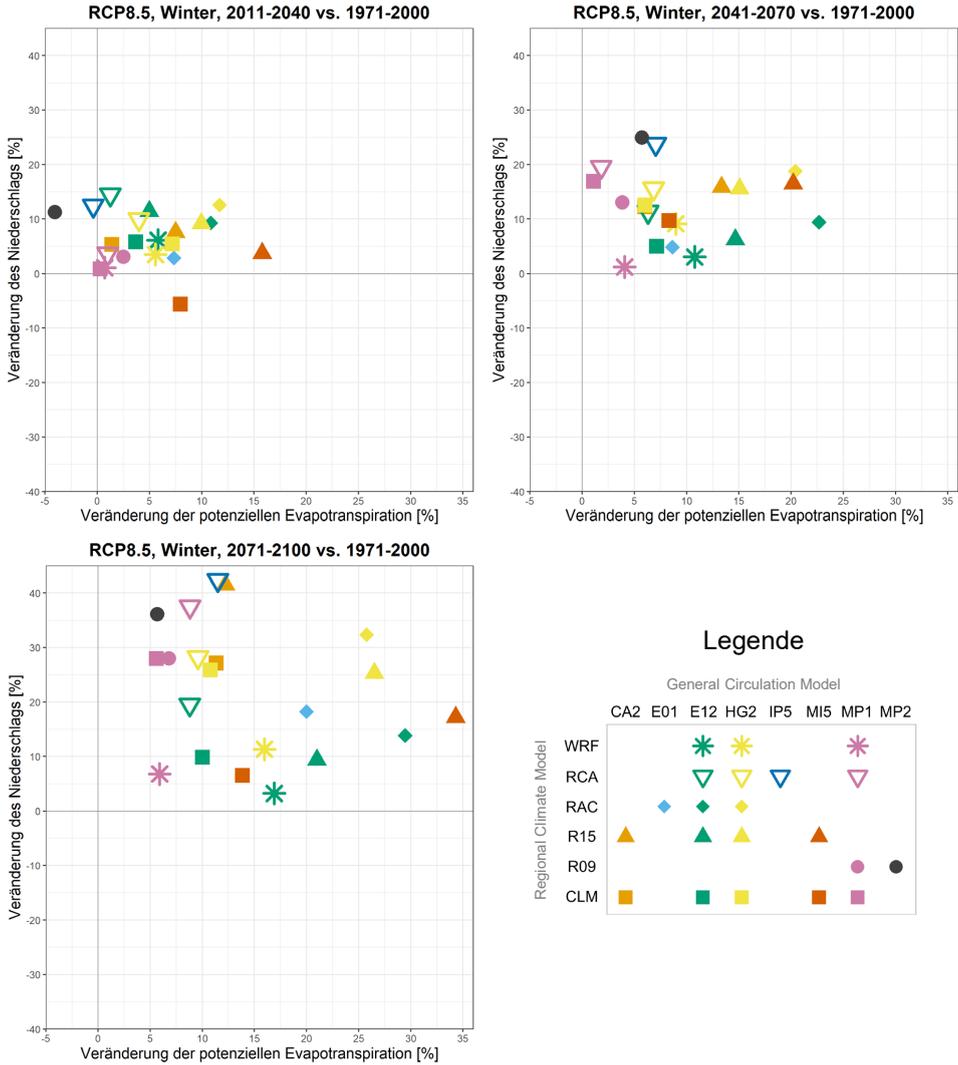


Abbildung D-3: Mittlere halbjährliche Veränderungen der potenziellen Evapotranspiration und des Niederschlags für das Winterhalbjahr im Vergleich zum entsprechenden Referenzzeitraum 1971-2000 für alle RCP8.5-Modelle.

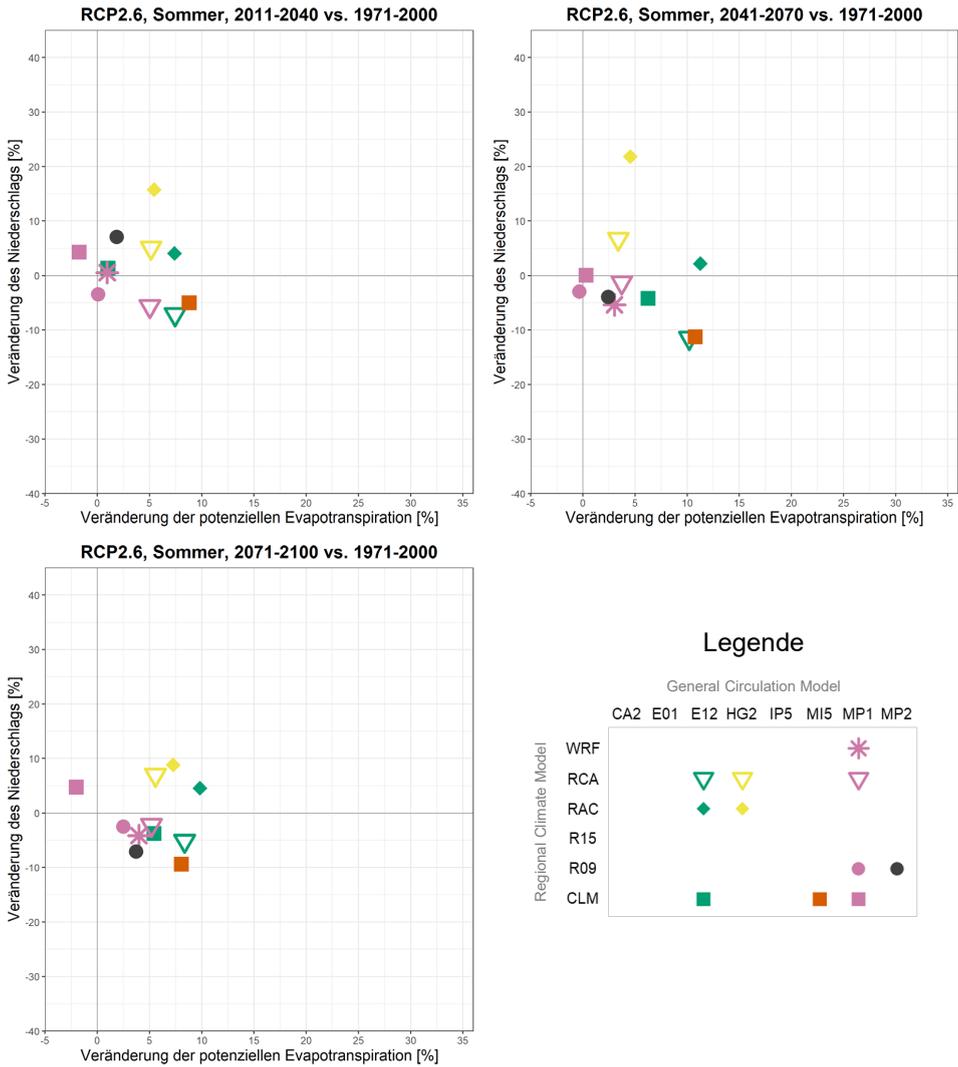


Abbildung D-4: Mittlere halbjährliche Veränderungen der potenziellen Evapotranspiration und des Niederschlags für das Sommerhalbjahr im Vergleich zum entsprechenden Referenzzeitraum 1971-2000 für alle RCP2.6-Modelle.

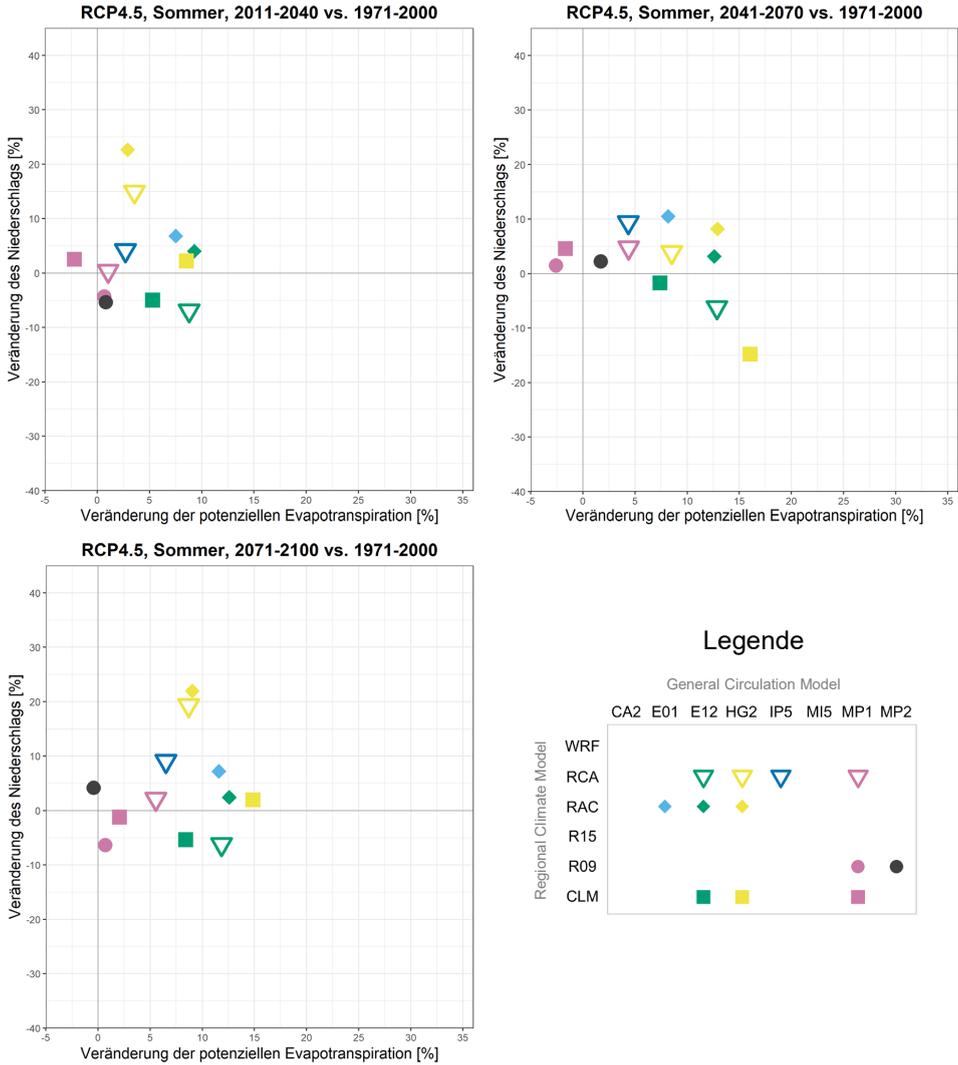


Abbildung D-5: Mittlere halbjährliche Veränderungen der potenziellen Evapotranspiration und des Niederschlags für das Sommerhalbjahr im Vergleich zum entsprechenden Referenzzeitraum 1971-2000 für alle RCP4.5-Modelle.

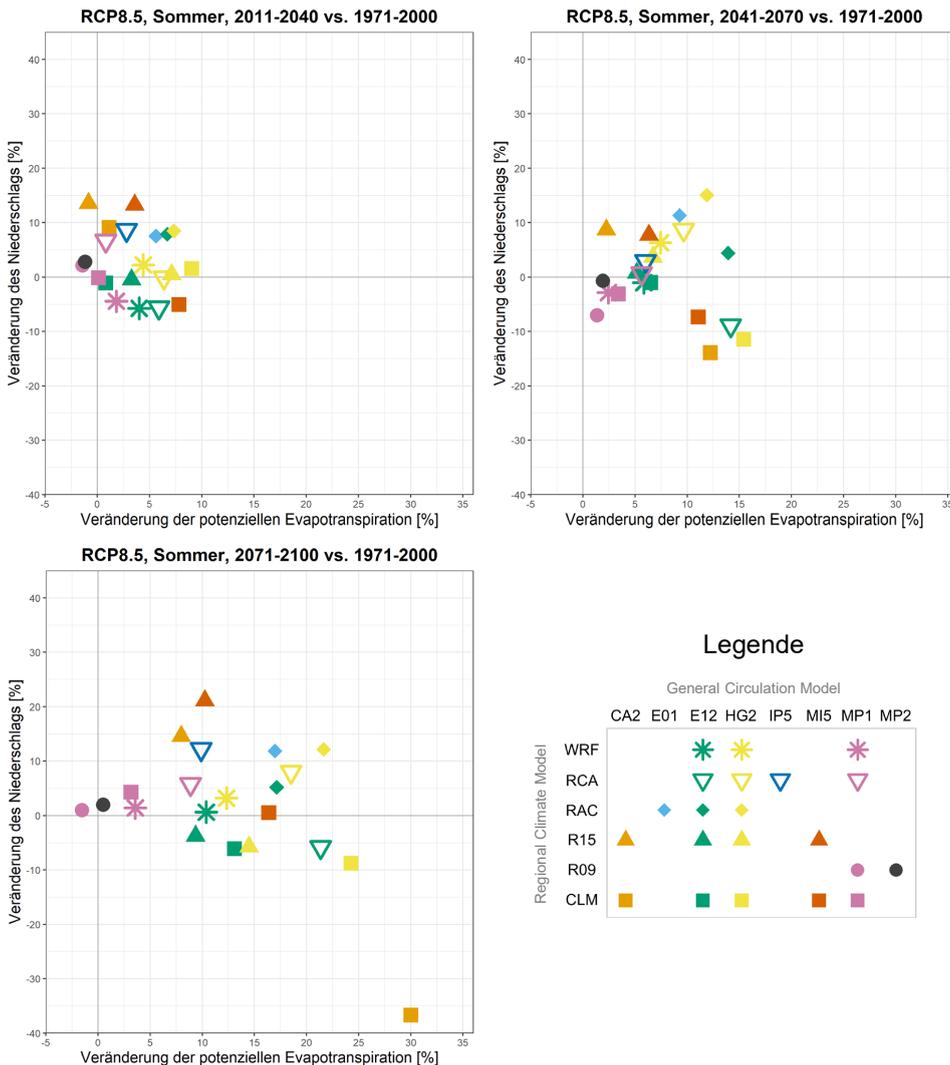


Abbildung D-6: Mittlere halbjährliche Veränderungen der potenziellen Evapotranspiration und des Niederschlags für das Sommerhalbjahr im Vergleich zum entsprechenden Referenzzeitraum 1971-2000 für alle RCP8.5-Modelle.

## Appendix E: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung für alle 44 Mitglieder des Klima-Ensembles

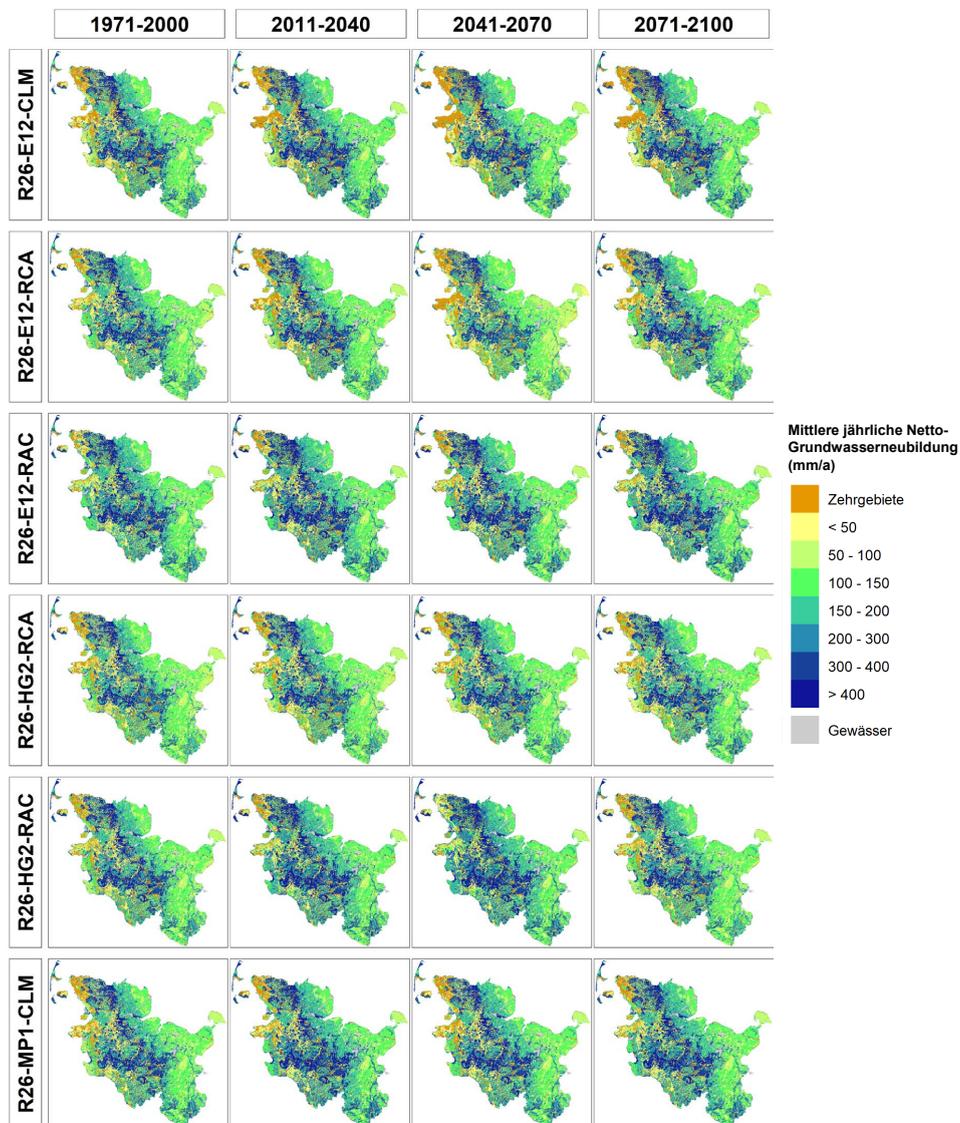


Abbildung E-1: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung für die Klimamodelle R26-E12-CLM, R26-E12-RCA, R26-E12-RAC, R26-HG2-RCA, R26-HG2-RAC und R26-MP1-CLM für die Zeiträume 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100.

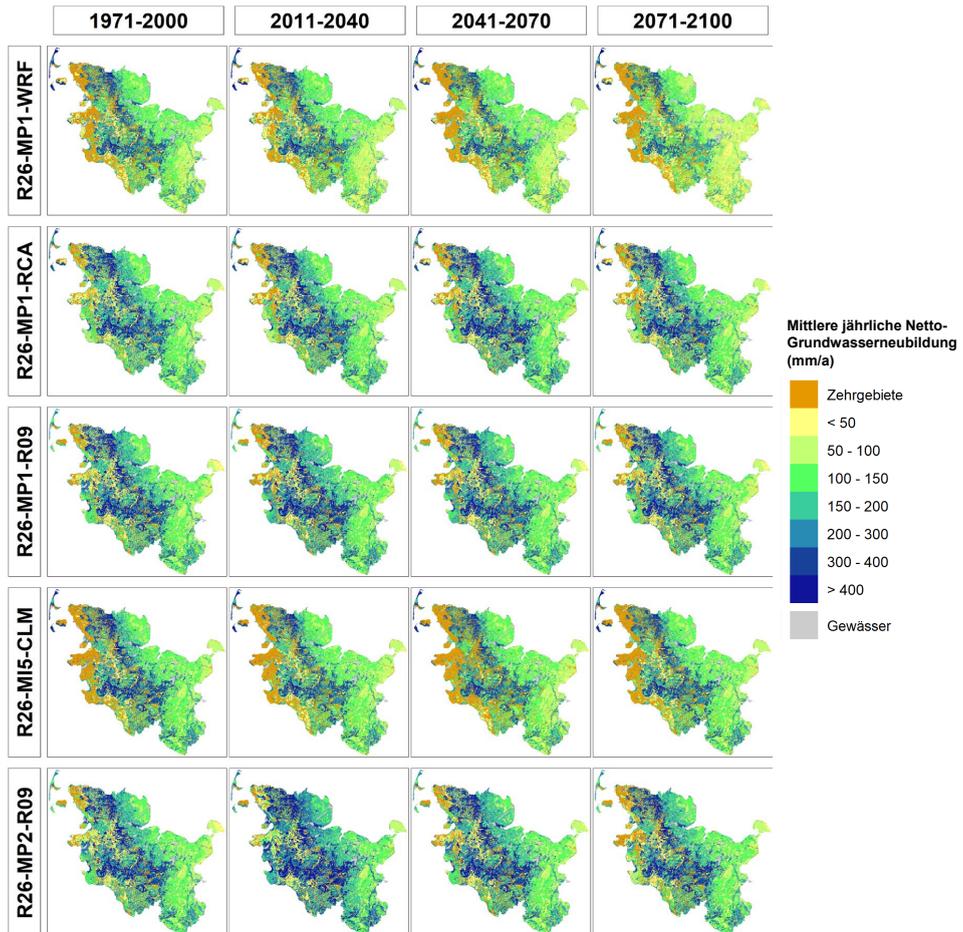


Abbildung E-2: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung für die Klimamodelle R26-MP1-WRF, R26-MP1-RCA, R26-MP1-R09, R26-MI5-CLM und R26-MP2-R09 für die Zeiträume 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100.

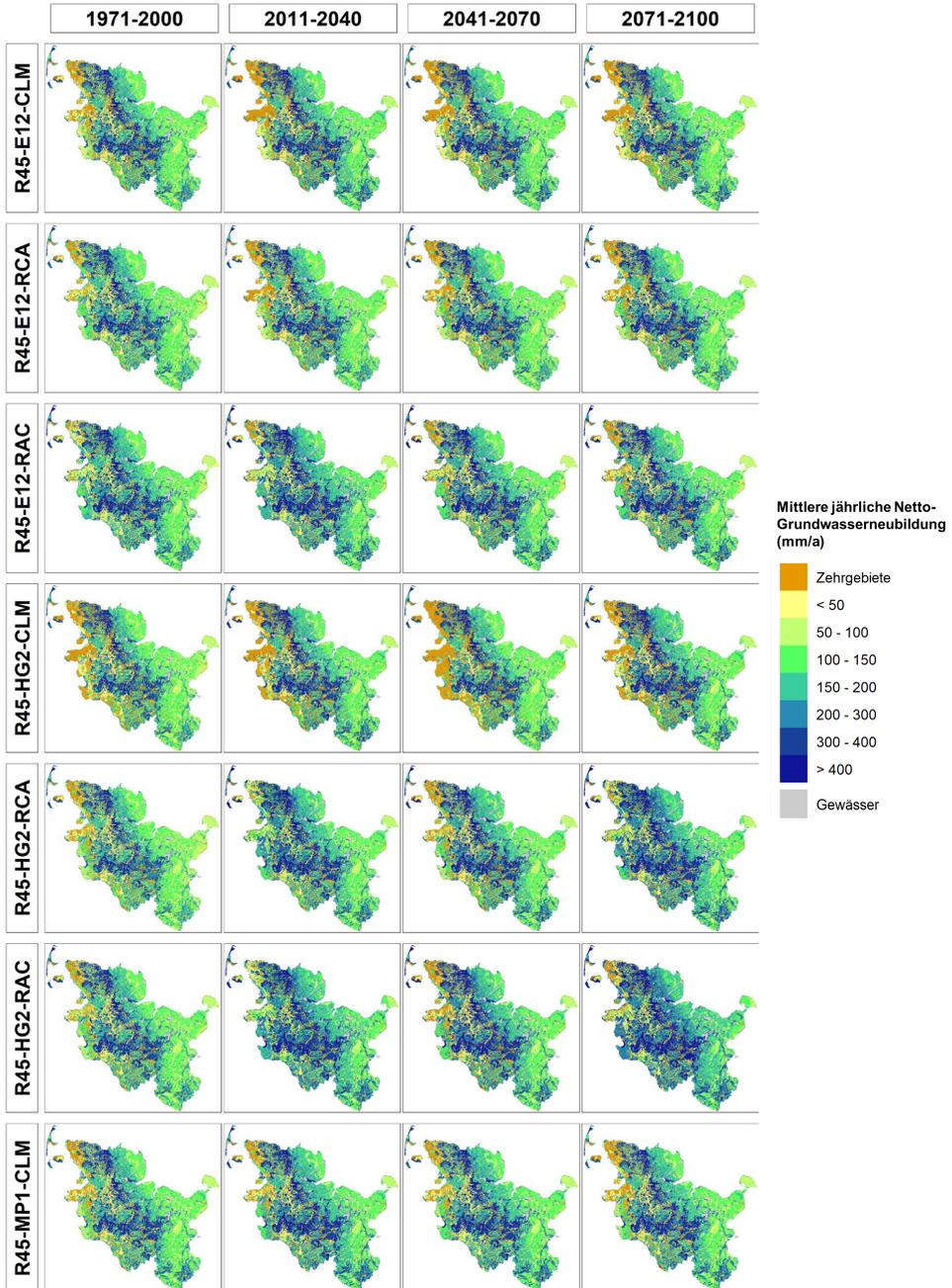


Abbildung E-3: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung für die Klimamodelle R45-E12-CLM, R45-E12-RCA, R45-E12-RAC, R45-HG2-CLM, R45-HG2-RCA, R45-HG2-RAC und R45-MP1-CLM für die Zeiträume 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100.

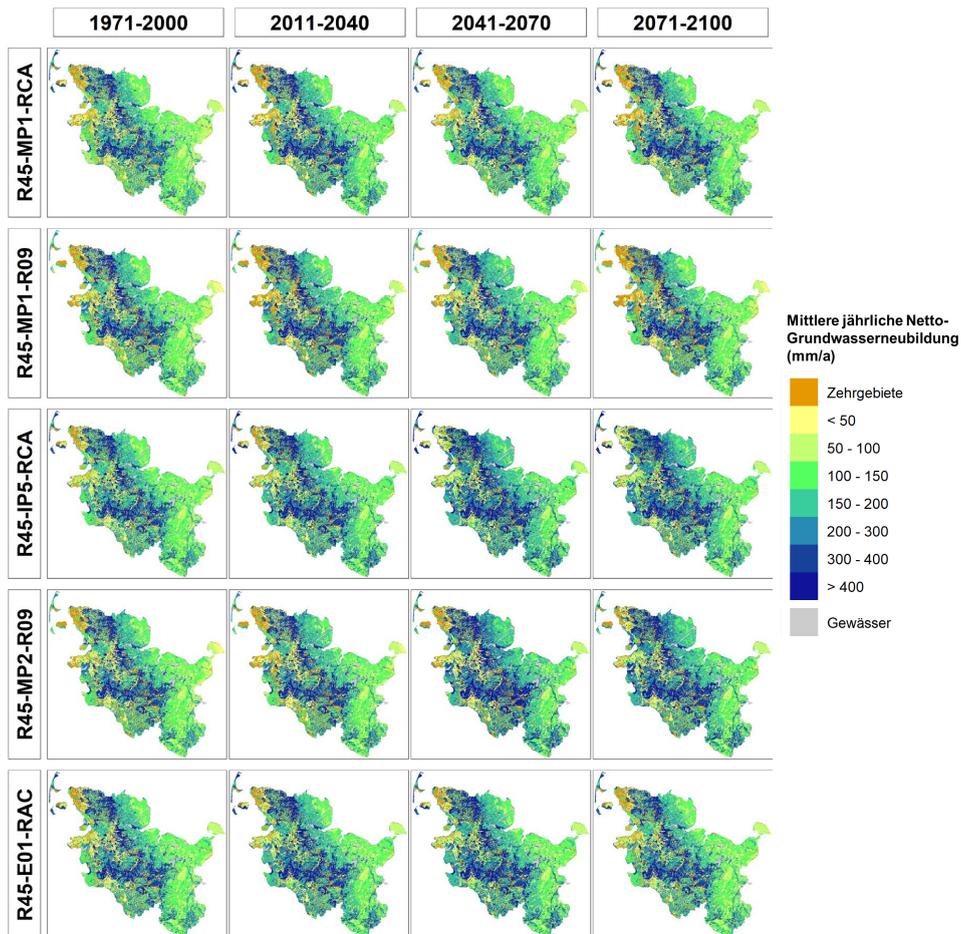


Abbildung E-4: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung für die Klimamodelle R45-MP1-RCA, R45-MP1-R09, R45-IP5-RCA, R45-MP2-R09 und R45-E01-RAC für die Zeiträume 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100.

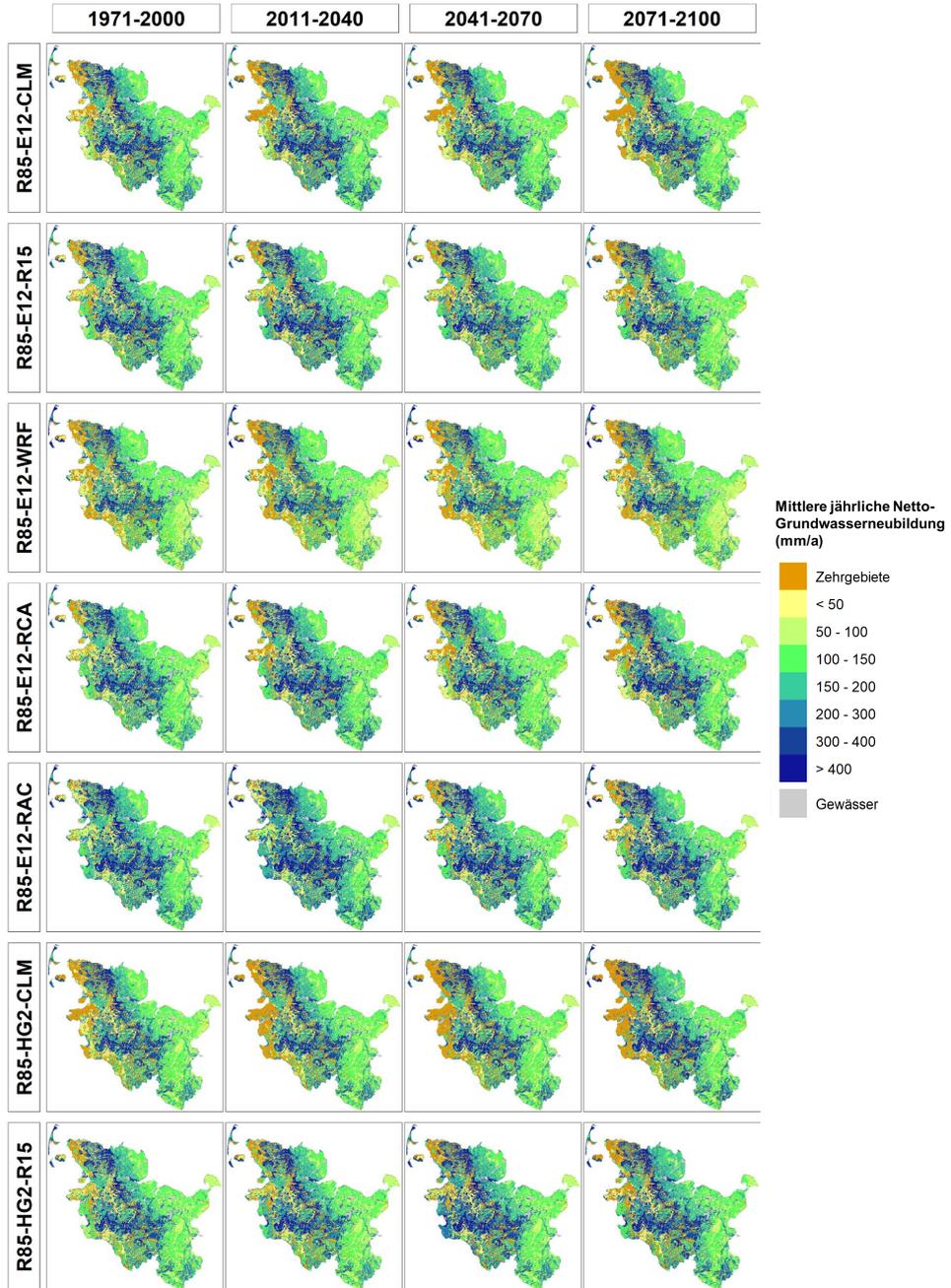


Abbildung E-5: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung für die Klimamodelle R85-E12-CLM, R85-E12-R15, R85-E12-WRF, R85-E12-RCA, R85-E12-RAC, R85-HG2-CLM und R85-HG2-R15 für die Zeiträume 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100.

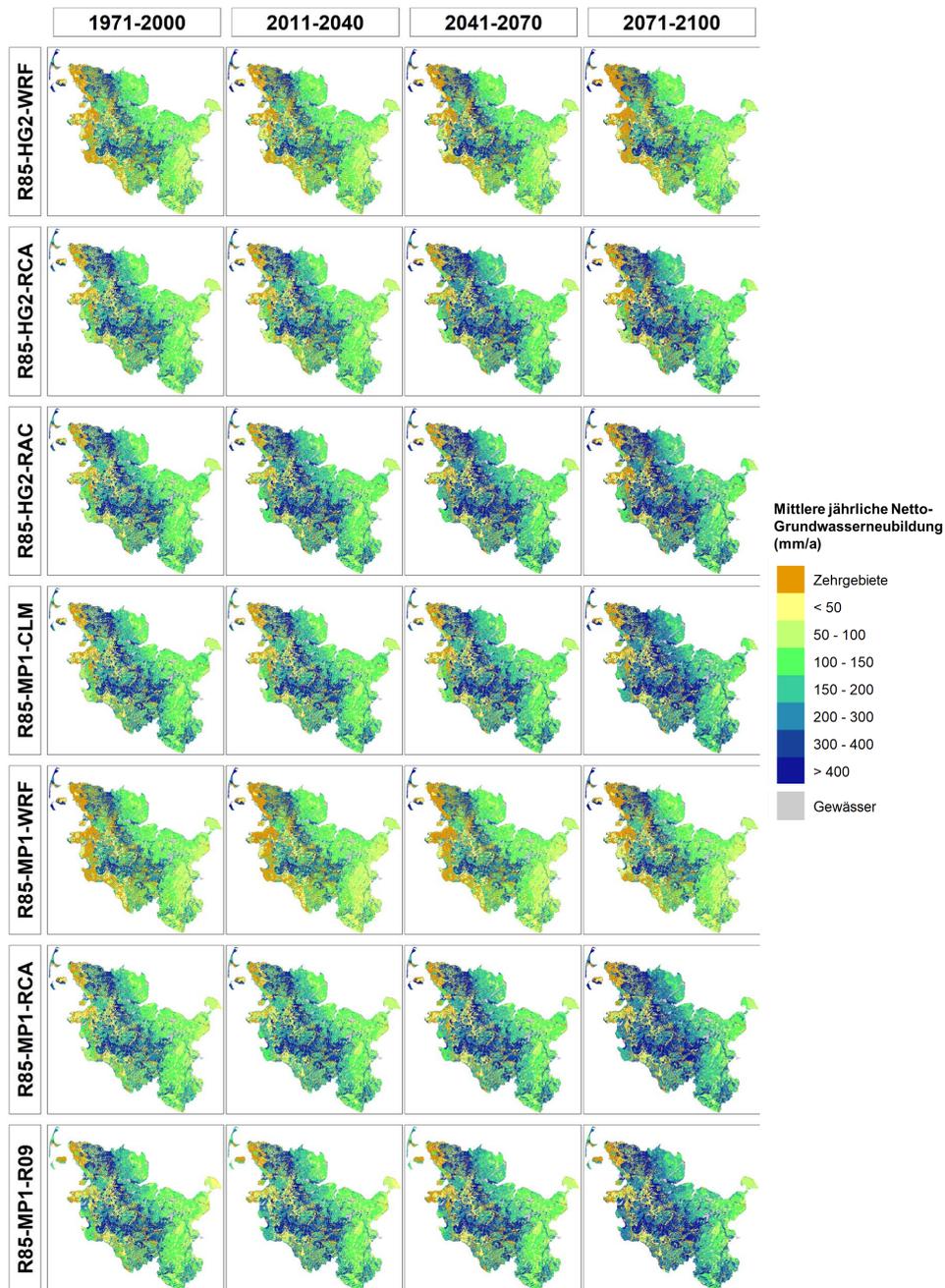


Abbildung E-6: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung für die Klimamodelle R85-HG2-WRF, R85-HG2-RCA, R85-HG2-RAC, R85-MP1-CLM, R85-MP1-WRF, R85-MP1-RCA und R85-MP1-R09 für die Zeiträume 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100.

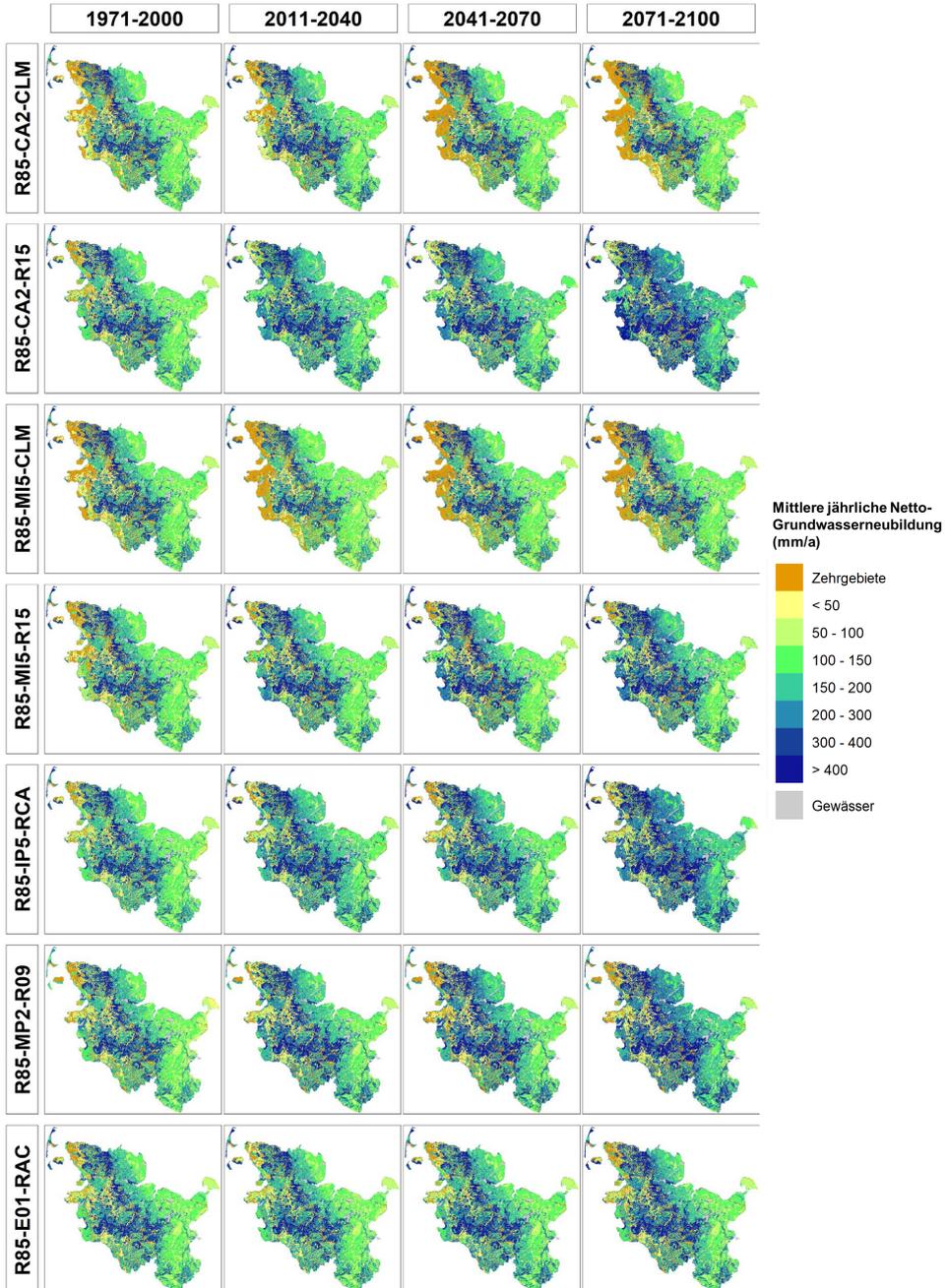


Abbildung E-7: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung für die Klimamodelle R85-CA2-CLM, R85-CA2-R15, R85-MI5-CLM, R85-MI5-R15, R85-IP5-RCA, R85-MP2-R09 und R85-E01-RAC für die Zeiträume 1971-2000, 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100.

## Appendix F: Zeitreihendarstellungen der jährlichen und monatlichen räumlichen Mittel der Netto-Grundwasserneubildung für alle 44 Mitglieder des Klima-Ensembles

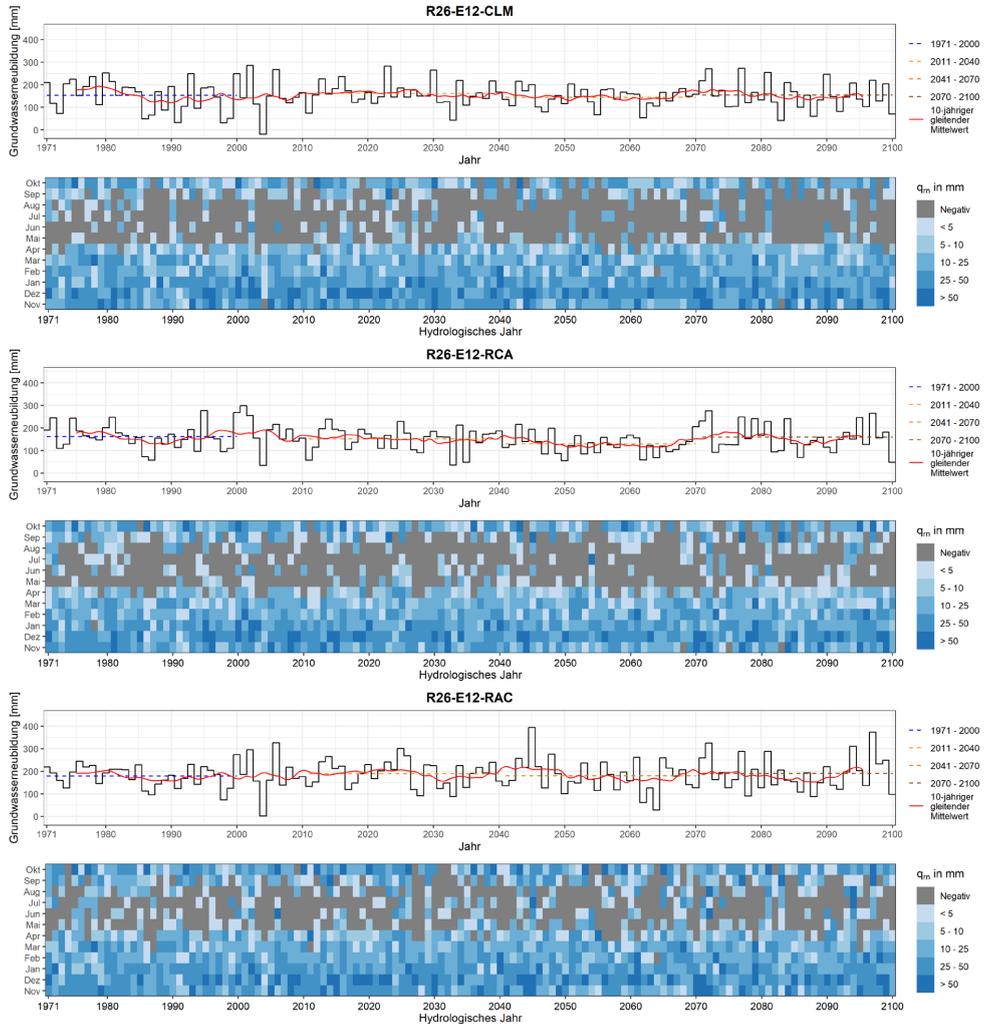


Abbildung F-1: Für jedes Modell: oben - jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung bis 2100 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten; unten - Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung. Klimamodelle: R26-E12-CLM, R26-E12-RCA und R26-E12-RAC.

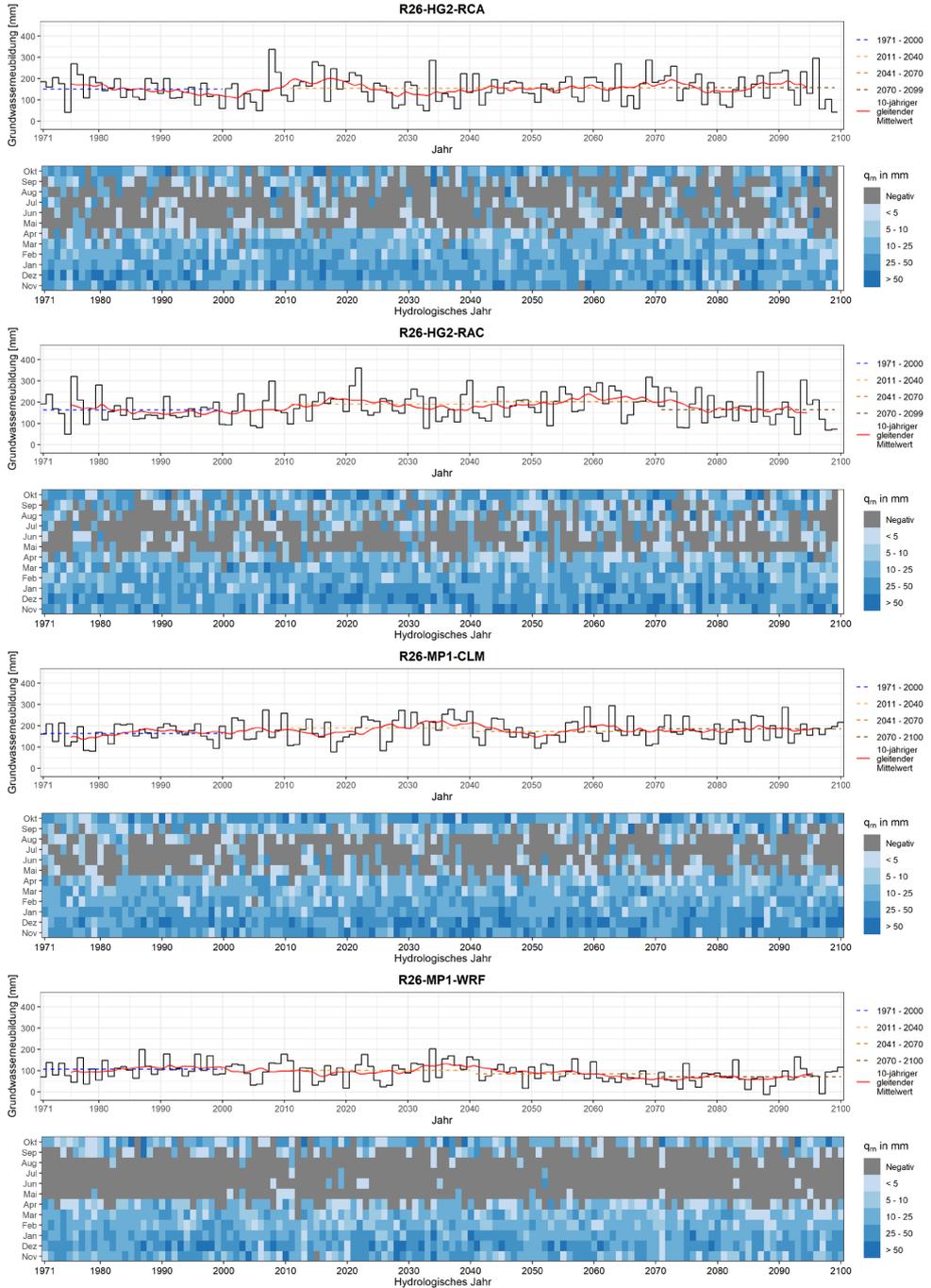


Abbildung F-2: Für jedes Modell: oben - jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung bis 2100 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten; unten - Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung. Klimamodelle: R26-HG2-RCA, R26-HG2-RAC, R26-MP1-CLM und R26-MP1-WRF.

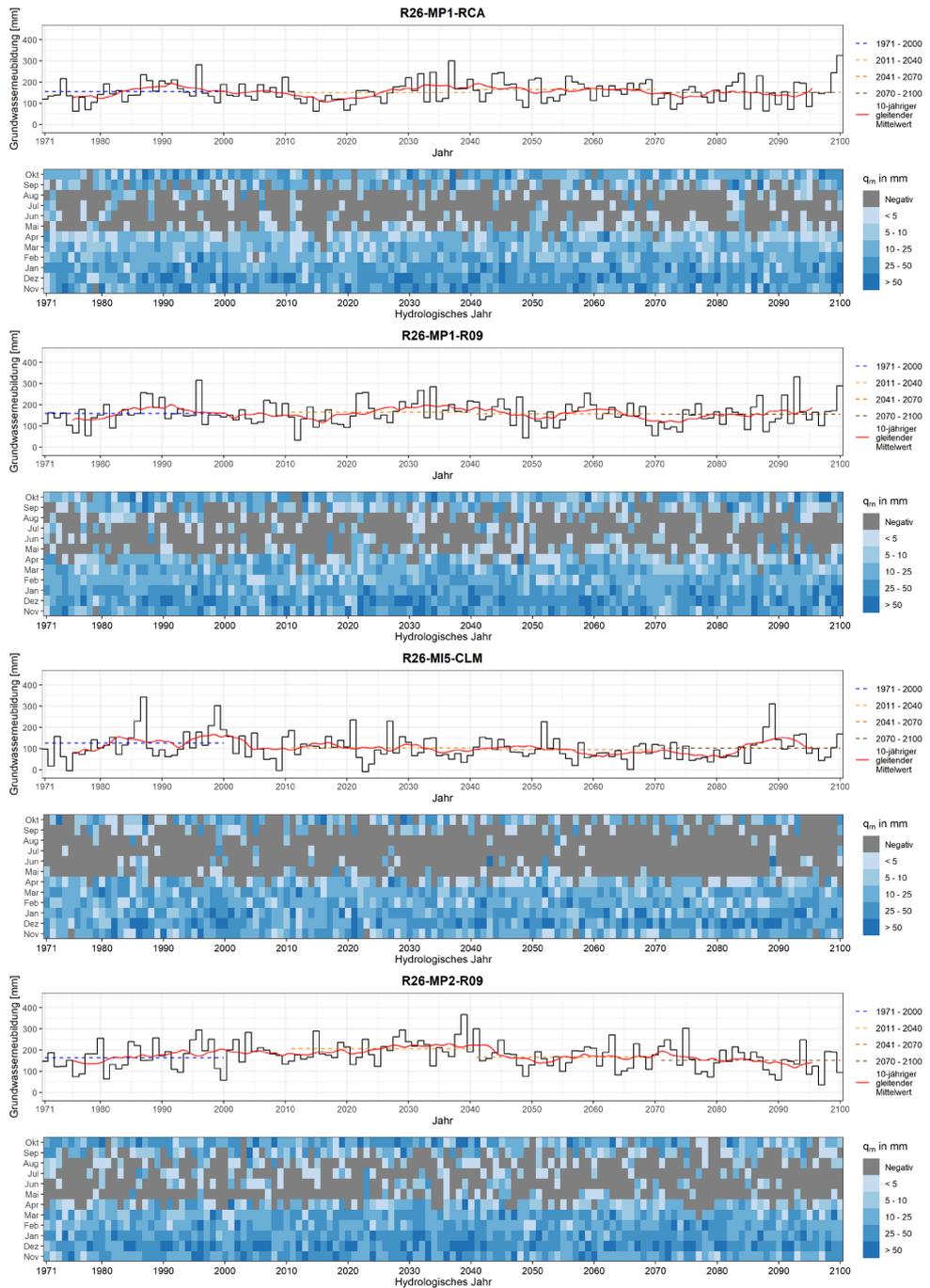


Abbildung F-3: Für jedes Modell: oben - jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung bis 2100 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten; unten - Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung. Klimamodelle: R26-MP1-RCA, R26-MP1-R09, R26-MI5-CLM und R26-MP2-R09.

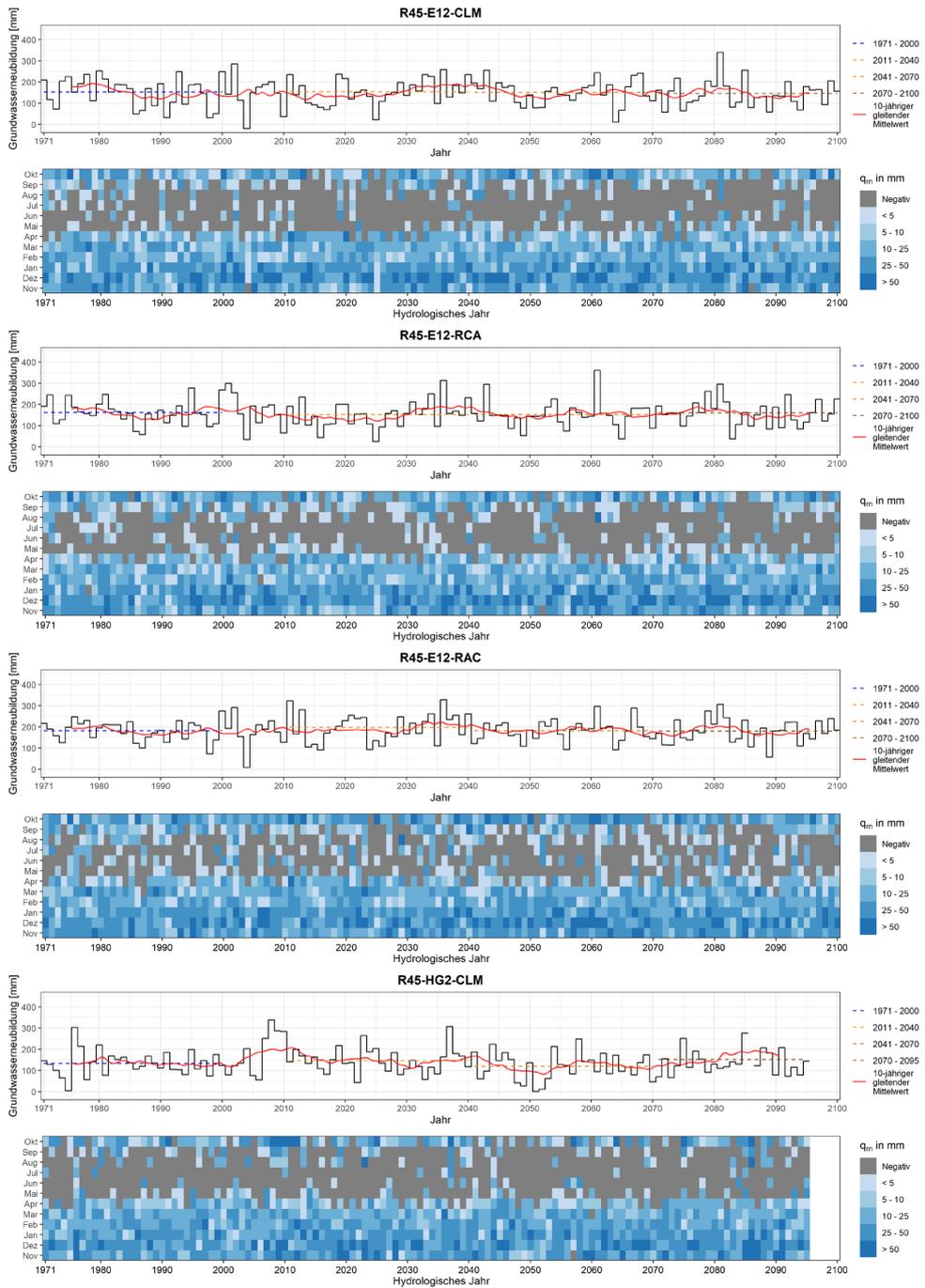


Abbildung F-4: Für jedes Modell: oben - jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung bis 2100 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten; unten - Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung. Klimamodelle: R45-E12-CLM, R45-E12-RCA, R45-E12-RAC und R45-HG2-CLM.

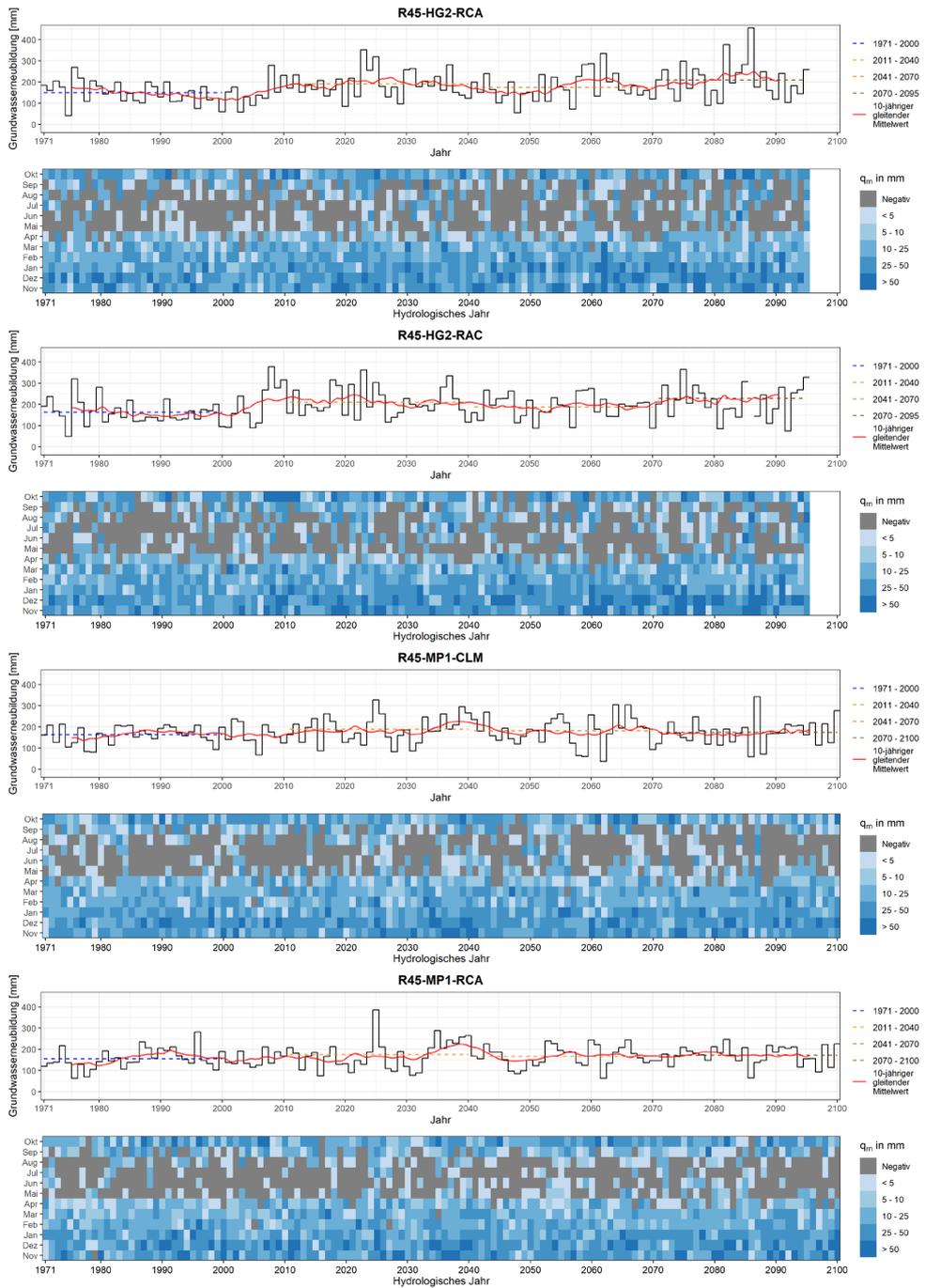


Abbildung F-5: Für jedes Modell: oben - jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung bis 2100 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten; unten - Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung. Klimamodelle: R45-HG2-RCA, R45-HG2-RAC, R45-MP1-CLM und R45-MP1-RCA.

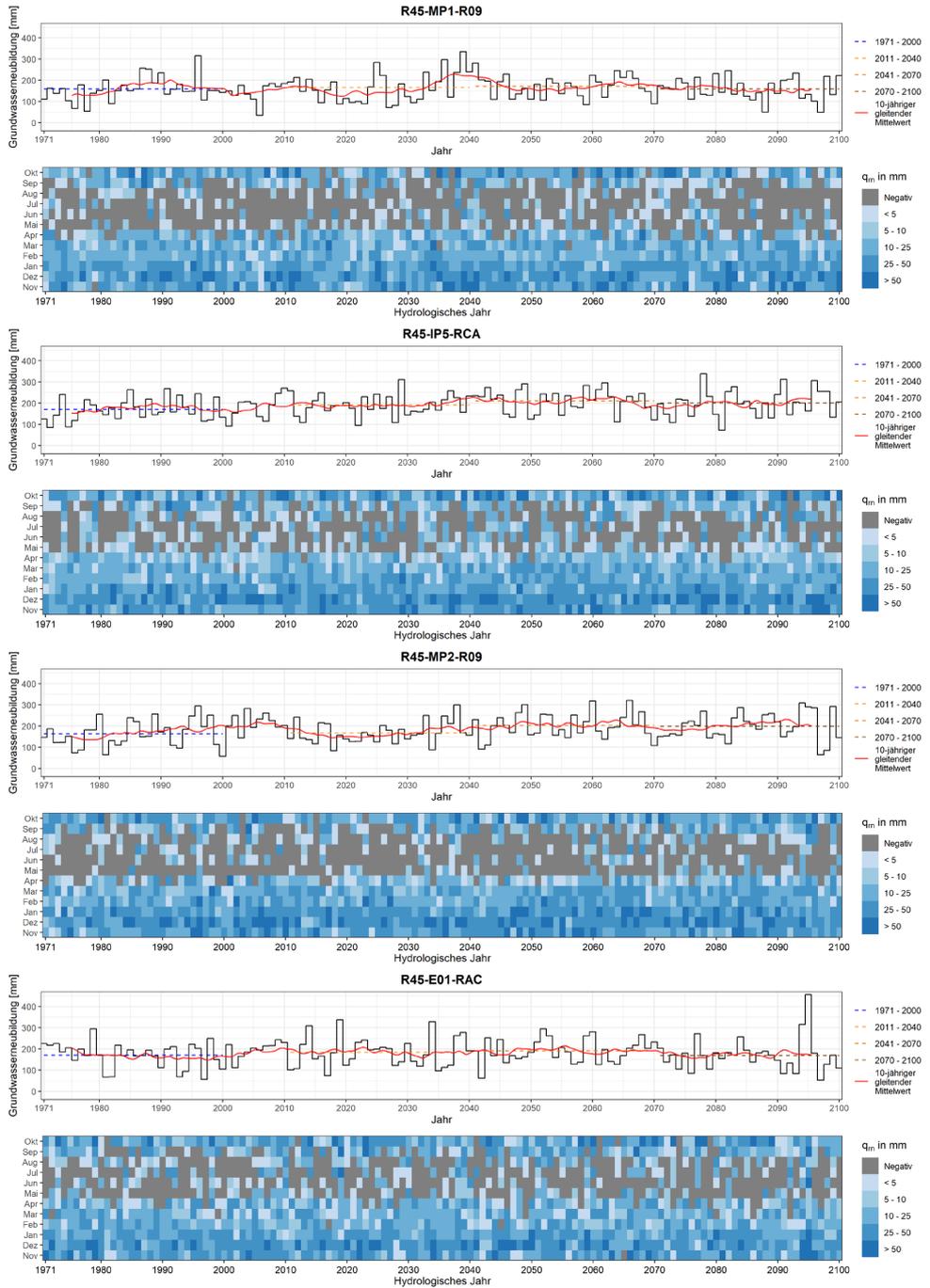


Abbildung F-6: Für jedes Modell: oben - jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung bis 2100 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten; unten - Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung. Klimamodelle: R45-MP1-R09, R45-IP5-RCA, R45-MP2-R09 und R45-E01-RAC.

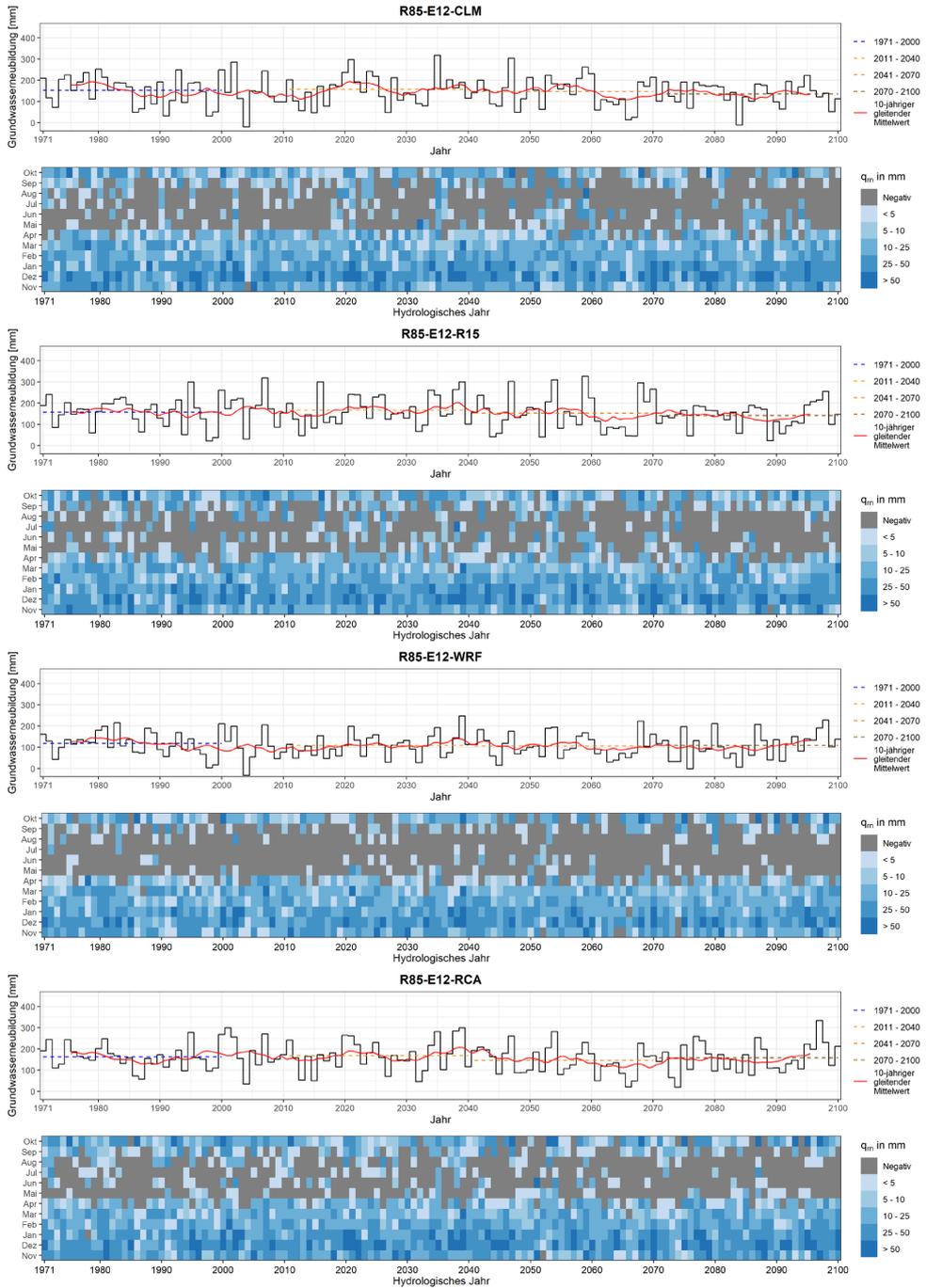


Abbildung F-7: Für jedes Modell: oben - jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung bis 2100 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten; unten - Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung. Klimamodelle: R85-E12-CLM, R85-E12-R15, R85-E12-WRF und R85-E12-RCA.

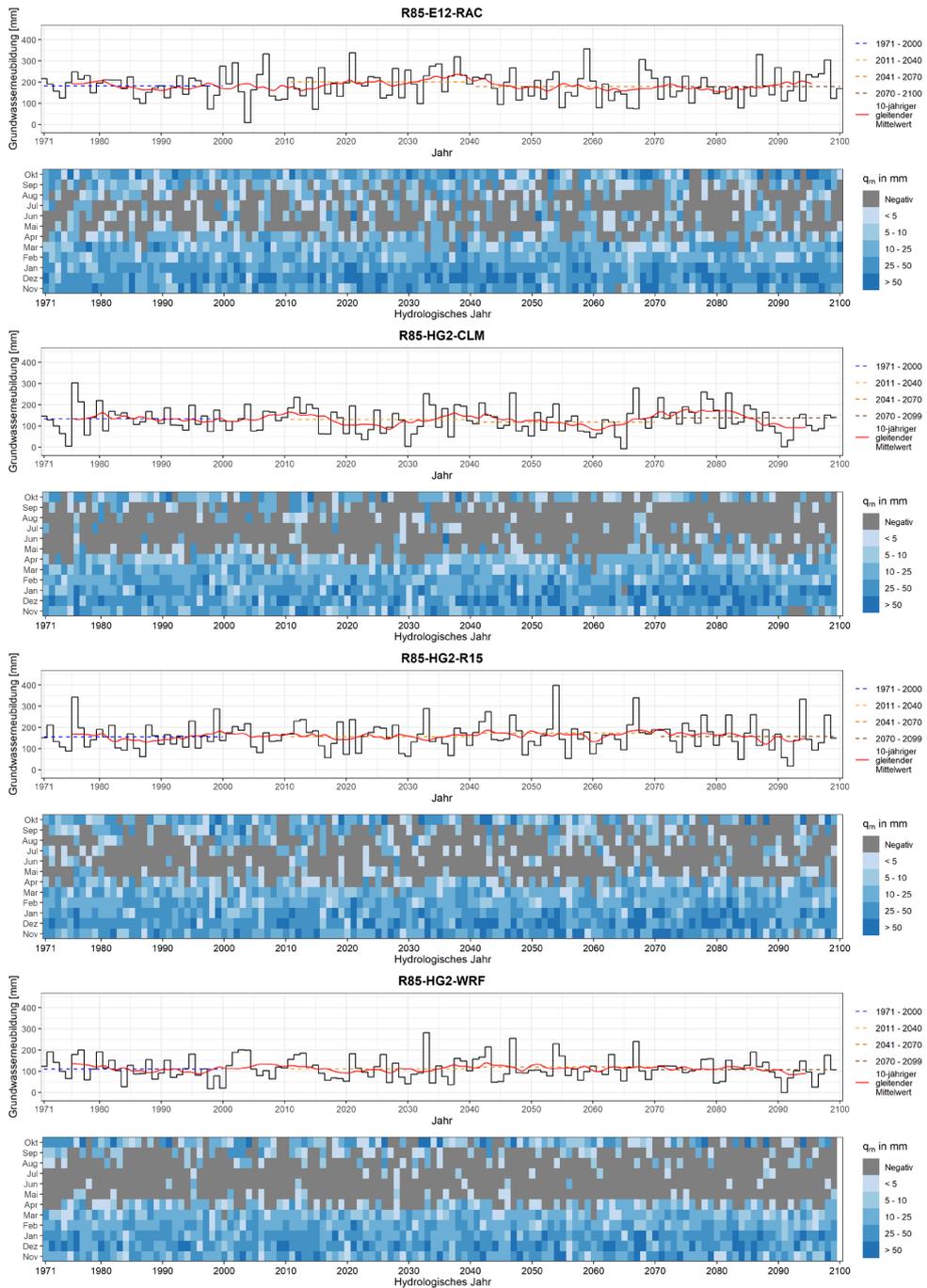


Abbildung F-8: Für jedes Modell: oben - jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung bis 2100 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten; unten - Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung. Klimamodelle: R85-E12-RAC, R85-HG2-CLM, R85-HG2-R15 und R85-HG2-WRF.

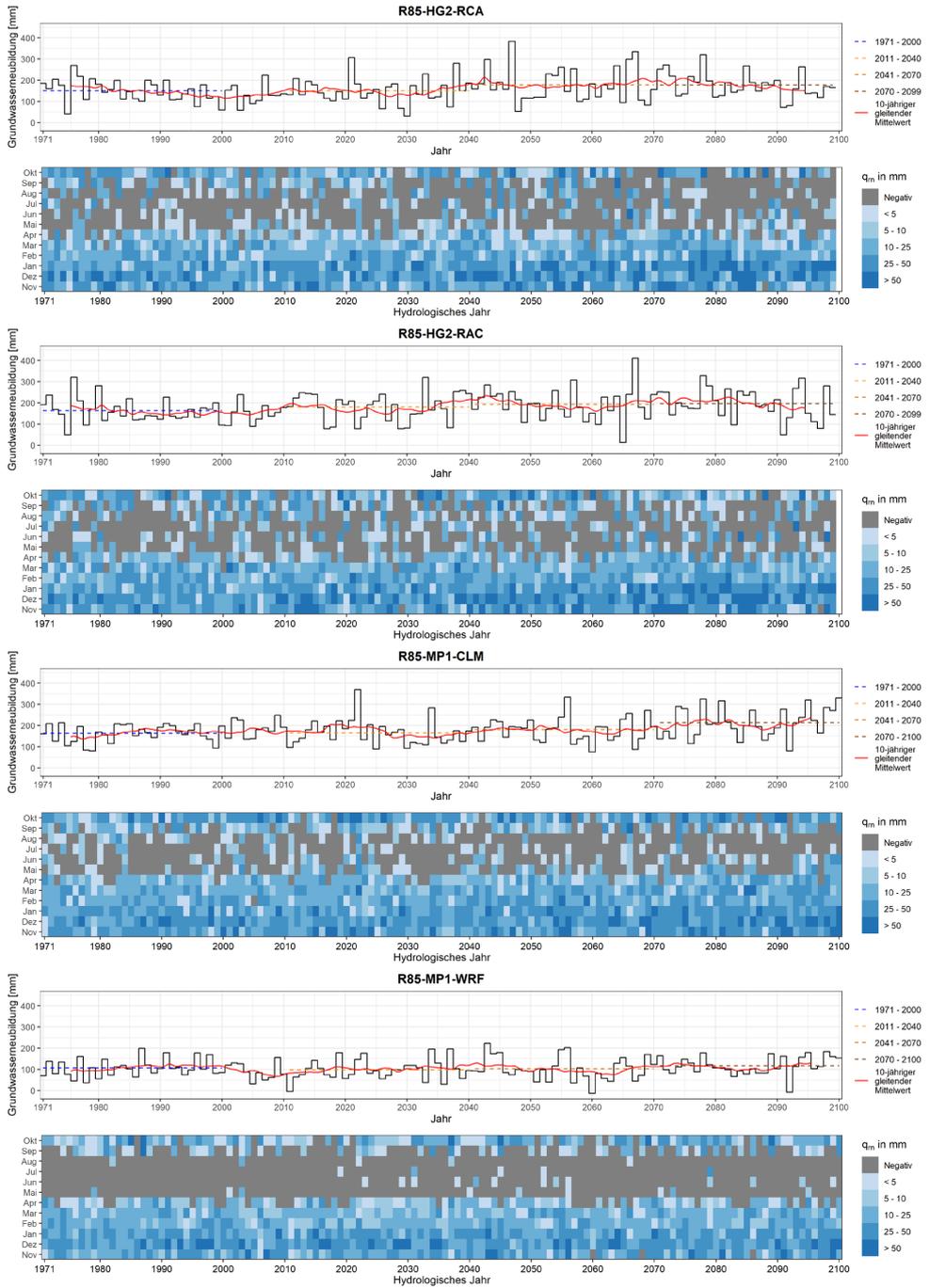


Abbildung F-9: Für jedes Modell: oben - jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung bis 2100 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten; unten - Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung. Klimamodelle: R85-HG2-RCA, R85-HG2-RAC, R85-MP1-CLM und R85-MP1-WRF.

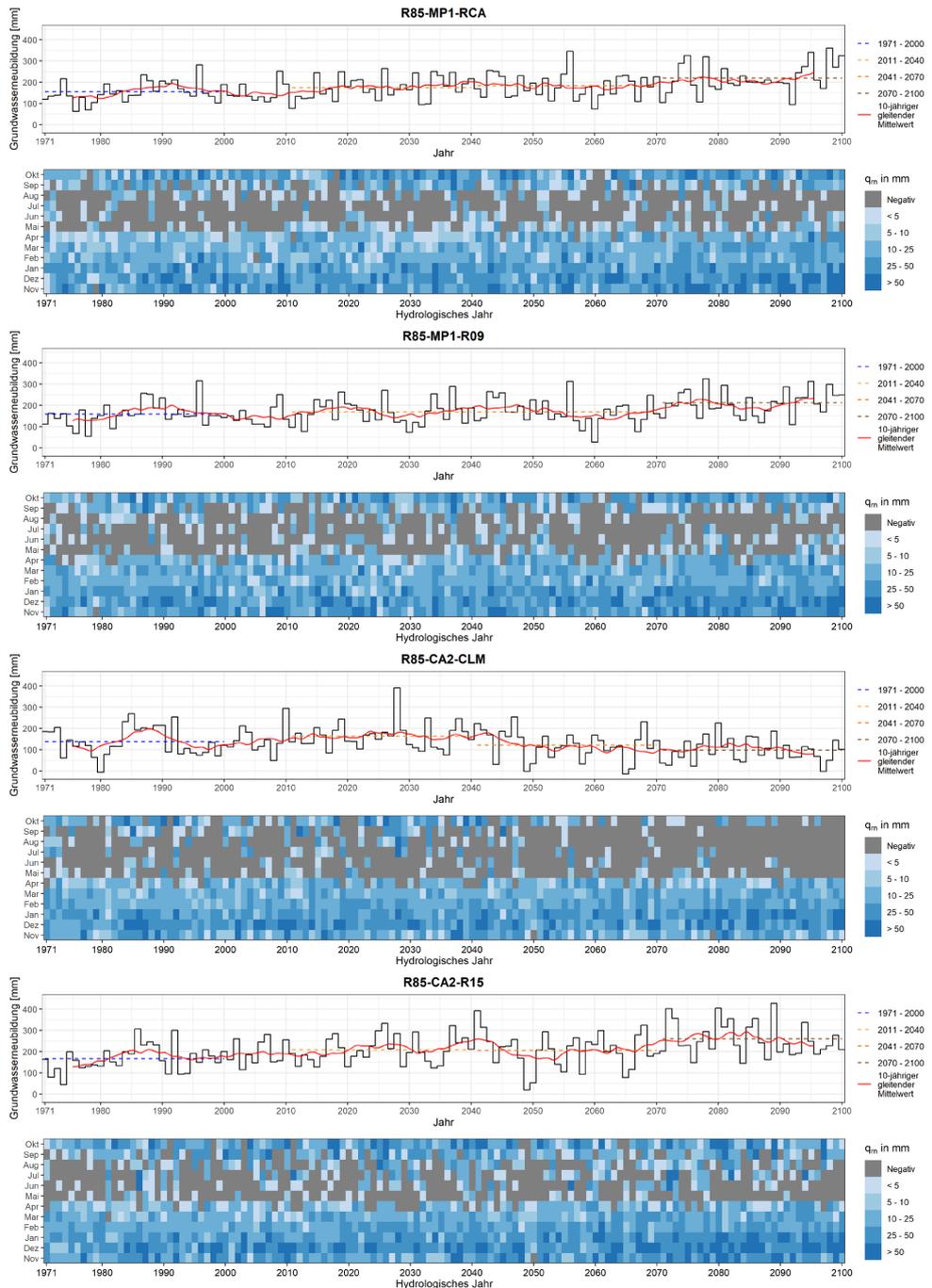


Abbildung F-10: Für jedes Modell: oben - jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung bis 2100 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten; unten - Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung. Klimamodelle: R85-MP1-RCA, R85-MP1-R09, R85-CA2-CLM und R85-CA2-R15.

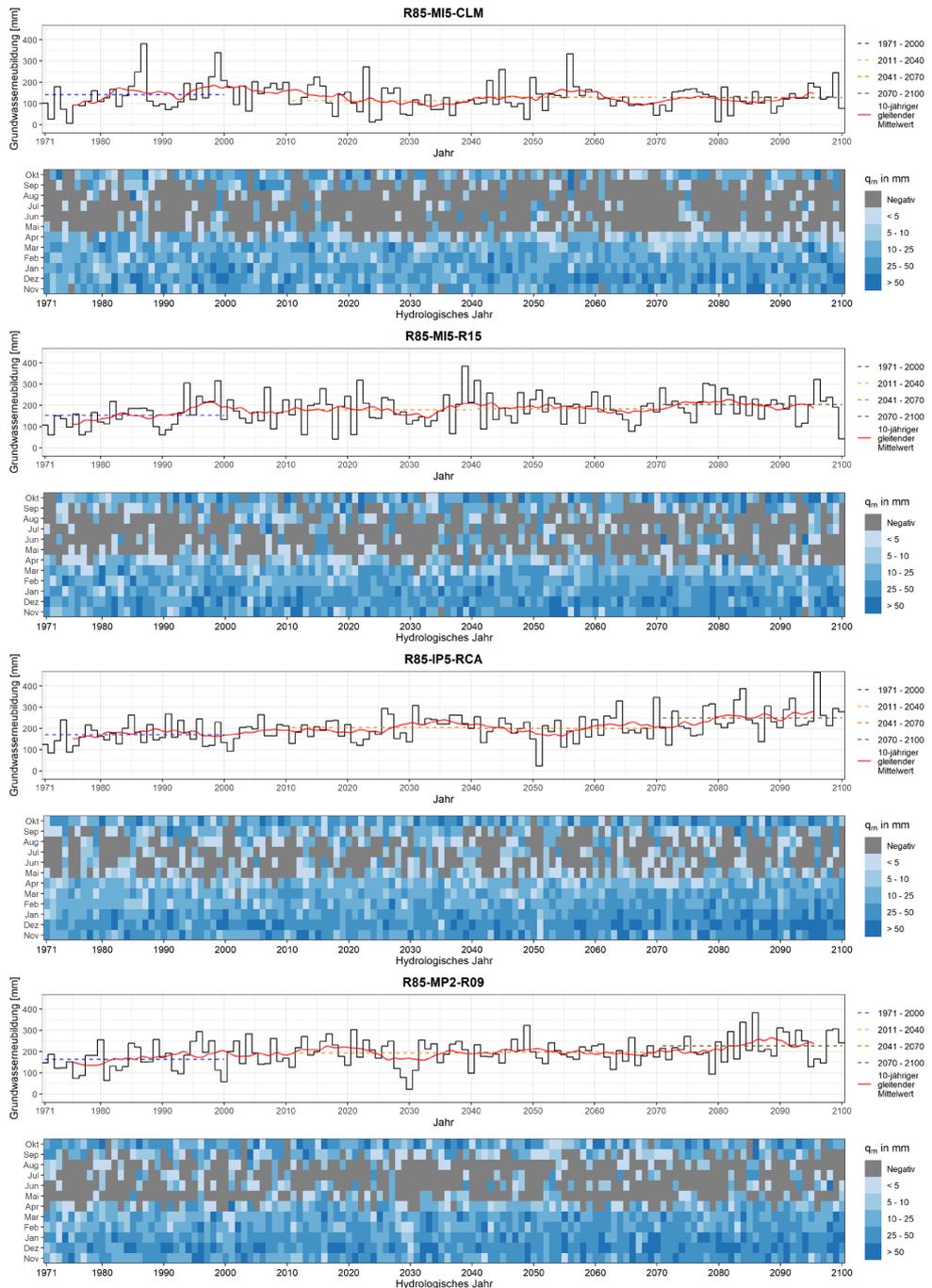


Abbildung F-11: Für jedes Modell: oben - jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung bis 2100 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten; unten - Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung. Klimamodelle: R85-MI5-CLM, R85-MI5-R15, R85-IP5-RCA und R85-MP2-R09.

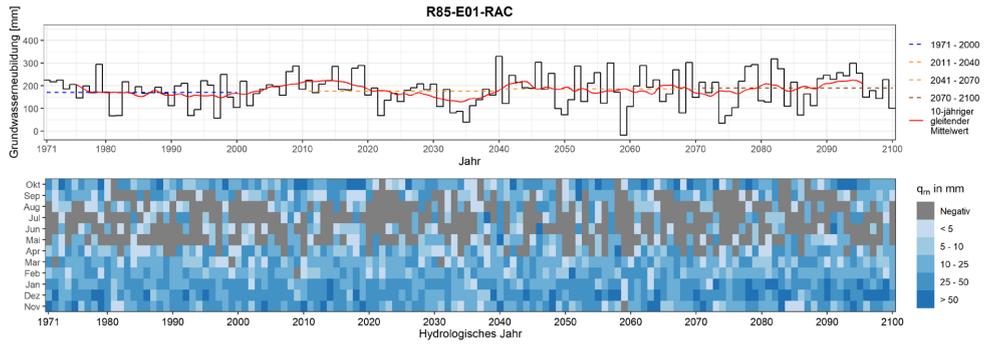


Abbildung F-12: Oben - jährliches räumliches Mittel der Netto-Grundwasserneubildung bis 2100 mit gleitendem 10-Jahres-Mittelwert und vier 30-Jahres-Mittelwerten; unten - Zeitreihendarstellung des räumlichen Mittels der monatlichen Netto-Grundwasserneubildung. Klimamodell: R85-E01-RAC.

## Appendix G: Darstellung der jährlichen räumlichen Mittelwerte der Netto-Grundwasserneubildung in Linienform

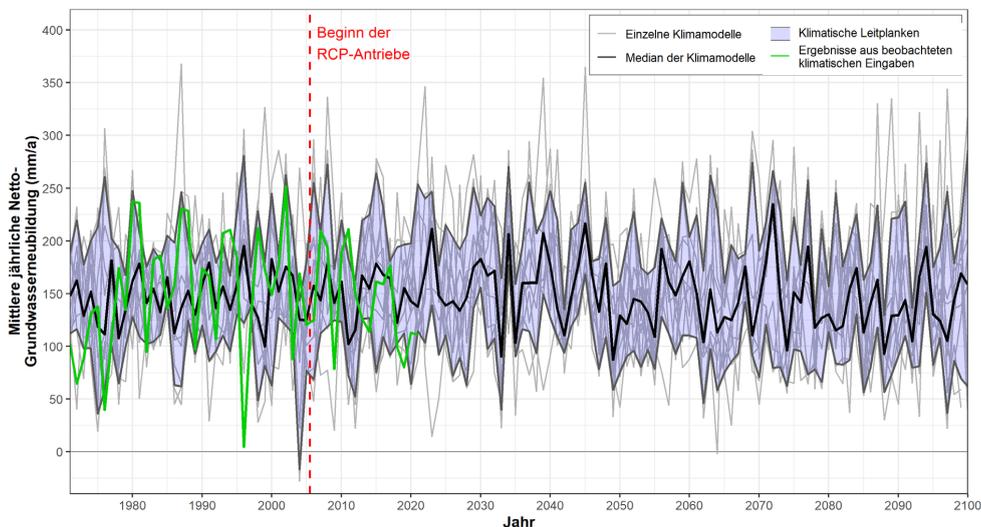


Abbildung G-1: Jährliche räumliche Mittelwerte der Netto-Grundwasserneubildung aller 11 RCP2.6-Mitglieder des DWD-Referenz-Ensembles (hellgrau), der Median der Ergebnisse für jedes Jahr (schwarz) und die „klimatischen Leitplanken“, die das 15. bis zum 85. Perzentil der Ergebnisse anzeigen (blau schattiert). Die simulierte Netto-Grundwasserneubildung auf der Grundlage der beobachteten historischen Klimaeingaben ist in hellgrün dargestellt.

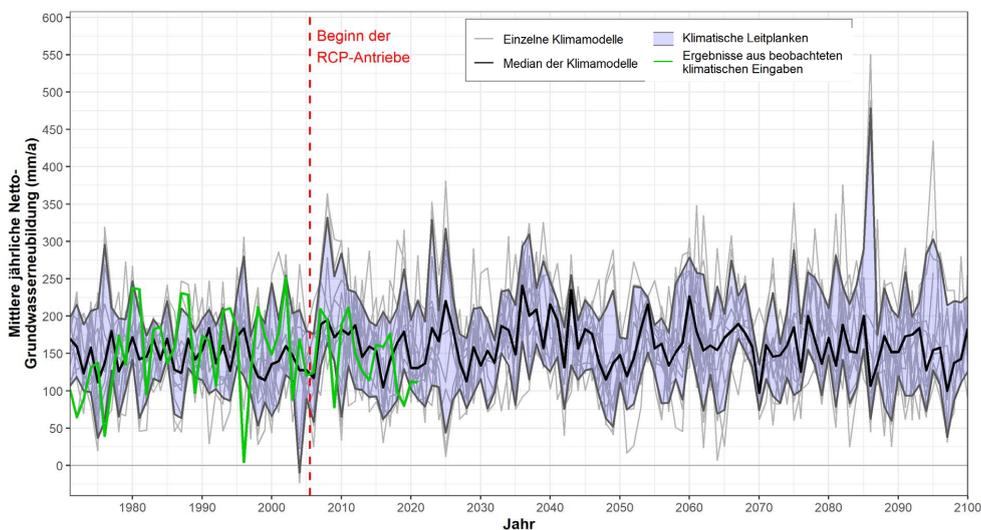


Abbildung G-2: Jährliche räumliche Mittelwerte der Netto-Grundwasserneubildung aller 12 RCP4.5-Mitglieder des DWD-Referenz-Ensembles (hellgrau), der Median der Ergebnisse für jedes Jahr (schwarz) und die „klimatischen Leitplanken“, die das 15. bis zum 85. Perzentil der Ergebnisse anzeigen (blau schattiert). Die simulierte Netto-Grundwasserneubildung auf der Grundlage der beobachteten historischen Klimaeingaben ist in hellgrün dargestellt.

## Appendix H: Auswertung des Bayern\_Ensemble\_v1

Das Bayern-Ensemble\_v1 besteht aus 8 RCP2.6 Modellen, 6 RCP4.5 Modellen und 12 RCP8.5 Modellen (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2020; Tabelle 9). Ein RCP2.6-Modell und zwei RCP8.5-Modelle, die zum WETTREG2013-RCM gehören, wurden im Jahr 2019 aus den DWD-Referenz-Ensembles entfernt (DWD, 2023a). Außerdem war das Modell RCP8.5 - ICHEC-EC-EARTH (r1) - UHOH-WRF361H nie Teil des DWD-Referenz-Ensembles. Daher reduziert sich die Anzahl der in dieser Auswertung einbezogenen Modelle auf 7 RCP2.6- und 9 RCP8.5-Modelle. Die Abb. F-1 zeigt die 30-jährigen gleitenden Mittelwerte der jährlichen Netto-Grundwasserneubildung für die Mitglieder des Bayern-Ensemble\_v1, mit denen das mGROWA-Modell ausgeführt wurde.

Durch die Verwendung des Bayern-Ensembles wird die gesamte Bandbreite der Modellergebnisse in Schleswig-Holstein noch schlechter erfasst als mit den Modellen des DWD-Kern-Ensembles. Dies gilt insbesondere für die Szenarien RCP4.5 und RCP8.5. Es ist zu berücksichtigen, dass das Untersuchungsgebiet, das für die Auswahl dieses Kernensembles verwendet wurde, weit von Schleswig-Holstein entfernt liegt (s. Teil 2; Kap. 4.8). Deswegen wird das Bayern\_Ensemble\_v1, insbesondere, wenn ausschließlich die auch im DWD-Referenz-Ensembles v2018 enthaltenen Klimamodelle berücksichtigt werden, als ungeeignet für hydrologische Analysen der Auswirkungen des Klimawandels in Schleswig-Holstein angesehen.

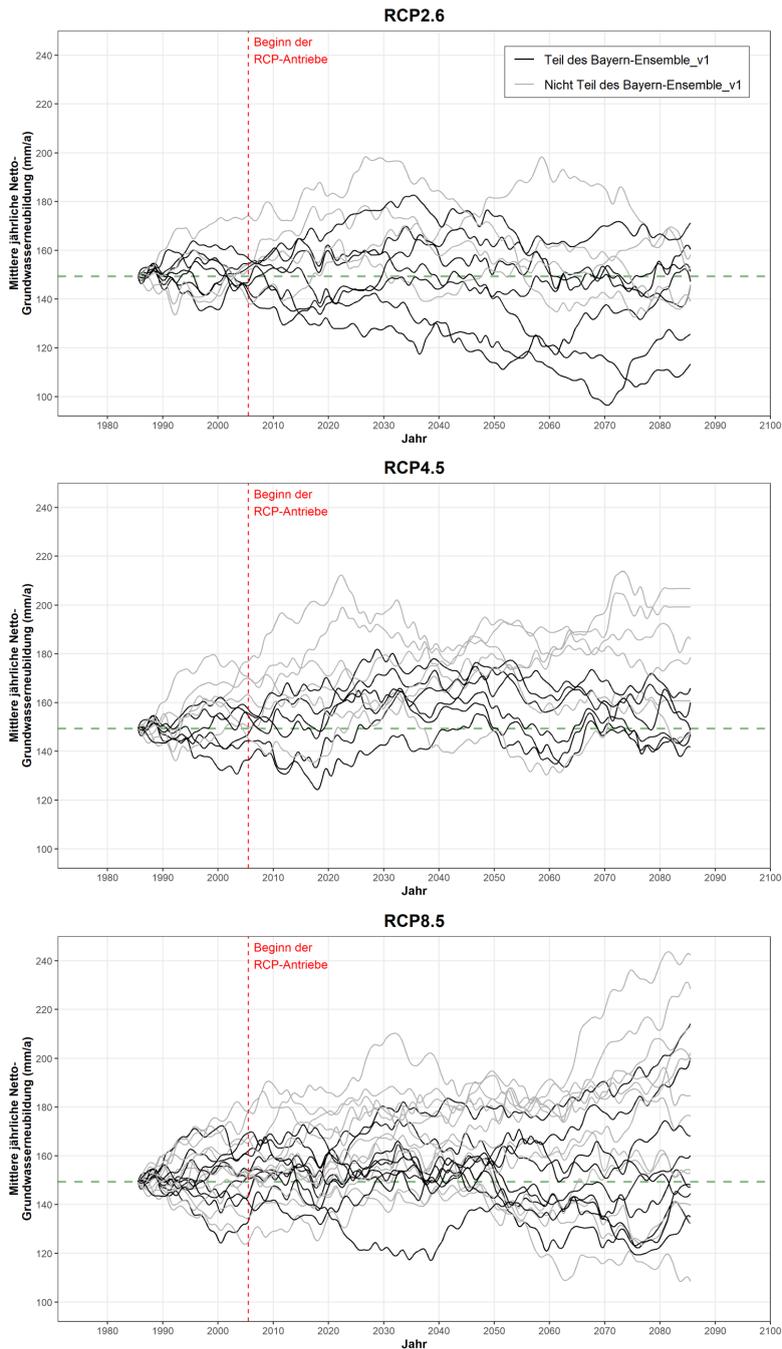


Abbildung H-1: Vergleich des Bayern-Ensemble\_v1 mit dem DWD-Referenz-Ensembles für alle RCP-Szenarien. Dargestellt sind die 30-jährigen gleitenden Mittelwerte der jährlichen Netto-Grundwasserneubildung für alle Klimamodelle, wobei diejenigen des Bayern-Ensemble\_v1 in schwarz und diejenigen des DWD-Referenz-Ensembles in grau dargestellt sind. Der Referenzwert für 1971-2000 wird durch die gestrichelte grüne Linie dargestellt.



Band / Volume 641

**Imaging spatial and temporal soil water content variations of the soil-plant continuum using ground penetrating radar**

L. Lärm (2024), xii, 303 pp

ISBN: 978-3-95806-778-3

Band / Volume 642

**Development of Iridium-based Nanostructures for Oxygen Evolution Reaction in PEM Water Electrolysis**

S. Park (2024), 135 pp

ISBN: 978-3-95806-779-0

Band / Volume 643

**Multi-dimensional GPR full-waveform inversion for small-scale hydrogeophysical soil characterization**

D. Hoven (2024), IX, 163 pp

ISBN: 978-3-95806-781-3

Band / Volume 644

**Analyse des Gastransports in komplexen Membransystemen durch Modellierung und multiskalige Simulation**

K. Wilkner (2024), VIII, 122 pp

ISBN: 978-3-95806-784-4

Band / Volume 645

**Deployment of Fuel Cell Vehicles in Road Transport and the Expansion of the Hydrogen Refueling Station Network: 2024 Update**

T. Grube; M. Rex (2024), iii, 26 pp

ISBN: 978-3-95806-786-8

Band / Volume 646

**Modellgestützte Analyse treibhausgasneutraler Transformationsstrategien für Deutschland**

T. F. Schöb (2024), XII, 228 pp

ISBN: 978-3-95806-789-9

Band / Volume 647

**Future Distribution Grids Using Geo-Referenced Synthetic Network Topologies**

A. Bandam (2024), ix, 237 pp

ISBN: 978-3-95806-790-5

Band / Volume 648

**Multi-scenario, high-resolution Lagrangian transport modeling for the analysis of the Asian tropopause aerosol layer**

J. H. Clemens (2024), 143 pp

ISBN: 978-3-95806-792-9

Band / Volume 649

**Prospektive Lebenszyklusanalysen von Power-to-Gas-Optionen**

J. C. Koj (2024), XVIII, 197 pp

ISBN: 978-3-95806-794-3

Band / Volume 650

**Assimilation of groundwater level and cosmic-ray neutron sensor soil moisture measurements into integrated terrestrial system models for better predictions**

F. Li (2024), xvii, 172 pp

ISBN: 978-3-95806-796-7

Band / Volume 651

**Integration of a rib-channel design to improve air-side contacting in solid oxide cell (SOC) stacks**

Y. S. Ayhan (2024), 82 pp

ISBN: 978-3-95806-797-4

Band / Volume 652

**Modelling Secondary Circulation in Convective Boundary Layer Using Large Eddy Simulation**

L. Zhang (2024), 84 pp

ISBN: 978-3-95806-799-8

Band / Volume 653

**Optionen zur Umsetzung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor**

S. Kraus (2025), XI, 317 pp

ISBN: 978-3-95806-802-5

Band / Volume 654

**Modellierung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung für Schleswig-Holstein im Beobachtungszeitraum 1961–2021 und für Klimaszenarien bis 2100**

I. McNamara, B. Tetzlaff, T. Wolters, F. Wendland (2025), 191 pp

ISBN: 978-3-95806-803-2

Weitere **Schriften des Verlags im Forschungszentrum Jülich** unter  
<http://www.zb1.fz-juelich.de/verlagextern1/index.asp>



Energie & Umwelt / Energy & Environment  
Band / Volume 654  
ISBN 978-3-95806-803-2

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

