



NLWKN.  
Für Mensch und Umwelt.  
Für Niedersachsen.

## Globaler Klimawandel

Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für die  
Grundwasserstände in Niedersachsen

KliBiW Phase 7 – Abschlussbericht



**Niedersachsen**



# Projektbeteiligte

## Herausgeber:



Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,  
Küsten und Naturschutz (NLWKN)

Autoren:

Betriebsstelle Hannover-Hildesheim:

Franziska Johannes, Uwe Petry

Betriebsstelle Cloppenburg:

Dr. Gunter Wriedt, Anne Tönnies-Lohmann

Unter Mitwirkung von:



Institut für Wasserwirtschaft und Hydrologie – Universität Hannover:

Ronja Iffland, Prof. Dr. Uwe Haberlandt



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften  
und Rohstoffe

**GEOZENTRUM HANNOVER**

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe:

Maximilian Nölscher, Dr. Stefan Broda



Landesamt für  
Bergbau, Energie  
und Geologie

**GEOZENTRUM HANNOVER**

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie:

Tobias Schlinsog, Melanie Witthöft, Dr. Jörg Elbracht





## Kurzfassung

Das Projekt KliBiW (Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland) hat das Ziel, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Niedersachsen zu identifizieren und zu quantifizieren. Dabei geht es zum einen um den Aufbau einer Datenbasis und die Schaffung von fachlichen Grundlagen, zum anderen um die Erweiterung der Methodenkompetenzen des Gewässerkundlichen Landesdienstes im NLWKN. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen dazu, die Akteure in Politik, Verwaltung und Kommunen zu informieren und zu beraten. Anhand dieses Wissens können künftig nachhaltige Handlungskonzepte und Anpassungsstrategien in der niedersächsischen Wasserwirtschaft entwickelt werden.

In der Projektphase 7 werden die Entwicklungen der Grundwasserstände unter dem Einfluss des globalen Klimawandels untersucht und bewertet.

Die Analysen der klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit erfolgten niedersachsenweit auf Basis von Tageswerten von meteorologischen Stationen des Deutschen Wetterdienstes. Die Ergebnisse zeigen, dass in der Vergangenheit die Temperaturen landesweit bereits deutlich gestiegen sind. Die Niederschlagssummen haben leicht zugenommen, wobei die Werte im Sommerhalbjahr relativ unverändert geblieben sind. Die Verdunstung hat landesweit zugenommen, mit leichten Schwerpunkten im Sommerhalbjahr. Die Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz, also der Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung, liegen zumeist innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite. Gleichwohl zeigen sich abnehmende Tendenzen, vor allem im Sommerhalbjahr. Bei Betrachtung der thermischen Vegetationsperiode zeigt sich, dass der Beginn der Vegetationsphase inzwischen früher einsetzt als noch vor einigen Jahrzehnten, die Dauer der Vegetationsperiode länger anhält und das Ende tendenziell später ins Jahr rückt.

Die Analysen der zukünftigen Entwicklungen basieren auf einem Szenario, das Annahmen ohne jegliche Anstrengungen zum Klimaschutz in Zukunft trifft und davon ausgeht, dass die weltweit anthropogen bedingten Treibhausgas-Emissionen bzw. -Konzentrationen bis zum Jahr 2100 weiter zunehmen werden (RCP8.5). Diese Daten dienen als Antrieb für ein Ensemble aus acht regionalen Klimamodellen (sog. Kern-Ensemble des Bund-Länder-Fachgesprächs), die die Bandbreite der möglichen zukünftigen klimatischen Entwicklungen auf Basis von Tageswerten abbilden. Die zukünftigen Veränderungen der Grundwasserstände werden anhand dieses Ensembles an möglichst wenig anthropogen beeinflussten Grundwassermessstellen in Niedersachsen mit Hilfe unterschiedlicher Methoden des NLWKN Cloppenburg, des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Leibniz

Universität Hannover, der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe sowie des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie simuliert.

Die Ergebnisse für die zukünftigen klimatischen Verhältnisse zeigen, dass die Temperaturen landesweit weiter deutlich zunehmen werden. Die Niederschlagsmengen nehmen ebenfalls zu, insbesondere im Norden und Westen des Landes und saisonal in den Wintermonaten. In den Sommermonaten lässt sich keine eindeutige Entwicklung erkennen. Die Verdunstung zeigt für die Zukunft eine landesweite Zunahme, insbesondere in den Sommermonaten. Da sich zum einen die Sommerniederschläge kaum verändern, gleichzeitig ganzjährig höhere Temperaturen erwartet werden, die zu einer höheren Verdunstung führen, verringert sich zukünftig die klimatische Wasserbilanz, vor allem in den Sommermonaten. In den Wintermonaten wird eine leichte Zunahme der Wasserbilanz erwartet. Die Entwicklung der thermischen Vegetationsperiode für die Zukunft zeigt mit der Erwärmung einhergehend einen früheren Beginn der Vegetationsphase sowie eine längere Dauer und ein späteres Ende.

Die Ergebnisse für die zukünftigen hydrogeologischen Verhältnisse zeigen, dass es alleine durch die Auswirkungen des Klimawandels zu einer ausgeprägteren Jahresamplitude der Grundwasserstände kommen kann. Während sich die Grundwassertiefstände im landesweiten Mittel kaum verändern, kann es regional jedoch zu Absenkungen kommen. Auch die Grundwasserhochstände verändern sich insgesamt bei regional leichten Zunahmen. Die Gesamtzahl der Monate mit Grundwassertiefständen (und damit letztlich auch die mögliche Dauer von Grundwasserdürrephasen) kann sich regional unterschiedlich entwickeln, wobei insgesamt eine Zunahme erkennbar ist. Die Gesamtzahl der Monate mit Grundwasserhochständen zeigt ebenfalls regional uneinheitliche Entwicklungen mit insgesamt leicht zunehmenden Tendenzen. Der Eintrittszeitpunkt der Jahresminima bzw. Jahresmaxima der Grundwasserstände verschiebt sich zukünftig im Mittel geringfügig um einige Tage im Jahr nach hinten. Dabei gibt es kaum regionale Unterschiede.

Anthropogene Effekte auf die Grundwasserstände, z.B. ein erhöhter Bedarf an Wasser(entnahmen) aufgrund steigender Temperaturen und erhöhter Verdunstung, können diese Veränderungen verstärken. Sie bleiben hierbei jedoch zunächst unberücksichtigt, da die betrachteten Messstellen vorwiegend durch die natürliche Witterung beeinflusst sind.

Gleichwohl sind auch die beobachteten Trends der Vergangenheit bis heute ein wichtiger Aspekt für die Einschätzung zukünftiger Entwicklungen der Grundwasserstände. So können sich in den Zeitreihen Effekte eines sich wandelnden Klimas bereits bemerkbar machen, die in den Modelldaten nicht oder nur unzureichend abgebildet werden. Dahingehend belegen

Messdaten langer Beobachtungsreihen, welche zum Teil auch anthropogen beeinflusst sind, seit Beginn der 2000er Jahre im landesweiten Mittel eine relativ eindeutige Absenkung der mittleren Grundwasserstände. Dieser Effekt wurde vor allem durch die Trockenjahre 2018 bis 2020 nochmals verstärkt. Das resultierende Niveau muss in die Bandbreiten der projizierten Modellwerte eingeordnet werden, um im Sinne des Vorsorgeprinzips eine verlässliche Basis für die Einschätzung der Entwicklungen in der nahen Zukunft zu ermöglichen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Projektgrundlagen .....</b>	<b>2</b>
	2.1 Organisation und Zielsetzung .....	2
	2.2 Untersuchungsgebiet .....	3
	2.3 Grundwasserkörper .....	3
	2.4 Messstellenauswahl .....	4
	2.5 Grundwasserstandsdaten .....	5
	2.6 Klimadaten .....	5
	2.7 Vorgehensweise .....	7
<b>3</b>	<b>Aufbereitung der Simulationsergebnisse .....</b>	<b>9</b>
	3.1 Indikatoren zur Charakterisierung der Grundwasserzustände .....	9
	3.2 Berechnung der Änderungssignale .....	11
	3.3 Darstellungsarten .....	11
<b>4</b>	<b>Betrachtung der klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit bis heute .....</b>	<b>12</b>
	4.1 Datenbasis .....	12
	4.2 Methodik .....	12
	4.3 Ergebnisse der Trendanalysen .....	13
	4.4 Zusammenfassung .....	18
<b>5</b>	<b>Das Klimamodell-Ensemble von KliBiW .....</b>	<b>19</b>
	5.1 Globale und regionale Klimaprojektionen .....	19
	5.2 Ensemble-Mitglieder in KliBiW .....	20
	5.3 Aufbereitung von Klimamodelldaten .....	22
<b>6</b>	<b>Analysen der möglichen klimatischen Verhältnisse der Zukunft .....</b>	<b>23</b>
	6.1 Datenbasis .....	23
	6.2 Methodik .....	23
	6.3 Ergebnisse .....	23
	6.4 Zusammenfassung .....	39
<b>7</b>	<b>Analyse der möglichen Grundwasserstandsverhältnisse der Zukunft .....</b>	<b>40</b>
	7.1 Modellierung der Grundwasserstandsdynamik in Teilprojekt A .....	40
	7.1.1 Überblick .....	40
	7.1.2 Besonderheiten der Datenaufbereitung .....	40
	7.1.3 Modellbeschreibung .....	40
	7.1.3.1 Einleitung .....	40
	7.1.3.2 Grundwasserneubildung .....	40
	7.1.3.3 Ungesättigte Zone .....	41
	7.1.3.4 Grundwasser .....	41
	7.1.4 Kalibrierung und Validierung des Modellansatzes .....	42
	7.1.4.1 Vorgehensweise .....	42
	7.1.4.2 Parameteroptimierung .....	43
	7.1.4.3 Gütemaße .....	44
	7.1.4.4 Split-Sample-Test KALVALv1 .....	44
	7.1.4.5 Split-Sample-Test PAROPTv1 .....	47
	7.1.4.6 Besonderheiten der Kalibrierung und Validierung .....	51
	7.1.4.7 Diskussion des Modells für die Verwendung im KLBIW7-Projekt .....	55
	7.1.5 Auswahl der Messstellen für die Auswertung .....	56
	7.1.6 Berechnung der zukünftigen Grundwasserstände auf Basis von Klimaprojektionen .....	57
	7.1.7 Ergebnisse für die Simulation ausgewählter Kenngrößen .....	57
	7.1.7.1 Überblick .....	57
	7.1.7.2 Mittlerer Jahrestiefstand .....	58
	7.1.7.3 Mittleres Jahreshochstand .....	60
	7.1.7.4 Mittlere Jahresamplitude .....	62
	7.1.7.5 Anzahl der Monate mit Grundwassertiefstand .....	64
	7.1.7.6 Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand .....	66
	7.1.7.7 Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums .....	68

7.1.7.8	Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums .....	70
7.1.7.9	Jahresganglinienvergleich .....	72
7.1.8	Zusammenfassung und Fazit Teilprojekt A .....	74
7.2	Modellierung veränderter zukünftiger Grundwasserstandsveränderungen auf Basis statistischer Ansätze (Teilprojekt B) .....	78
7.2.1	Modellbeschreibung .....	78
7.2.2	Kalibrierung und Validierung .....	80
7.2.3	Simulation ausgewählter Kenngrößen .....	83
7.2.4	Ergebnisse .....	84
7.2.4.1	Mittlerer Jahrestiefstand .....	86
7.2.4.2	Mittlerer Jahreshochstand .....	88
7.2.4.3	Mittlerer Jahresamplitude .....	90
7.2.4.4	Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate .....	92
7.2.4.5	Gesamtsumme der Hochstandsmonate .....	94
7.2.4.6	Mittlerer Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums .....	96
7.2.4.7	Mittlerer Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums .....	98
7.2.5	Zusammenfassung .....	101
7.3	Modellierung veränderter zukünftiger Grundwasserstandsveränderungen mit Hilfe KNN-basierter Vorhersage (Teilprojekt C) .....	102
7.3.1	Modellbeschreibung .....	102
7.3.2	Kalibrierung und Validierung .....	103
7.3.3	Simulation ausgewählter Kenngrößen .....	104
7.3.4	Zusammenfassung .....	115
7.4	Modellierung zukünftiger Grundwasserstandsveränderungen mit Hilfe von Grundwasserströmungsmodellen (Teilprojekt D) .....	116
7.4.1	Modellbeschreibung .....	116
7.4.1.1	Sandelermöns .....	116
7.4.1.2	Vörden-Hunteburg .....	118
7.4.2	Kalibrierung .....	120
7.4.2.1	Sandelermöns .....	120
7.4.2.2	Vörden-Hunteburg .....	124
7.4.3	Ergebnisse der Kernindikatoren .....	128
7.4.3.1	Ergebnisse Sandelermöns .....	130
7.4.3.2	Ergebnisse Vörden-Hunteburg .....	138
7.4.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	145
7.4.4	Schlussfolgerung .....	146
7.4.5	Zusammenfassung .....	147
<b>8</b>	<b>Ergebnisvergleich der Teilprojekte A, B, C .....</b>	<b>148</b>
8.1	Vorgehensweise .....	148
8.2	Mittleres Jahresminimum .....	151
8.3	Mittleres Jahresmaximum .....	151
8.4	Mittlere Jahresamplitude .....	152
8.5	Anzahl der Monate mit Grundwassertiefstand .....	152
8.6	Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand .....	152
8.7	Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums .....	152
8.8	Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums .....	152
<b>9</b>	<b>Detailvergleich der Ergebnisse zwischen den einzelnen Teilprojekten .....</b>	<b>154</b>
9.1	Einführung .....	154
9.2	Methodisches zum Detailvergleich .....	154
9.3	Detailvergleich .....	154
9.3.1	Sandelermöns .....	155
9.3.1.1	Messstelle 9610997 .....	157
9.3.1.2	Messstelle 9850270 .....	159
9.3.2	Vörden-Hunteburg .....	162
9.3.2.1	Messstelle 9700133 .....	163
9.3.2.2	Messstelle 9700234 .....	165
9.3.2.3	Messstelle 9700269 .....	168
9.4	Zusammenfassung .....	170



<b>10</b>	<b>Schlussfolgerung</b> .....	<b>171</b>
	10.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse über die zukünftigen Entwicklungen der Grundwasserstände in Niedersachsen .....	171
	10.2 Diskussion.....	172
<b>11</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>175</b>
<b>12</b>	<b>Glossar</b> .....	<b>177</b>
<b>13</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>180</b>
<b>14</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>184</b>
	14.1 Anhang zu Teilprojekt A .....	184
	14.2 Anhang zu Teilprojekt C .....	203
	14.3 Anhang zu Teilprojekt D .....	206

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Übersicht der Projektkoordination und der methodischen Ansätze der Teilprojekte in Phase 7. ....	2
Abbildung 2.2: Abgrenzung der Auswerteregionen.....	3
Abbildung 2.3: Abgrenzung der Grundwasserkörper.....	3
Abbildung 2.4: Übersicht Vorauswahl von 962 Grundwassermessstellen .....	5
Abbildung 2.5: Schema zum Ablauf der Modellierungen in KliBiW Phase 7 .....	8
Abbildung 3.1: Rechenschema zur Erstellung der Balkenplots für die regional aggregierte Ableitung der maximalen, minimalen und mittleren Änderungsbeträge pro Gebiet. ....	11
Abbildung 4.1: Übersicht über die für die Trendanalysen verwendeten Klima- und Niederschlagsstationen .....	12
Abbildung 4.2: Trends der mittleren Temperatur ( $T_{av}$ ) an den Messstationen des DWD für den Zeitraum 1951 bis 2021 bzw. 1971 bis 2021 .....	13
Abbildung 4.3: Trends der Niederschlagssummen ( $P_{sum}$ ) an den Messstationen des DWD für den Zeitraum 1951 bis 2021 und den Zeitraum 1971 bis 2021 .....	14
Abbildung 4.4: Trends der potentiellen Evapotranspiration (ETP) an den Messstationen des DWD für den Zeitraum 1951 bis 2021 und den Zeitraum 1971 bis 2021 .....	15
Abbildung 4.5: Trends der klimatischen Wasserbilanz (KWB) an den Messstationen des DWD für den Zeitraum 1951 bis 2021 und den Zeitraum 1971 bis 2021 .....	16
Abbildung 4.6: Trends der thermischen Vegetationsperiode (TVP) an den Messstationen des DWD für den Zeitraum 1951 bis 2021 und den Zeitraum 1971 bis 2021 .....	17
Abbildung 5.1: Die Szenarien der Treibhausgas-Entwicklung aus dem 5. Sachstandsbericht des IPCC sowie die daraus resultierende Veränderung der Globaltemperatur (bezogen auf 1986-2005) im Vergleich, jeweils mit der Anzahl der für die Berechnung verwendeten Modelle aus CMIP5 (IPCC, 2013/2014) .....	19
Abbildung 5.2: Schema des Erdsystemmodells mit deren Wechselwirkungen untereinander (physikalische Klimasystem in Blau, das biogeochemische System in grün und der Einfluss des Menschen in Rot dargestellt). Latif 2009, S.15 .....	20
Abbildung 6.1: Die Tagesmitteltemperatur für die Referenzperiode 1981 bis 2010 für das hydrologische Jahr (November bis Oktober) sowie das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) und das Winterhalbjahr (November bis April). Mittlere projizierte Veränderung der Tagesmitteltemperatur in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5 gegenüber dem Referenzzeitraum für die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2071 bis 2100) Zukunft. ....	25
Abbildung 6.2: Bandbreiten der Änderungssignale nach Regionen. Änderung der Tagesmitteltemperatur gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 (in °C) für das hydrologische Kalenderjahr und Sommer- und Winterhalbjahr. ....	26
Abbildung 6.3: Bandbreiten der Tagesmitteltemperatur für Niedersachsen. Absolute Werte für das hydrologische Kalenderjahr sowie das Sommer- und Winterhalbjahr.....	26
Abbildung 6.4: Die Niederschlagssumme für die Referenzperiode 1981 bis 2010 für das hydrologische Jahr (November bis Oktober) sowie das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) und das Winterhalbjahr (November bis April). Mittlere projizierte Veränderung der Niederschlagssumme in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5 gegenüber dem Referenzzeitraum für die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2071 bis 2100) Zukunft. ....	28
Abbildung 6.5: Bandbreiten der Änderungssignale nach Regionen. Änderung der Niederschlagssumme gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 (in mm) für das hydrologische Kalenderjahr und Sommer- und Winterhalbjahr. ....	29

Abbildung 6.6: Bandbreiten der Niederschlagssummen für Niedersachsen. Absolute Werte für das hydrologische Kalenderjahr sowie das Sommer- und Winterhalbjahr. ....	29
Abbildung 6.7: Die Verdunstung für die Referenzperiode 1981 bis 2010 für das hydrologische Jahr (November bis Oktober) sowie das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) und das Winterhalbjahr (November bis April). Mittlere projizierte Veränderung der Verdunstung in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5 gegenüber dem Referenzzeitraum für die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2071 bis 2100) Zukunft. ....	31
Abbildung 6.8: Bandbreiten der Änderungssignale nach Regionen. Änderung der Verdunstung gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 (in mm) für das hydrologische Kalenderjahr und Sommer- und Winterhalbjahr. ....	32
Abbildung 6.9: Bandbreiten der Verdunstung für Niedersachsen. Absolute Werte für das hydrologische Kalenderjahr sowie das Sommer- und Winterhalbjahr. ....	32
Abbildung 6.10: Die klimatische Wasserbilanz für die Referenzperiode 1981 bis 2010 für das hydrologische Jahr (November bis Oktober) sowie das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) und das Winterhalbjahr (November bis April). Mittlere projizierte Veränderung der klimatischen Wasserbilanz in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5 gegenüber dem Referenzzeitraum für die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2071 bis 2100) Zukunft. ....	34
Abbildung 6.11: Bandbreiten der Änderungssignale nach Regionen. Änderung der klimatischen Wasserbilanz gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 (in mm) für das hydrologische Kalenderjahr und Sommer- und Winterhalbjahr. ....	35
Abbildung 6.12: Bandbreiten der Klimatischen Wasserbilanz für Niedersachsen. Absolute Werte für das hydrologische Kalenderjahr sowie das Sommer- und Winterhalbjahr. ....	35
Abbildung 6.13: Die thermische Vegetationsperiode mit mittlerem Beginn, Dauer und Ende für die Referenzperiode 1981 bis 2010 für das Kalenderjahr (Januar bis Dezember) sowie das Sommerhalbjahr (April bis September) und das Winterhalbjahr (Oktober bis März). Mittlere projizierte Veränderung der thermischen Vegetationsperiode (Beginn, Dauer und Ende) in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5 gegenüber dem Referenzzeitraum für die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2071 bis 2100) Zukunft. ....	37
Abbildung 6.14: Bandbreiten der Änderungssignale nach Regionen. Änderung der thermischen Vegetationsperiode gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 (in Tagen) für den Beginn, die Dauer und das Ende. ....	38
Abbildung 6.15: Bandbreiten der thermischen Vegetationsperiode (Beginn, Dauer, Ende) für Niedersachsen. Absolute Werte für das hydrologische Kalenderjahr sowie das Sommer- und Winterhalbjahr. ....	38
Abbildung 7.1: Modellansatz zur Simulation der Grundwasserneubildung in Teilprojekt A. Modellkonzept. ....	42
Abbildung 7.2: Ergebnisse Split-Sample-Test KALVALv1: Scatterplot und Boxplot für ausgewählte Gütekriterien. ....	45
Abbildung 7.3: Ergebnisse Split-Sample-Test KALVALv1: ausgewählte Gütekriterien und räumliche Verteilung. ....	46
Abbildung 7.4: Niederschlagsentwicklung in Niedersachsen, Jahresniederschläge und saisonale Niederschläge. Durchgezogene Linie: Mittelwert 1991-2020; gestrichelte Linie: gleitender Mittelwert über 5 Jahre. Datenquelle: DWD CDC 2022. ....	48
Abbildung 7.5: Ergebnisse Split-Sample-Test PAROPTv1: Scatterplot und Boxplot für ausgewählte Gütekriterien. ....	49
Abbildung 7.6: Ergebnisse Split-Sample-Test PAROPTv1: ausgewählte Gütekriterien und räumliche Verteilung. ....	50
Abbildung 7.7: Kalibrierungsergebnis Messstelle 9700002 Altenoythe. ....	52
Abbildung 7.8: Kalibrierungsergebnis Messstelle 9700222 Scharrelerdamm 3/79. ....	52
Abbildung 7.9: Kalibrierungsergebnis Messstelle 9700006 Astrup. ....	53
Abbildung 7.10: Kalibrierungsergebnis Messstelle 9700016 Bethen 2/6 I. ....	53

Abbildung 7.11: Anomalie der 80er Jahre (in subjektiven Stufen von 0 - nicht erkennbar bis 3 - deutliche Abweichung ohne Überlappung der Wertebereiche von beobachteter und simulierter Ganglinie) im Verhältnis zu Grundwasserflurabstand (in Metern, links) und Ganglinientypus (rechts, Indikator RangeRatio: hohe Werte niederungstypisch, niedrige Werte geesttypisch) .....	54
Abbildung 7.12: Finale Messstellenauswahl im Teilprojekt A und Regionen zur räumlich differenzierten Auswertung .....	57
Abbildung 7.13: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung des mittleren Jahrestiefstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (in Metern).....	58
Abbildung 7.14: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des mittleren Jahrestiefstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. ....	59
Abbildung 7.15: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung des mittleren Jahreshochstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (in Metern).....	60
Abbildung 7.16: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des mittleren Jahreshochstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. ....	61
Abbildung 7.17: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung der mittleren Jahresamplitude gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (in Metern).....	62
Abbildung 7.18: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der mittleren Jahresamplitude gegenüber der Referenzperiode 1981-2010. ....	63
Abbildung 7.19: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung der Anzahl der Monate mit Grundwasserniedrigstand gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (im gesamten 30-Jahres-Zeitraum).....	64
Abbildung 7.20: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der Anzahl der Monate mit Grundwasserniedrigstand gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (im gesamten 30-Jahres-Zeitraum).....	65
Abbildung 7.21: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung der Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (im gesamten 30-Jahres-Zeitraum).....	66
Abbildung 7.22: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (im gesamten 30-Jahres-Zeitraum).....	67
Abbildung 7.23: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung des Eintrittszeitpunktes des Jahresminimums gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (in Monaten; Werte < 0 bedeuten einen früheren Eintrittszeitpunkt, Werte > 0 einen späteren Eintrittszeitpunkt).....	68
Abbildung 7.24: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des Eintrittszeitpunktes des Jahresminimums gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (Werte < 0 bedeuten einen früheren Eintrittszeitpunkt, Werte > 0 einen späteren Eintrittszeitpunkt). ....	69
Abbildung 7.25: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Naturregion - Änderung des Eintrittszeitpunktes des Jahresmaximums gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (in Monaten; Werte < 0 bedeuten einen früheren Eintrittszeitpunkt, Werte > 0 einen späteren Eintrittszeitpunkt).....	70
Abbildung 7.26: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des Eintrittszeitpunktes des Jahresmaximums gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (Werte < 0 bedeuten einen früheren Eintrittszeitpunkt, Werte > 0 einen späteren Eintrittszeitpunkt). ....	71
Abbildung 7.27: Durchschnittlicher Jahresgang der Grundwasserstände für die ausgewerteten Zeithorizonte und Regionen (Referenzperiode 1981-2010).....	73
Abbildung 7.28: Änderung der Grundwasserstandsdynamik (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) im Teilprojekt A - Kernindikatoren. ....	76

Abbildung 7.29: Änderung der Grundwasserstdynamik (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) im Teilprojekt A - Sonstige Indikatoren. ....	77
Abbildung 7.30: Übersicht über verfügbare Stationen .....	78
Abbildung 7.31: Schema zur Berechnung monatlicher Grundwasserstands- (GWL) und Indexzeitreihen (MI) unter Berücksichtigung gleitender Mittelwerte (Periodenbreite x Monate) und Zeitverzögerung (y Monate). Eine Verschiebung um null Monate bedeutet, dass der Zeitraum gleichzeitig mit dem Monat der betrachteten Variablen endet. ....	79
Abbildung 7.32: Kalibrierungs- (orange) und Validierungsergebnisse (blau) der Regressions- und Referenzmodelle von 114 Stationen in Form des Bias und RMSE der mittleren Grundwasserstände, sowie normalisiert mit der Standardabweichung; Zur besseren Darstellung wurden extreme Ausreißer ausgeblendet (entsprechen < 5 % der Stationen). ....	81
Abbildung 7.33: Kartendarstellung der Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse basierend auf dem NSE .....	81
Abbildung 7.34: Modellgleichung und Ganglinienvergleich der Beobachtung (blau) und der Simulationsergebnisse (grün) beispielhaft für die Station Räderloh II; senkrechte Markierung trennt Validierungs- von Kalibrierungszeitraum. ....	82
Abbildung 7.35: Anzahl der Regressoren pro Modell. ....	82
Abbildung 7.36: Häufigkeit der Einbeziehung der Indizes (unabhängig von gleitenden Mittelwerten und Zeitverzögerungen). ....	83
Abbildung 7.37: Mittlere Abweichung ausgewählter Indikatoren im Referenzzeitraum; Zur besseren Darstellung wurden extreme Ausreißer ausgeblendet (entsprechen < 5 % der Stationen). ....	84
Abbildung 7.38: Mittlere Änderungssignale ausgewählter Indikatoren gruppiert nach Regionen (Kreismarkierung: Mittel aller mittleren 734 Stationswerte; Balkenenden: Mittel aller Minima/ Maxima der 734 Stationswerte). Regionen mit weniger als 20 Stationen (n < 20) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut. ....	85
Abbildung 7.39: Bandbreiten der Änderungen der mittleren Jahrestiefstände in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen (n < 20) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut. ....	86
Abbildung 7.40: Räumliche Verteilung der Änderungen der mittleren Jahrestiefstände als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum. ....	87
Abbildung 7.41: Bandbreiten der Änderungen der mittleren Jahreshochstände in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen (n < 20) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut. ....	88
Abbildung 7.42: Räumliche Verteilung der Änderungen der mittleren Jahreshochstände als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum. ....	89
Abbildung 7.43: Bandbreiten der Änderungen der mittleren Jahresamplituden in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen (n < 20) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut. ....	90
Abbildung 7.44: Räumliche Verteilung der Änderungen der mittleren Jahresamplituden als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum. ....	91
Abbildung 7.45: Bandbreiten der Änderungen der Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen (n < 20) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut. ....	92
Abbildung 7.46: Räumliche Verteilung der Änderungen der Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum. ....	93

Abbildung 7.47: Bandbreiten der Änderungen der Gesamtsumme der Hochstandsmonate in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen ( $n < 20$ ) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut. ....	94
Abbildung 7.48: Räumliche Verteilung der Änderungen der Gesamtsumme der Hochstandsmonate als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum. ....	95
Abbildung 7.49: Bandbreiten der Änderungen des mittleren Eintrittszeitpunkts des Jahresminimums in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen ( $n < 20$ ) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut. ....	96
Abbildung 7.50: Räumliche Verteilung der Änderungen des mittleren Eintrittszeitpunkts des Jahresminimums als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum. ....	97
Abbildung 7.51: Bandbreiten der Veränderung des mittleren Eintrittszeitpunkts des Jahresmaximums in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen ( $n < 20$ ) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut. ....	98
Abbildung 7.52: Räumliche Verteilung der Veränderungen des mittleren Eintrittszeitpunkts des Jahresmaximums als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum. ....	99
Abbildung 7.53: Änderungssignale ausgewählter Indikatoren für die einzelnen Modellketten. Die Bandbreiten ergeben sich aus den jeweils unterschiedlichen simulierten Werten der betrachteten 734 Grundwassermessstellen für ganz Niedersachsen. ....	100
Abbildung 7.54: Struktur des angewendeten CNNs (nach Wunsch et al., 2022). ....	102
Abbildung 7.55: Aufteilung der Datensätze nach Trainings-, Validierungs- und Optimierungszeiträumen. ....	103
Abbildung 7.56: Lage der Messstellen an denen Grundwasserstände bis zum Jahr 2100 projiziert wurden (a). Verteilung der Messstellen auf die Regionen (b). ....	105
Abbildung 7.57: Spannbreite der absoluten Änderung der jeweiligen Kernkenngröße in Bezug auf den Referenzzeitraum (1981 – 2010). Die Anzahl der Messstellen je Raum wird durch $n$ angegeben. Beispielsweise heißt $n = 134$ , dass die Darstellung der Bandbreite dieser Kenngrößen auf 134 Messstellen mit je 5 Klimaprojektionen basiert. Regionen mit nicht repräsentativer Anzahl an Messstellen sind in grau dargestellt. ....	107
Abbildung 7.58: Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den mittleren Jahrestiefstand gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle. ....	108
Abbildung 7.59 Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den mittleren Jahreshochstand gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle. ....	109
Abbildung 7.60 Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den mittleren Jahresamplitude gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle. ....	110
Abbildung 7.61: Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für die Anzahl der Monate mit Grundwasserniedrigstand gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle. ....	111
Abbildung 7.62: Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für die Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle. ....	112

Abbildung 7.63 Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den mittleren Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle. ....	113
Abbildung 7.64: Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den mittleren Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle. ....	114
Abbildung 7.65: Änderung des Jahresgangs bzw. der intra-jährlichen Grundwasserstandsdynamik für die nahe bzw. ferne Zukunft unterteilt nach Regionen. ....	115
Abbildung 7.66: Links: Modellgebiet und Messstellen des Strömungsmodells Sandelermöns. Rechts: Lage der Modellgebiete der Strömungsmodelle in den Naturregionen. ....	117
Abbildung 7.67: Darstellung des dreidimensionalen Strömungsmodells Sandelermöns. Die Abbildung ist mit einer 25-fachen Überhöhung in Z-Richtung dargestellt. Gezeigt werden die Lage der Grundwasseroberfläche in m NHN (Legende) und die verwendeten Randbedingungen. Bei Letzteren bilden die blauen Kreise die Dirichlet-Randbedingung und die grünen Kreise die Cauchy-Randbedingung ab. ....	117
Abbildung 7.68: : Links: Modellgebiet und Messstellen des Strömungsmodells Vörden-Hunteburg. Rechts: Lage der Modellgebiete der Strömungsmodelle in den Naturregionen. ....	119
Abbildung 7.69: Darstellung des dreidimensionalen Strömungsmodells Vörden-Hunteburg. Die Abbildung ist mit einer 25-fachen Überhöhung in Z-Richtung dargestellt. Gezeigt werden die Lage der Grundwasseroberfläche in m NHN (Legende) und die verwendeten Randbedingungen. Bei Letzteren bilden die blauen Kreise die Dirichlet-Randbedingung und die grünen Kreise die Cauchy-Randbedingung ab. ....	119
Abbildung 7.70: Ergebnisse der instationären Kalibrierung des Strömungsmodells Sandelermöns. Dargestellt sind die Ganglinien der gemessenen und simulierten Grundwasserstände in m NHN der einzelnen Messstellen. ....	123
Abbildung 7.71: Ergebnisse der instationären Kalibrierung des Strömungsmodells Vörden-Hunteburg. Dargestellt sind die Ganglinien der gemessenen und simulierten Grundwasserstände in m NHN der ersten Hälfte der Messstellen. ....	127
Abbildung 7.72: Ergebnisse der instationären Kalibrierung des Strömungsmodells Vörden-Hunteburg. Dargestellt sind die Ganglinien der gemessenen und simulierten Grundwasserstände in m NHN der zweiten Hälfte der Messstellen. ....	128
Abbildung 7.73: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Mittlerer Jahrestiefstand im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010 .....	130
Abbildung 7.74: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Mittlerer Jahreshochstand im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. ....	131
Abbildung 7.75: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Mittlere Jahresamplitude im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. ....	132
Abbildung 7.76: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	133
Abbildung 7.77: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Gesamtsumme der Hochstandsmonate im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	134

Abbildung 7.78: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Mittlerer Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	135
Abbildung 7.79: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Mittlerer Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	136
Abbildung 7.80: Übersicht der Bandbreite der projizierten Änderungen* der Kernindikatoren im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010 .....	137
Abbildung 7.81: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Mittlerer Jahrestiefstand im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	138
Abbildung 7.82: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Mittlerer Jahreshochstand im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	139
Abbildung 7.83: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Mittlere Jahresamplitude im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	140
Abbildung 7.84: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	141
Abbildung 7.85: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Gesamtsumme der Hochstandsmonate im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	142
Abbildung 7.86: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Mittlerer Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	143
Abbildung 7.87: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Mittlerer Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	144
Abbildung 7.88: Übersicht der Bandbreite der projizierten Änderungen* der Kernindikatoren im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	145
Abbildung 8.1: Lage der Messstellen für den Vergleich der Teilprojekte A, B, C.....	148
Abbildung 8.2: Vergleich der Teilprojekte A, B und C – Spannweite der Änderungen für die nahe Zukunft und ferne Zukunft (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) nach Teilgebieten.....	149
Abbildung 9.1 Modellierter Verlauf der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9610997 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Die Ganglinien decken den gesamten Simulationszeitraum ab, farblich hinterlegt sind die Zeiträume der Referenzzeit (1981-2010) sowie der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 und 2071-2100).....	157



Abbildung 9.2: Zoom auf die nahe Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9610997 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der nahen Zukunft (2021-2050).	157
Abbildung 9.3 Zoom auf die ferne Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9610997 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der fernen Zukunft (2071-2100).	158
Abbildung 9.4: Bandbreite der Änderungen der Kernindikatoren (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9610997 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf.	158
Abbildung 9.5: Änderung des beobachteten (links) und projizierten (rechts) Indikators Mittlerer Grundwasserstand sowie die Bandbreite des Indikators Mittlerer Grundwasserstand je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe (rechts) an der Messstelle 9610997 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der Referenzzeit (1981-2010).	159
Abbildung 9.6: Modellierter Verlauf der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9850270 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Die Ganglinien decken den gesamten Simulationszeitraum ab, farblich hinterlegt sind die Zeiträume der Referenzzeit (1981-2010) sowie der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 und 2071-2100).	159
Abbildung 9.7: Zoom auf die nahe Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9850270 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der nahen Zukunft (2021-2050).	160
Abbildung 9.8: Zoom auf die ferne Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9850270 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der fernen Zukunft (2071-2100).	160
Abbildung 9.9: Bandbreite der Änderungen der Kernindikatoren (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9850270 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf.	161
Abbildung 9.10: Änderung des beobachteten (links) und projizierten (rechts) Indikators Mittlerer Grundwasserstand sowie die Bandbreite des Indikators Mittlerer Grundwasserstand je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe (rechts) an der Messstelle 9850270 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der Referenzzeit (1981-2010).	161
Abbildung 9.11: Modellierter Verlauf der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700133 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Ganglinien decken den gesamten Simulationszeitraum ab, farblich hinterlegt sind die Zeiträume der Referenzzeit (1981-2010) sowie der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 und 2071-2100).	163
Abbildung 9.12: Zoom auf die nahe Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700133 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der nahen Zukunft (2021-2050).	163
Abbildung 9.13: Zoom auf die ferne Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700133 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der fernen Zukunft (2071-2100).	164
Abbildung 9.14: Bandbreite der Änderungen der Kernindikatoren (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700133 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf.	164
Abbildung 9.15: Änderung des beobachteten (links) und projizierten (rechts) Indikators Mittlerer Grundwasserstand sowie die Bandbreite des Indikators Mittlerer Grundwasserstand je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten	

Klimaprojektionsläufe (rechts) an der Messstelle 9700133 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der Referenzzeit (1981-2010).....	165
Abbildung 9.16: Modellierter Verlauf der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700234 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Ganglinien decken den gesamten Simulationszeitraum ab, farblich hinterlegt sind die Zeiträume der Referenzzeit (1981-2010) sowie der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 und 2071-2100). .....	165
Abbildung 9.17: Zoom auf die nahe Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700234 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der nahen Zukunft (2021-2050). .....	166
Abbildung 9.18: Zoom auf die ferne Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700234 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der fernen Zukunft (2071-2100).....	166
Abbildung 9.19: Bandbreite der Änderungen der Kernindikatoren (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2020) je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700234 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf. ....	167
Abbildung 9.20: Änderung des beobachteten (links) und projizierten (rechts) Indikators Mittlerer Grundwasserstand sowie die Bandbreite des Indikators Mittlerer Grundwasserstand je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe (rechts) an der Messstelle 9700234 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der Referenzzeit (1981-2010).....	167
Abbildung 9.21: Modellierter Verlauf der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700269 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Ganglinien decken den gesamten Simulationszeitraum ab, farblich hinterlegt sind die Zeiträume der Referenzzeit (1981-2010) sowie der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 und 2071-2100). .....	168
Abbildung 9.22: Zoom auf die nahe Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700269 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der nahen Zukunft (2021-2050). .....	168
Abbildung 9.23: Zoom auf die ferne Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700269 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der fernen Zukunft (2071-2100).....	169
Abbildung 9.24: Bandbreite der Änderungen der Kernindikatoren (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700269 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf. ....	169
Abbildung 9.25: Änderung des beobachteten (links) und projizierten (rechts) Indikators Mittlerer Grundwasserstand sowie die Bandbreite des Indikators Mittlerer Grundwasserstand je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe (rechts) an der Messstelle 9700269 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der Referenzzeit (1981-2010).....	170
Abbildung 14.1: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des mittleren Grundwasserstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 .....	189
Abbildung 14.2: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung des Mittleren Grundwasserstands (in m) .....	190
Abbildung 14.3: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des minimalen Grundwasserstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 .....	191
Abbildung 14.4: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung tiefster Grundwasserstand (in m). .....	192

Abbildung 14.5: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des maximalen Grundwasserstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 .....	193
Abbildung 14.6: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung höchster Grundwasserstand (in m) ...	194
Abbildung 14.7: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der Standardabweichung gegenüber der Referenzperiode 1981-2010.....	195
Abbildung 14.8: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung Standardabweichung (in m) .....	196
Abbildung 14.9: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der Gesamtamplitude gegenüber der Referenzperiode 1981-2010.....	197
Abbildung 14.10: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung der Gesamtamplitude (in m).....	198
Abbildung 14.11: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der Anzahl der Jahre mit mindestens einem Niedrigstands situation gegenüber der Referenzperiode 1981-2010.....	199
Abbildung 14.12: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung Jahre mit mind. einem Niedrigstandsmonat (innerhalb des 30-Jahre-Zeitraums).....	200
Abbildung 14.13: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der Anzahl der Jahre mit mindestens einem Hochstands situation gegenüber der Referenzperiode 1981-2010.....	201
Abbildung 14.14: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung Jahre mit mind. einem Hochstandsmonat (innerhalb des 30-Jahre-Zeitraums).....	202
Abbildung 14.15: : Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den Grundwassertiefstand gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle. ....	203
Abbildung 14.16: : Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den Grundwasserhöchststand gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle. ....	204
Abbildung 14.17: : Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für die Gesamtamplitude gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle. ....	205
Abbildung 14.18: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Indikators Grundwassertiefstand im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. ....	206
Abbildung 14.19: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Indikators Grundwasserhöchststand im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. ....	207
Abbildung 14.20: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Indikators Mittlere Grundwasserstand im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. ....	208
Abbildung 14.21: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Indikators Standardabweichung im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010 .....	209
Abbildung 14.22: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Indikators Gesamtamplitude im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. ....	210

Abbildung 14.23: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Indikators Anzahl der Jahre mit Niedrigstandssituation im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	211
Abbildung 14.24: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Indikators Anzahl der Jahre mit Hochstandssituation im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	212
Abbildung 14.25: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Grundwassertiefstand im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	213
Abbildung 14.26: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Grundwasserhöchststand im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	214
Abbildung 14.27: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Mittlerer Grundwasserstand im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	215
Abbildung 14.28: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Standardabweichung im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	216
Abbildung 14.29: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Gesamtamplitude im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	217
Abbildung 14.30: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Anzahl der Jahre mit Niedrigstandssituation im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	218
Abbildung 14.31: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen* des Kernindikators Anzahl der Jahre mit Hochstandssituation im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen* im Modellgebiet. * Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.....	219

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Datenbasis der in KliBiW 7 verwendeten Zeitreihen .....	6
Tabelle 3.1: Indikatoren zur Charakterisierung der Grundwasserstandsänderungen .....	10
Tabelle 4.1: Betrachtete Kenngrößen des Klimas für die Trendanalysen .....	12
Tabelle 4.2: Mittlere Veränderung von Klimakenngrößen in Niedersachsen in der Vergangenheit als linearer Trend auf Basis von Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, Climate Data Center) .....	18
Tabelle 5.1: Das Modell-Ensemble für KliBiW 7 .....	21
Tabelle 5.2: Modellmatrix der verfügbaren Klimaprojektionen aus den Projekten EURO-CORDEX und ReKliEs (Stand: 2018) für das Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) für die Projektphase von KliBiW7 .....	22
Tabelle 7.1: Split-Sample-Tests zur Modellvalidierung .....	42
Tabelle 7.2: Liste der in der Optimierung berücksichtigten Modellparameter .....	43
Tabelle 7.3: Verteilung der Messstellen auf die Güteklassen für die Gütemaße IOAR und NSE sowie IOAR unter Berücksichtigung der zulässigen Fehlwerte .....	57
Tabelle 7.4: Liste der verwendeten Indizes .....	79
Tabelle 7.5: Gliederung des geologisch-hydrogeologischen Modells, Einteilung in Layer des numerischen Strömungsmodells und Ergebnisse der Kalibrierparameter für das Modell Sandelermöns. Die Klassifizierung nach hydrostratigrafischen Einheiten und Durchlässigkeitsklassen erfolgte nach (REUTTER, 2011). Grundwasserleiter sind blau hinterlegt. Teilweise wurden mehrere geologische bzw. Hydrostratigrafische Einheiten in einem Layer des Strömungsmodells zusammengefasst.....	121
Tabelle 7.6: Ergebnisse der instationären Kalibrierung des Strömungsmodells Sandelermöns. Die Modellgüte bzw. die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen werden anhand verschiedener Fehlerkriterien für die einzelnen Messstellen und das gesamte Modellgebiet dargestellt. ....	122
Tabelle 7.7: Gliederung des geologisch-hydrogeologischen Modells, Einteilung in Layer des numerischen Strömungsmodells und Ergebnisse der Kalibrierparameter für das Modell Vörden-Hunteburg. Die Klassifizierung nach hydrostratigrafischen Einheiten und Durchlässigkeitsklassen erfolgte nach (REUTTER, 2011). Grundwasserleiter sind blau hinterlegt. Einige Einheiten des geologischen 3D-Modells wurden im Strömungsmodell durch mehrere Layer abgebildet. Wurden mehrere Einheiten des 3D-Modells einem Layer zugeordnet, wurden diese im Strömungsmodell zusammengefasst behandelt. ....	125
Tabelle 7.8: Ergebnisse der instationären Kalibrierung des Strömungsmodells Vörden-Hunteburg. Die Modellgüte bzw. die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen werden anhand verschiedener Fehlerkriterien für die einzelnen Messstellen und das gesamte Modellgebiet dargestellt. ....	126
Tabelle 7.9: Auswahl der Klimaprojektionen für die beiden Modellgebiete der Strömungsmodelle. ....	129
Tabelle 7.10: Auswahl der Messstellen für die Ergebnisdarstellung der beiden Strömungsmodelle. ....	129
Tabelle 8.1: Messstellenanzahl nach Region für den Vergleich der Teilprojekte A, B, C. ....	148
Tabelle 8.2: Vergleich der Teilprojekte A,B,C: Tabellarische Übersicht über die mittleren regionalen Änderungssignale aus 5 Klimaprojektionen (Teil 1).....	150
Tabelle 8.3: Vergleich der Teilprojekte A,B,C: Tabellarische Übersicht über die mittleren regionalen Änderungssignale aus 5 Klimaprojektionen (Teil 2).....	151
Tabelle 9.1: Auswahl der Messstellen der beiden Strömungsmodelle für den Detailvergleich. ....	154

Tabelle 14.1: Änderung der Kernindikatoren in Teilprojekt A nach Region (im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981-2010). .....	184
Tabelle 14.2: Änderung der sonstigen Indikatoren in Teilprojekt A nach Region (im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981-2010). .....	186

# 1 Einleitung

Das Thema Klimawandel ist aufgrund von Extremereignissen und Rekordjahren in der jüngeren Vergangenheit mehr und mehr in den Fokus der medialen und gesellschaftlichen Aufmerksamkeit gerückt. Auch in unseren Breiten treten Wetterextreme immer häufiger und intensiver auf. So haben hohe Niederschlagsdefizite, neue Temperaturrekord und eine extreme Sonnenscheindauer in den Trockenjahren 2018 bis 2020 zu einem deutlichen Rückgang der Grundwasserstände in Niedersachsen geführt. Trotz einer regional leichten Entspannung der Situation seit diesem Zeitraum, bedarf es noch weiterer niederschlagsreicher Jahre, bis das ursprüngliche Niveau wieder erreicht werden könnte. Grundwasser ist von essenzieller Bedeutung für grundwasserabhängige Ökosysteme und die Trinkwasserversorgung, aber auch für die zusätzliche Bewässerung in der Landwirtschaft und als Brauchwasser für die Industrie. Diese Faktoren erzeugen ein komplexes Spannungsfeld und erfordern einen partizipativen Prozess zwischen Gesellschaft, Wirtschaft und Politik sowie weitere weitreichende Anstrengungen in der Forschung und der Bereitstellung von Wissen für betroffene Akteure und Entscheidungsträger.

Um sich diesen Herausforderungen des Klimawandels zu stellen, ist es wichtig, eine fundierte Wissensbasis zu schaffen, um sinnvolle und effektive Vorsorge- und Anpassungsstrategien planen zu können.

Seit dem Jahr 2008 arbeitet der NLWKN im Projekt KliBiW in enger Kooperation mit Partnern aus der Wissenschaft und Praxis zusammen, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Niedersachsen zu identifizieren und zu quantifizieren. In den bisherigen Projektphasen wurden bereits verschiedene räumliche und thematische Schwerpunkte betrachtet (vgl. NLWKN, 2017; NLWKN, 2019a; NLWKN 2021a). Indes entwickelt sich die Klimaforschung immer weiter. Anhand von leistungsfähigeren Computermodellen können neue Erkenntnisse über das Klimasystem gewonnen werden. Dadurch werden Aussagen über die zukünftigen Entwicklungen des Klimas immer verlässlicher und mögliche Auswirkungen auf die Umwelt können besser abgeschätzt werden. Diese gewonnenen Erkenntnisse dienen als Entscheidungsgrundlagen und Handlungsempfehlungen für Politik und Gesellschaft.

Um diesen Anforderungen nach Informationen gerecht zu werden, wurden in der Phase 7 des Projektes KliBiW die Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserstände in Niedersachsen analysiert und bewertet. Im vorliegenden Bericht werden auf Basis eines Szenarios ohne zukünftigen Klimaschutz die möglichen Veränderungen ausgewählter Indikatoren zunächst anhand verschiedener Methoden simuliert und betrachtet. Anschließend erfolgte eine Zusammenführung der jeweiligen Ergebnisse auf regionaler Ebene sowie eine

Diskussion der resultierenden Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede. Zuletzt werden schlaglichtartig Aspekte beleuchtet, die im Laufe der Projektbearbeitung als weitere relevante Fragestellung für den Themenkomplex identifiziert wurden.

## 2 Projektgrundlagen

### 2.1 Organisation und Zielsetzung

Seit dem Jahr 2008 beschäftigt sich das Projekt KliBiW (Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland) mit den Folgen des Klimawandels für die Wasserwirtschaft in Niedersachsen. Träger des Projektes ist das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU). Die Leitung und Koordination obliegt dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Betriebsstelle Hildesheim.

In den bisherigen Phasen 1 bis 6 des KliBiW-Projektes lag der Fokus auf den Analysen der Hochwasser- sowie Niedrigwasserverhältnisse an oberirdischen Gewässern (NLWKN Abschlussberichte 2012, 2015, 2017, 2019, 2021). Die Phase 7 widmet sich der Untersuchung und Bewertung der Entwicklung der Grundwasserstände unter dem Einfluss des globalen Klimawandels. Projektpartner in dieser Phase sind der NLWKN mit der Betriebsstelle Cloppenburg, das Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Leibniz Universität Hannover (IWW), die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sowie das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Die Abstimmung grundlegender Entscheidungen erfolgte über eine Lenkungsgruppe, in der neben den Projektpartnern auch das MU vertreten war. Der fachliche Austausch erfolgte regelmäßig auf Ebene der ProjektbearbeiterInnen.

Die Untersuchung und Bewertung der Entwicklung der Grundwasserstände für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2071 bis 2100) werden anhand unterschiedlicher Methodenansätze (Teilprojekt A bis D) ermittelt:

- A) Teilprojekt A (NLWKN Cloppenburg) prognostiziert die zukünftigen Grundwasserstandsveränderungen mit Hilfe von Zeitreihenmodellen
- B) Teilprojekt B (IWW) berechnet die Veränderungen der Grundwasserstände auf Basis eines regionalen Regressionsmodells
- C) Teilprojekt C (BGR) ermittelt die zukünftigen Grundwasserstände mit Hilfe von künstlichen neuronalen Netze (KNN)
- D) Teilprojekt D (LBEG) modelliert mit bestehenden Grundwasserströmungsmodellen von Wasserversorgern die Grundwasserstände innerhalb von Strömungsmodellregionen.

Für die Teilprojekte A, B und C erfolgt ein Ergebnisvergleich anhand verschiedener Parameter für Messstellen bzw. Regionen in Niedersachsen.

Das Teilprojekt D vergleicht innerhalb der Strömungsmodellregionen seine Ergebnisse der verschiedenen Parameter mit Teilprojekt A und B.

Abbildung 2.1 zeigt eine Übersicht über die Arbeitsschwerpunkte der Projektpartner für die Phase 7.



Abbildung 2.1: Übersicht der Projektkoordination und der methodischen Ansätze der Teilprojekte in Phase 7.



## 2.2 Untersuchungsgebiet

Für die Analysen in KliBiW 7 wurde die gesamte Landesfläche von Niedersachsen von etwa 47.600 km<sup>2</sup> betrachtet. Eine räumliche Aggregation erfolgt durch die Bildung von Regionen gemäß Abbildung 2.2. Diese basieren auf einer vereinfachenden Interpretation der hydrogeologischen Räume und Teilräumen der hydrogeologischen Übersichtskarte 1:500.000 (HÜK500) des LBEG. Im Ergebnis werden die großräumig prägenden Landschaftsräume Inseln, Marschen, Niederungsregionen, Geestregionen, Börden und Bergregionen unterschieden.

Alternativ geprüft wurde eine räumliche Aggregation nach fünf Klimaregionen entsprechend der Klimawirkungsstudie Niedersachsen (MU, 2019) und nach den Auswerteregionen der NLWKN Sonderberichte zur Grundwasserstandsentwicklung (15 Regionen) in Niedersachsen (ebenfalls auf Basis der HÜK500, NLWKN 2022). Hier zeigte sich, dass eine hydrogeologisch orientierte Differenzierung, insbesondere mit einer Unterscheidung der Geest- und Niederungsregionen sinnvoll ist, um Gebiete mit ähnlicher Grundwasserdynamik zu identifizieren. Eine Aufteilung in regional feiner differenzierte Auswerteregionen erhöht jedoch nur die Komplexität der Auswertung ohne weitere wesentliche Unterschiede zu offenbaren.

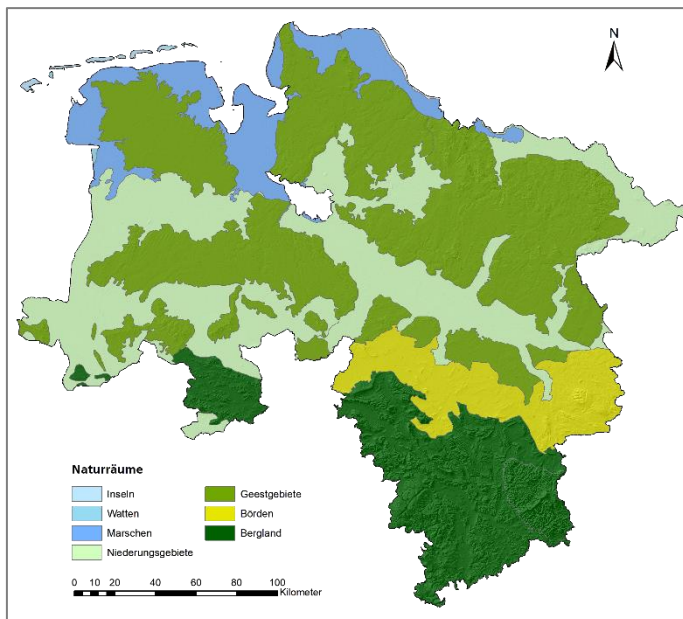


Abbildung 2.2: Abgrenzung der Auswerteregionen

Für den gesamten niedersächsischen Raum wurden die klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit und der möglichen Zukunft betrachtet. Die Analysen für die Grundwasserstandsentwicklungen erfolgten an ausgewählten Grundwassermessstellen.

## 2.3 Grundwasserkörper

In Niedersachsen existieren 123 Grundwasserkörper (NLWKN, 2015) (Abbildung 2.3). Die Abgrenzung von Grundwasserkörpern erfolgt nach hydraulischen Grenzen und hydrogeologischen Kriterien innerhalb von Teileinzugsgebieten der Flüsse (Flussgebietseinheiten). Die hydraulisch abgegrenzten Teilräume wurden weiter unterteilt nach überwiegend hydrogeologischen Einheiten:

- „Lockergestein“
- „mesozoisches Festgestein“
- „paläozoisches Festgestein“

(MU, 2023)

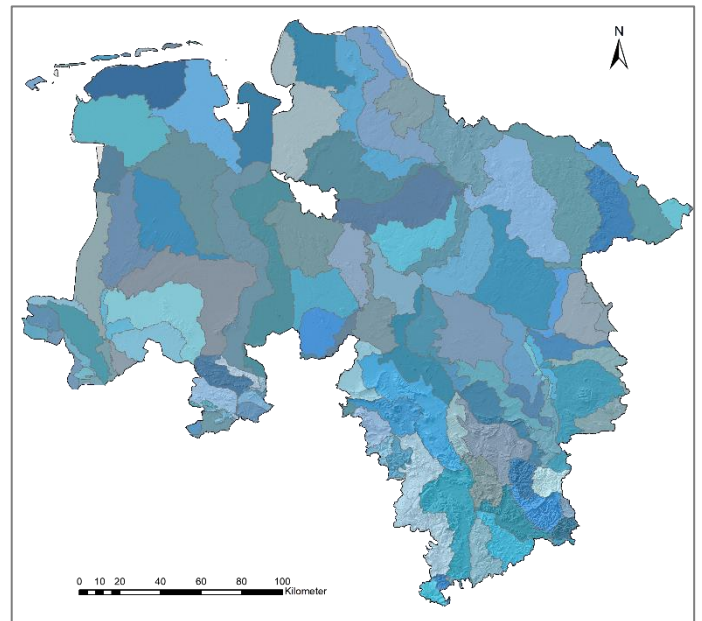


Abbildung 2.3: Abgrenzung der Grundwasserkörper

## 2.4 Messtellenauswahl

Der NLWKN betreibt ein eigenes Grundwasserstandsmessnetz mit rund 1500 Messstellen, aus dem regelmäßig Grundwasserstandsdaten erhoben werden. Für das KLIBIW7-Projekt wurde zunächst eine Vorauswahl von potentiell geeigneten Messstellen getroffen. Für die Vorauswahl waren zwei Aspekte maßgebend:

### a) Minimierung anthropogener Einflüsse

Die in die Studie berücksichtigten Messstellen sollten durch anthropogene Einflüsse möglichst unbeeinflusst sein, um zu gewährleisten, dass die beobachtete Grundwasserstandsentwicklung im Wesentlichen auf klimatische Ursachen zurückzuführen ist und nicht durch anthropogene Zusatzeffekte gestört wird.

Ein systematisches Verzeichnis anthropogener Einflüsse auf die Messstellen liegt dem NLWKN bislang nicht vor. Zur Auswahl wurde daher auf frühere Auswertungen zur Gangliniendynamik (Wriedt, 2017, und aktualisierte, unveröffentlichte Auswertungen) zurückgegriffen. In Wriedt (2017) wurde auf Basis einer transformierten klimatischen Wasserbilanz eine theoretische Grundwasserganglinie abgeleitet, die im Vergleich mit beobachteten Grundwasserstandsdaten Rückschlüsse auf eine witterungsabhängige Dynamik (Gruppe 1) oder zusätzliche Beeinflussung, z.B. durch anthropogene Effekte (Gruppe 2) zuließ. Einflüsse von Grundwasserentnahmen für die Feldberegnung konnten in der Regel an charakteristischen Ganglinienmustern (extreme sommerliche Absenkung) identifiziert werden. Zum Teil war dies auch für Niveauveränderungen bei der Einrichtung von Trinkwassergewinnungsgebieten möglich. Diese Auswertungen wurden 2015 erstmals durchgeführt und 2017 und 2019 aktualisiert. Dabei wurden jedoch keine Zeiträume vor 1985 betrachtet, so dass anthropogene Einflüsse in den 70er und 80er Jahren im Datenpool nicht ausgeschlossen werden können.

In den 70er und 80er Jahren ist generell von vielfachen Veränderungen der Grundwassersysteme in Niedersachsen auszugehen, da in diesem Zeitraum viele grundwasserwirksame anthropogene Veränderungen stattfanden, wie zum Beispiel die Errichtung großer Entnahmen für die öffentliche Wasserversorgung, die Flurbereinigung mit der damit einhergehenden Begradigung von Fließgewässern und Landschaftsentwässerung, die anhaltende Moorkultivierung und der Beginn der großflächigen Feldberegnung im östlichen Niedersachsen. Auch ein fortschreitendes Wachstum von Siedlungen und Industriegebieten mit einherschreitender Versiegelung der Landschaft oder vergleichbare Prozesse können über den Betrachtungszeitraum hinweg Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung und die Grundwasserstände haben. Eine Beurteilung wird dadurch erschwert, dass die

70er und 80er Jahre von einer ausgeprägten Niedrigwasserphase in den 70er Jahren und einer ausgeprägten Grundwasserhochstandsphase in den 80er Jahren geprägt sind. Dadurch sind anthropogen verursachte Standsänderungen (Sprünge im Ganglinienverlauf) visuell oftmals nicht zweifelsfrei zu erkennen.

### b) Länge der Datenreihe

Die Änderungssignale der Grundwasserstände für die Klimaprojektionen werden auf Referenzzeiträume in der Vergangenheit bezogen. In früheren KliBiW-Phasen wurde hierfür der Zeitraum 1971-2000 genutzt. Viele der vorliegenden Beobachtungsdaten der Grundwasserstände beginnen jedoch erst in den 1980er Jahren. Zur Ableitung statistischer Parameter bzw. Indikatoren für die Auswertung sollten daher Zeitreihen genutzt werden, die entsprechende Daten wenigstens ab 1980 aufweisen und möglichst vollständig vorliegen (maximaler Anteil von Fehlwerten < 5%). Messstellen mit langen Datenreihen stehen nicht überall in Niedersachsen in ausreichendem Umfang zur Verfügung. Insbesondere im Weser-Leine-Bergland und in Ostniedersachsen ist die resultierende Messstellendichte unzureichend. Daher wurden hier auch Messstellen mit kürzeren Zeiträumen (mindestens 20 Jahre) in die Vorauswahl mit aufgenommen, um eine bessere räumliche Abdeckung zu erreichen.

### c) Sonstiges

Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes von KIT und BGR zur operationellen Grundwasserstandsvorhersage mit Hilfe von neuronalen Netzwerken (Wunsch et al. 2019, Wunsch et al. 2022) wurden ebenfalls Grundwasserstandssimulationen an ausgewählten Messstellen des NLWKN durchgeführt. Aus diesem Projekt wurde ein Satz von Referenzmessstellen abgeleitet und die Simulationen hinsichtlich der Anpassungsgüte bewertet. Auch diese Referenzmessstellen und die Messstellen mit einer sehr guten Anpassungsgüte in der Modellierung ( $NSE > 0,74$ ) wurden in die Vorauswahl mit aufgenommen (sofern nicht bereits nach den Merkmalen a) und b) enthalten).

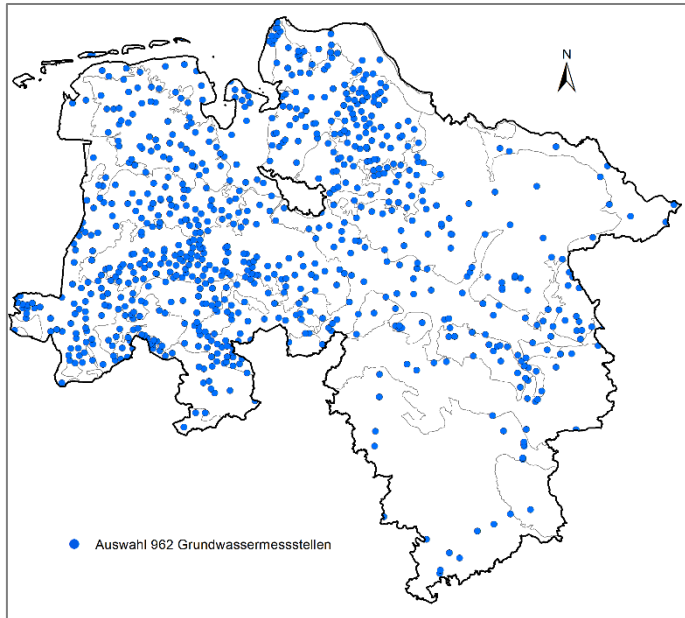


Abbildung 2.4: Übersicht Vorauswahl von 962 Grundwassermessstellen

Im Ergebnis wurden aus dem Landesmessstellenpool 962 Messstellen in die Vorauswahl für das KLBIW 7-Projekt aufgenommen (Abbildung 2.4). Nach der Simulation der Grundwasserstände erfolgte in den einzelnen Teilprojekten ein Ausschluss von Messstellen, bei denen keine adäquate Modellanpassungsgüte erreicht werden konnte, oder für die aufgrund der Länge der Datenreihe keine Berechnung der absoluten Änderungen nach dem Delta-Change-Ansatz möglich war (siehe 3.2).

## 2.5 Grundwasserstandsdaten

Der NLWKN erhebt landesweit Grundwasserstandsdaten an den landeseigenen Grundwassermessstellen (Messnetz Grundwasserstand, NLWKN 2014). Die Messung erfolgt als Handmessung mit Lichtlot oder über Drucksensoren mit Datenlogger. Eine Umstellung auf Datenloggertechnologie mit täglichen Grundwasserstandsmessungen ist bislang nur für einen Teil der Messstellen erfolgt, die Umstellung fand zu verschiedenen Zeitpunkten statt. Dies hat zur Folge, dass die Grundwasserstandsdaten entweder als Beobachtermessung (Handmessung) einmal im Monat oder als Sensordaten mit täglichen Messintervallen vorliegen.

Für das KLBIW7-Projekt wurde für jede Messstelle ein einheitlicher Datensatz auf Basis von Monatswerten generiert. Handmessungen einmal pro Monat wurden unmittelbar als Monatswert übernommen, mehrere

Messungen pro Monat (wie Tagesmessungen) wurden durch Bildung des arithmetischen Mittelwertes auf Monatswerte aggregiert. Die gemessenen Abstände (Grundwasserabstand zum Messbezugspunkt) wurden auf den Grundwasserstand bezogen auf Normal-Null umgerechnet.

Der für das Projekt bereitgestellte Datensatz enthält Grundwasserstandsmessungen zwischen 1960 und 2020. Der tatsächliche Beginn der Messungen ist abhängig von der jeweiligen Station.

Die Stammdaten zu den einzelnen Messstellen enthalten Angaben zu:

- Messstellenidentifikation (Name und ID)
- Geographische Lage (UTM-Koordinaten)
- Filtertiefe
- Grundwasserstockwerk
- Beginn und Ende der Messungen

Alle Daten wurden der NLWKN Datenbank Aqua-Info CS entnommen.

## 2.6 Klimadaten

Für die Analysen der klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit und der Zukunft wurde eine Vielzahl von Daten verwendet. Für die Betrachtung der Vergangenheit stehen die Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) als punktuelle Stationsdaten zur Verfügung. Dieser Datensatz wurde über ein Regionalisierungsverfahren des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IWW) der Universität Hannover auf ein 1x1 km-Raster interpoliert. Der Datensatz deckt einen Zeitraum von 1951 bis 2017 ab. Die Methodik wurde am IWW entwickelt. Der Datensatz wurde im Rahmen der KLBIW-Projekte regelmäßig aktualisiert (Haberlandt et al., 2015).

Für die Analysen der zukünftigen klimatischen Bedingungen wird auf Basis eines Szenarios ohne Klimaschutz (RCP8.5) ein Ensemble von acht regionalen Klimamodellen (vgl. Kapitel 5) betrachtet. Die Daten stammen aus den Projekten EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014) und ReKliEs-De (Hübner et al., 2018) und liegen als Raster vor. Die grundlegenden Informationen sind der Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Tabelle 2.1: Datenbasis der in KliBiW 7 verwendeten Zeitreihen

Datentyp	Auflösung räumlich	Auflösung zeitlich	Zeitraum (maximal)	Herkunft
<b>Stationsmessdaten (Klima)</b>				
Luftfeuchte	205 Stationen (davon 133 Stationen in Nds)	Tageswerte	1951-2021	DWD
Niederschlag	Gebietsmittel Niedersachsen; 956 Stationen (davon 631 Stationen in Nds)	Tageswerte	1881-2021; 1951-2021	DWD
Temperatur (Minimum, Mittel, Maximum)	Gebietsmittel Niedersachsen; 205 Stationen (davon 133 Stationen in Nds)	Tageswerte	1881-2021; 1951-2021	DWD
Sonnenscheindauer	205 Stationen (davon 133 Stationen in Nds)	Tageswerte	1951-2021	DWD
Windgeschwindigkeit	205 Stationen (davon 133 Stationen in Nds)	Tageswerte	1951-2021	DWD
<b>Rastermessdaten (Klima)</b>				
Luftfeuchte	1x1 km Raster	Tageswerte	1951-2017	IWW
Niederschlag	1x1 km Raster	Tageswerte	1951-2017 1931-2020	IWW DWD
Temperatur (Minimum, Mittel, Maximum)	1x1 km Raster 5x5 km Raster	Tageswerte	1951-2017 1951-2020	IWW DWD
Sonnenscheindauer	1x1 km Raster	Tageswerte	1951-2017	IWW
Windgeschwindigkeit	1x1 km Raster	Tageswerte	1951-2017	IWW
<b>Rastermodelldaten (Klima)</b>				
Luftfeuchte	5x5 km Raster (RCM) bzw. 12,5x12,5 km Raster (ESD)	Tageswerte	1951-2100	EURO- CORDEX, ReKliEs-De
Niederschlag	5x5 km Raster (RCM) bzw. 12,5x12,5 km Raster (ESD)	Tageswerte	1951-2100	EURO- CORDEX, ReKliEs-De
Temperatur (Minimum, Mittel, Maximum)	5x5 km Raster (RCM) bzw. 12,5x12,5 km Raster (ESD)	Tageswerte	1951-2100	EURO- CORDEX, ReKliEs-De
Sonnenscheindauer bzw. Globalstrahlung	5x5 km Raster (RCM) bzw. 12,5x12,5 km Raster (ESD)	Tageswerte	1951-2100	EURO- CORDEX, ReKliEs-De
Windgeschwindigkeit	5x5 km Raster (RCM) bzw. 12,5x12,5 km Raster (ESD)	Tageswerte	1951-2100	EURO- CORDEX, ReKliEs-De
<b>Grundwassermessdaten</b>				
Grundwasserstand	962 Messstellen	Monatswerte	1960-2020	NLWKN

RCM: Regional Climate Model (dynamisches Regionalmodell)

ESD: Empirical Statistical Downscaling (statistisches Regionalmodell)

## 2.7 Vorgehensweise

Die Projektarbeit in KliBiW 7 wurde in mehreren Teilprojekten durchgeführt. Abbildung 2.5 stellt die wesentlichen Schritte der durchgeführten Analysen dar.

In Vorbereitung für die unterschiedlichen Modell-Ansätze der vier Teilprojekte wurden regionale Klimamodelldaten für acht Läufe auf Tageswertbasis für ein 5x5 km- bzw. 12,5x12,5 km-Raster für den Zeitraum 1970 bis 2100 herangezogen. Die Aufbereitung der Daten erfolgte seitens NLKWN. Diese Daten dienen als Eingangsdaten für die unterschiedlichen Modelle der vier Teilprojekte. Eine detaillierte Beschreibung der vier verschiedenen Ansätze sind in Kapitel 7.1.3, 7.2.1, 7.3.1 und 7.4.1 zu finden.

Weitere Datenquellen sind die Grundwasserneubildungsraten aus dem Modell mGROWA mit der Version mGROWA18 vom LEBG. Diese werden als mittlere monatliche Grundwasserneubildung für einen 30-jährigen Zeitraum zur Verfügung gestellt. Der Datensatz lag mit einer Auflösung 100x100 m vor. In Teilprojekt D werden die projizierten Grundwasserneubildungsdaten auf 500x500 m aggregiert (bilineare Interpolation).

Zu Beginn der Arbeiten wurden 962 Grundwassermessstellen für die Auswertung herangezogen. In Kapitel 2.4 wird die Auswahl der Messstellen anhand verschiedener Kriterien näher erläutert. In Teilprojekt A ist nach der Anwendung der Gütekriterien (siehe Kapitel 7.1.5) ein Pool von 709 Messstellen für acht Klimamodellläufe verfügbar. In Teilprojekt B sind nach der Überprüfung 734 Messstellen mit acht Klimamodellläufen nutzbar (siehe Kapitel 7.2.1). In Teilprojekt C werden nach der Kalibrierung und Validierung 286 Messstellen in fünf Klimamodellläufen verwendet (siehe Kapitel 7.3.3). Während Teilprojekt A, B und C die vorhandenen Messstellen für ganz Niedersachsen (soweit verfügbar) betrachten, steht in Teilprojekt D eine kleine Anzahl von Messstellen innerhalb von zwei Grundwasserströmungsmodellgebieten im Fokus (siehe Kapitel 7.4.2.1 und 7.4.2.2). Im Gegensatz zu den anderen Teilprojekten wurde hier mit jeweils drei gebietspezifisch ausgewählten Klimamodellläufen gearbeitet.

Für den abschließenden Vergleich der Ergebnisse gibt es zwei Varianten.

### 1) Ergebnisvergleich zwischen Teilprojekt A, B und C:

Die Zusammenführung der Teilergebnisse anhand gemeinsam verwendeter Messstellen und Klimaprojektionen. Die Auswertung basiert auf 245 Messstellen und fünf Klimaprojektionen in sechs Regionen.

### 2) Ergebnisvergleich zwischen Teilprojekt A, B und D:

Die Zusammenführung der Teilergebnisse anhand gemeinsam verwendeter Messstellen und

Klimaprojektionen. Die Auswertung basiert auf zwei Messstellen im Strömungsmodell „Sandelermöns“ und drei Messstellen im Strömungsmodell „Vörden-Hunteburg“ für jeweils drei Klimaprojektionsläufe.

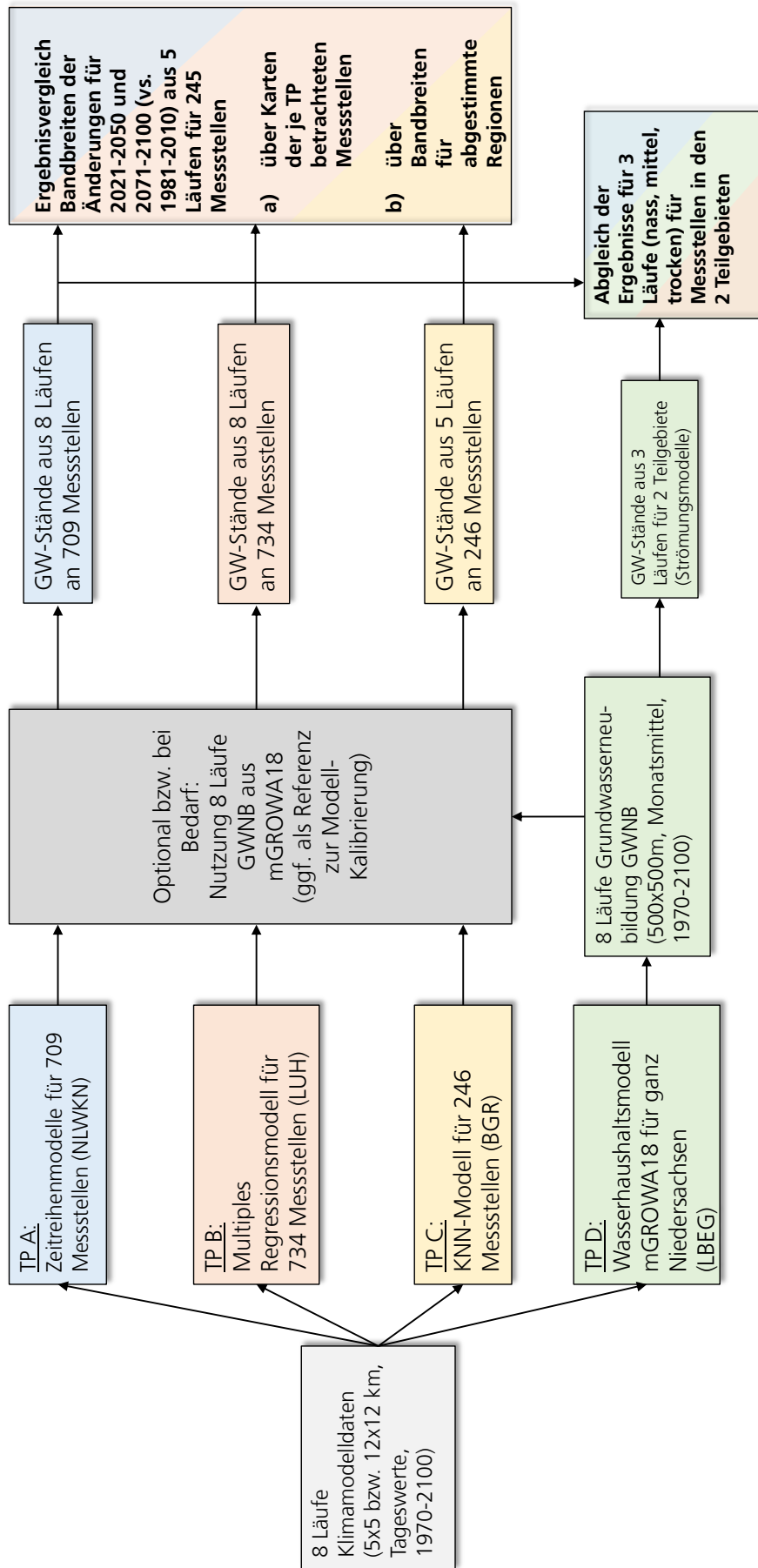


Abbildung 2.5: Schema zum Ablauf der Modellierungen in KlibiW Phase 7

## 3 Aufbereitung der Simulationsergebnisse

### 3.1 Indikatoren zur Charakterisierung der Grundwasserzustände

Zur Charakterisierung der modellierten 30-jährigen Zeitreihen im Referenzzeitraum Z1 (1981 bis 2010) und in den Betrachtungszeiträumen „Nahe Zukunft“ Z2 (2021 bis 2050) und „Ferne Zukunft“ Z3 (2071 bis 2100) wurden verschiedene Indikatoren berechnet, die Aufschluss über Lage, Streuung und zeitliche Dynamik der Grundwasserstände in diesen Zeitabschnitten geben.

Die einzelnen Indikatoren (Tabelle 3.1) werden in sogenannte Kernindikatoren und sonstige Indikatoren unterschieden.

Die Kernindikatoren werden im Berichtsteil dargestellt und inhaltlich weiter interpretiert. Sie charakterisieren unterschiedliche Eigenschaften der Grundwasserganglinie. Enthalten sind als Lageparameter der mittlere Jahrestiefstand (MEAN\_Y\_MIN) und der mittlere Jahreshochstand (MEAN\_Y\_MAX), die mittlere Jahresamplitude (MEAN\_Y\_AMPL) als Streuungsparameter, die Dauer von Grundwasserdürrephasen (MO\_GW\_LOW) und Grundwasserhochstandsphasen (MO\_GW\_HIGH) als zeitliche Charakteristika sowie die Eintrittszeitpunkte der Jahresminima (MEAN\_MO\_MIN) und Jahresmaxima (MEAN\_MO\_MAX) als zeitliche Eckpunkte der Standsdynamik.

Die sonstigen Indikatoren werden lediglich im Anhang dargestellt und nicht im Einzelnen interpretiert. Sie liefern ergänzende Informationen zur Grundwasserdynamik. Als sonstige Indikatoren sind der mittlere Grundwasserstand (Y\_MEAN) sowie die Minima und Maxima (Y\_MIN, Y\_MAX) als Lageparameter enthalten, die Standardabweichung und Gesamtamplitude als Streuungsparameter (Y\_SDEV, TOT\_Y\_AMPL) und die Anzahl Jahre mit Grundwasserdürre- und -hochstandsphasen (YR\_GW\_LOW, YR\_GW\_HIGH).

Tabelle 3.1: Indikatoren zur Charakterisierung der Grundwasserstandsänderungen

Nr.	Kernindikatoren	Beschreibung	Variablenbezeichner
1	Mittlerer Jahrestiefstand	Mittlerer niedrigster GWST im Betrachtungszeitraum = Mittelwert der jährlichen Minima	MEAN_Y_MIN **
2	Mittlerer Jahreshochstand	Mittlerer maximaler GWST im Betrachtungszeitraum = Mittelwert der jährlichen Maxima	MEAN_Y_MAX **
3	Mittlere Jahresamplitude	Mittelwert der Jahresamplituden (jährl. Maxima - jährl. Minima) im Betrachtungszeitraum	MEAN_Y_AMPL**
4	Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate	Anzahl der Monate mit Unterschreitung des mittl. Jahrestiefstands (s.o.) der Referenzperiode im Betrachtungszeitraum	MO_GW_LOW*
5	Gesamtsumme der Hochstandsmonate	Anzahl der Monate mit Überschreitung des mittl. Jahreshochstands (s.o.) der Referenzperiode im Betrachtungszeitraum	MO_GW_HIGH*
6	Mittl. Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums	Monat, an dem im Mittel das Jahresminimum im Betrachtungszeitraum auftritt	MEAN_MO_MIN**
7	Mittl. Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums	Monat, an dem im Mittel das Jahresmaximum im Betrachtungszeitraum auftritt	MEAN_MO_MAX**
<b>Sonstige Indikatoren</b>			
8	Grundwassertiefstand	Niedrigster GWST im Betrachtungszeitraum = niedrigster Tiefstand	Y_MIN*
9	Grundwasserhöchststand	Maximaler GWST im Betrachtungszeitraum = höchster Hochstand	Y_MAX*
10	Mittlerer Grundwasserstand	arithmetische Mittelwert der GWST im Betrachtungszeitraum	Y_MEAN*
11	Standardabweichung	Standardabweichung aus den Monatswerten im Betrachtungszeitraum	Y_SDEV*
12	Gesamtamplitude	Differenz zwischen Grundwasserhöchststand (s.o.) und Grundwasserniedrigstand (s.o.) im Betrachtungszeitraum	TOT_Y_AMPL*
13	Anzahl der Jahre mit Niedrigstandssituation	Anzahl der Jahre, in denen mindestens ein Niedrigstandsmonat erreicht wird	YR_GW_LOW***
14	Anzahl der Jahre mit Hochstandssituation	Anzahl der Jahre, in denen mindestens ein Hochstandsmonat erreicht wird	YR_GW_HIGH***
15	Jahresganglinie	Mittlere Monatswerte für den jeweiligen Betrachtungszeitraum	_****
<p>* Die 30-jährige Datenreihe wird über hydrologische Jahre (November-Oktober) abgegrenzt, der Indikator wird für den 30-Jahreszeitraum ermittelt.</p> <p>** Jahreswerte werden für das Kalenderjahr ermittelt, dadurch soll eine mögliche Verschleppung der Jahresminima in die Monate November/Dezember vermieden werden und dem verursachenden hydrologischen Jahr zugeordnet werden. Für Maxima ist das Problem nicht relevant.</p> <p>*** Anzahl Jahre mit mind. einem Hoch- bzw. Niedrigstandsmonat, über hydrologische Jahre bestimmt.</p> <p>**** Jahresgang berechnet aus den Monatswerten für den 30-Jahreszeitraum.</p>			



### 3.2 Berechnung der Änderungssignale

Für die Zeiträume nahe Zukunft 2021 bis 2050 und ferne Zukunft 2071 bis 2100 wurden jeweils folgende Änderungssignale der einzelnen Indikatoren für jede einzelne Messstelle berechnet:

**Absolute Änderung:** Differenz der Indikatorwerte im Betrachtungszeitraum gegenüber dem Referenzzeitraum auf Basis der modellierten Werte.

**Prozentuale Änderung:** Verhältnis der absoluten Änderung des Indikators zum modellierten Wert des Referenzzeitraumes, relative bzw. prozentual Änderung gegenüber dem Referenzzeitraum.

**Absolute Änderung nach dem Delta Change – Ansatz:** Anrechnung der prozentualen Änderung des Indikators auf den beobachteten Indikatorwert im Referenzzeitraum.

Die absolute Änderung nach dem Delta-Change-Ansatz stellt die finale Auswertungsstufe für die Erstellung der Karten und Auswertediagramme dar. Durch diesen Schritt erfolgt die Übertragung des Änderungssignals aus der reinen Modellbetrachtung auf die real beobachtbare Grundwasserdynamik.

### 3.3 Darstellungsarten

Für jede Messstelle wurden für die einzelnen Indikatoren und für die jeweiligen Betrachtungszeiträume (nahe Zukunft, ferne Zukunft) die maximale, minimale und mittlere Änderung des Indikators (nach dem Delta-Change-Ansatz) aus den Ergebnissen für die acht Klimaprojektionen berechnet.

In den Kartendarstellungen werden entsprechend die maximalen, minimalen und mittleren Indikatorwerte für alle Messstellen für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und ferne Zukunft (2071 bis 2100) dargestellt.

Für eine regional aggregierte Auswertung wird anschließend das arithmetische Mittel getrennt für die maximalen, die mittleren und die minimalen Änderungsbeträge über alle Messstellen pro Region berechnet. So ergibt sich pro Gebiet ein maximaler, mittlerer und minimaler Änderungsbetrag. Die Gebietsspanne der Änderungen (maximalen, minimale und mittlere Änderungen) wird dann in einem Balkendiagramm dargestellt (siehe Abbildung 3.1).

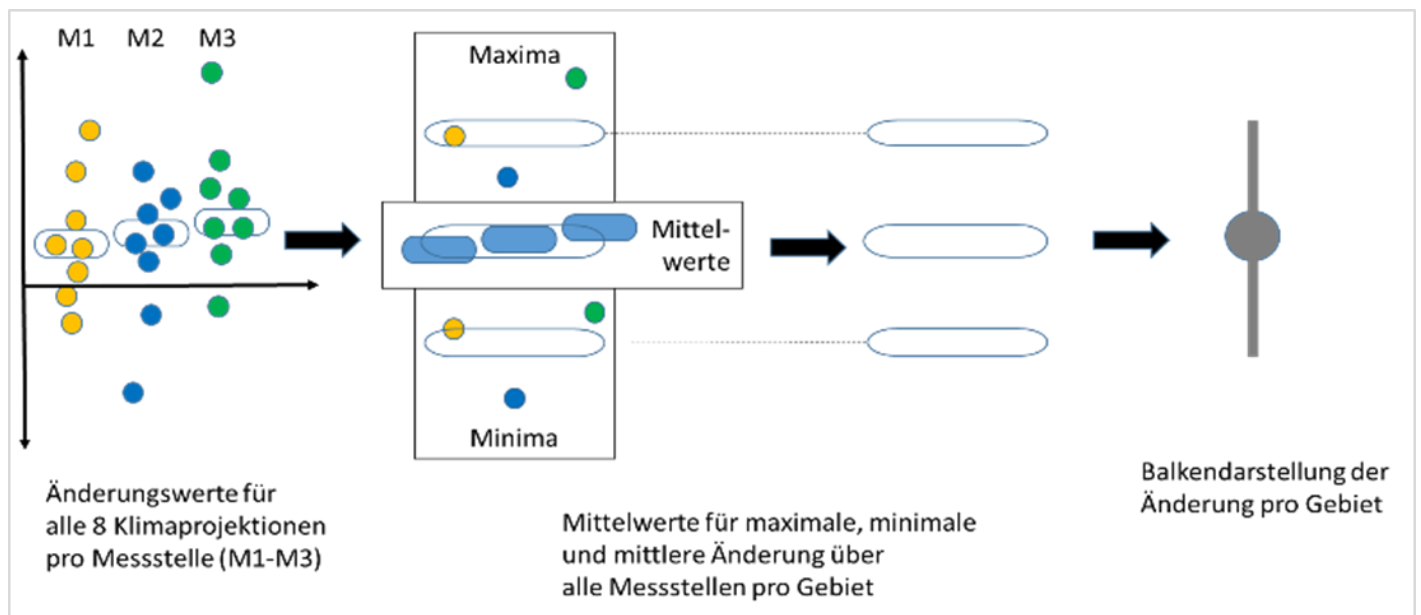


Abbildung 3.1: Rechenschema zur Erstellung der Balkenplots für die regional aggregierte Ableitung der maximalen, minimalen und mittleren Änderungsbeträge pro Gebiet.

# 4 Betrachtung der klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit bis heute

## 4.1 Datenbasis

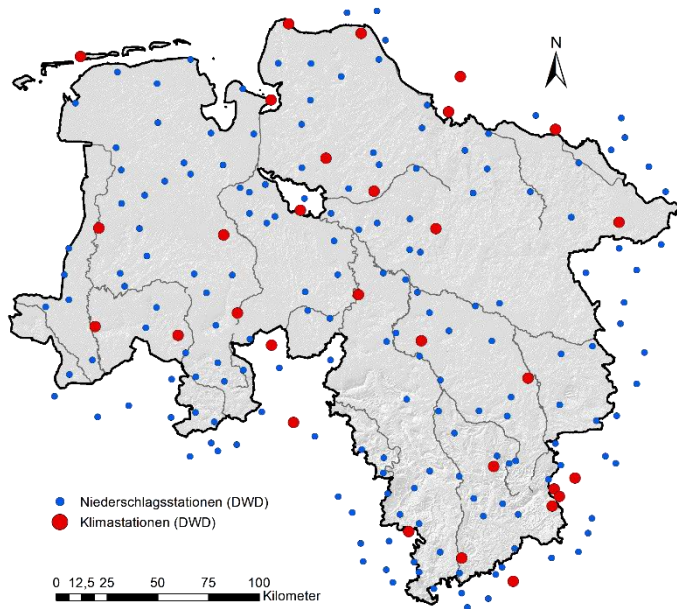


Abbildung 4.1: Übersicht über die für die Trendanalysen verwendeten Klima- und Niederschlagsstationen

Die Analysen der klimatischen Verhältnisse in der Vergangenheit erfolgten auf Basis von Stationsdaten (siehe Abbildung 4.1). Dazu wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) die Tageswerte von Klima- und Niederschlagsstationen aus dem Climate Data Center (CDC) heruntergeladen. Systematische Korrekturen fanden an den Daten nicht statt (wie z.B. Richterkorrektur). Die Auswahl der Stationen erfolgte für die Landesfläche von Niedersachsen mit einem ergänzenden Pufferstreifen von etwa 20 km. Das Gebiet umfasst insgesamt 205 Klimastationen und 956 Niederschlagsstationen. Für die Analysen der Stationsdaten

Tabelle 4.1: Betrachtete Kenngrößen des Klimas für die Trendanalysen

Variable	Einheit	Anmerkung	Kürzel
Tagesmitteltemperatur	°C	Durchschnittstemperatur	Tav
Niederschlagsmenge	mm	Summe der Niederschläge für Tage mit $N \geq 0$ mm/Tag	Psum
Verdunstung	mm	FAO-Grasreferenzverdunstung (Berechnung LBEG Geofakten 39, Anhang A.4)	ETP
Klimatische Wasserbilanz	mm	Differenz aus Niederschlagsmenge und Verdunstung	KWB
Thermische Vegetationsperiode	Tage	<u>Vegetationsbeginn</u> : Summe der Tagesmitteltemperatur von 200 Grad (Wärmesumme). Dabei erfolgt die Aufsummierung der Tagesmitteltemperatur über 0°C, wobei der Januar mit 0,5 und der Februar mit 0,75 gewichtet wird. (nach Ernst und Loeper, 1976)	TVP
		<u>Vegetationsende</u> : in der 2. Jahreshälfte erstmaliges Auftreten von 6 aufeinanderfolgenden Tagen unter 5°C Tagesmitteltemperatur, in Anlehnung an die Growing Season Length (z.B. Mueller et al., 2015).	

wurden zwei Zeiträume betrachtet. Ein Zeitraum von rund 70 Jahren (1951 bis 2021) und ein zweiter Zeitraum von rund 50 Jahren (1971 bis 2021). Die zu analysierenden Zeitreihen dürfen maximal einen Fehlwertanteil von 10% aufweisen. Daraus ergaben sich für den ersten bzw. zweiten Analysezeitraum 26 bzw. 31 nutzbare Klimastationen und 187 bzw. 208 nutzbare Niederschlagsstationen. Außerdem wurden Gebietsmittelzeitreihen für Niedersachsen vom DWD für den Zeitraum 1881 bis 2021 herangezogen.

## 4.2 Methodik

Die Analysen der klimatischen Veränderungen in der Vergangenheit erfolgten für eine Reihe unterschiedlicher meteorologischer Kenngrößen (vgl. Tabelle 4.1). Die Analysen wurden sowohl für das hydrologische Gesamtjahr (November bis Oktober) als auch für das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) bzw. für das Winterhalbjahr (November bis April) vorgenommen. Für jede Zeitreihe wurde an einer Messstation zunächst eine jährliche Serie gebildet, d.h. es wurde für jedes der analysierten Jahre ein Wert pro Jahr (Nov-Okt) bzw. pro Halbjahr (Sommer: Mai-Okt; Winter: Nov-Apr) berechnet. Anschließend wurde für jede dieser Wertereihen die Stärke des Trends und dessen Signifikanz ermittelt.

Die Trendstärke wurde mittels des Verfahren nach Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1968) ermittelt. Dabei werden der Betrag und die Richtung der Veränderung innerhalb des Betrachtungszeitraumes geschätzt. Im Anschluss wurde die Änderung der ausgewählten Kenngröße über den Zeitraum als absoluter Wert (z.B. in °C oder mm) ermittelt.

Ergänzend dazu wurde die Signifikanz der Trends (bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$ ) mit Hilfe eines Verfahrens nach Mann und Kendall berechnet (Mann, 1945; Kendall, 1975). Diese Größe beschreibt, ob der ermittelte Trend statistisch gesichert ist oder zufällig sein könnte.

### 4.3 Ergebnisse der Trendanalysen

Die räumlich differenzierten Analysen der einzelnen Klimastationen über den Zeitraum 1951 bis 2021 bzw. 1971 bis 2021 sind in Abbildung 4.2 bis Abbildung 4.6 dargestellt.

Die Abbildung 4.2 zeigt sehr gut, dass in allen Teilen Niedersachsens in dem Zeitraum 1951 bis 2021 die Tagesmitteltemperaturen zugenommen haben. Die

deutlichsten Zunahmen hat es im Winterhalbjahr gegeben, während im Sommerhalbjahr die Zunahmen geringer ausfallen.

Die Temperaturen für den Zeitraum 1971 bis 2021 nehmen landesweit signifikant zu. Bei der Betrachtung des Gesamtjahres, sowie für das Sommer- und auch Winterhalbjahr fallen insbesondere in der Harzregion die Zunahme der Temperaturen größer aus als in den anderen Regionen Niedersachsens.

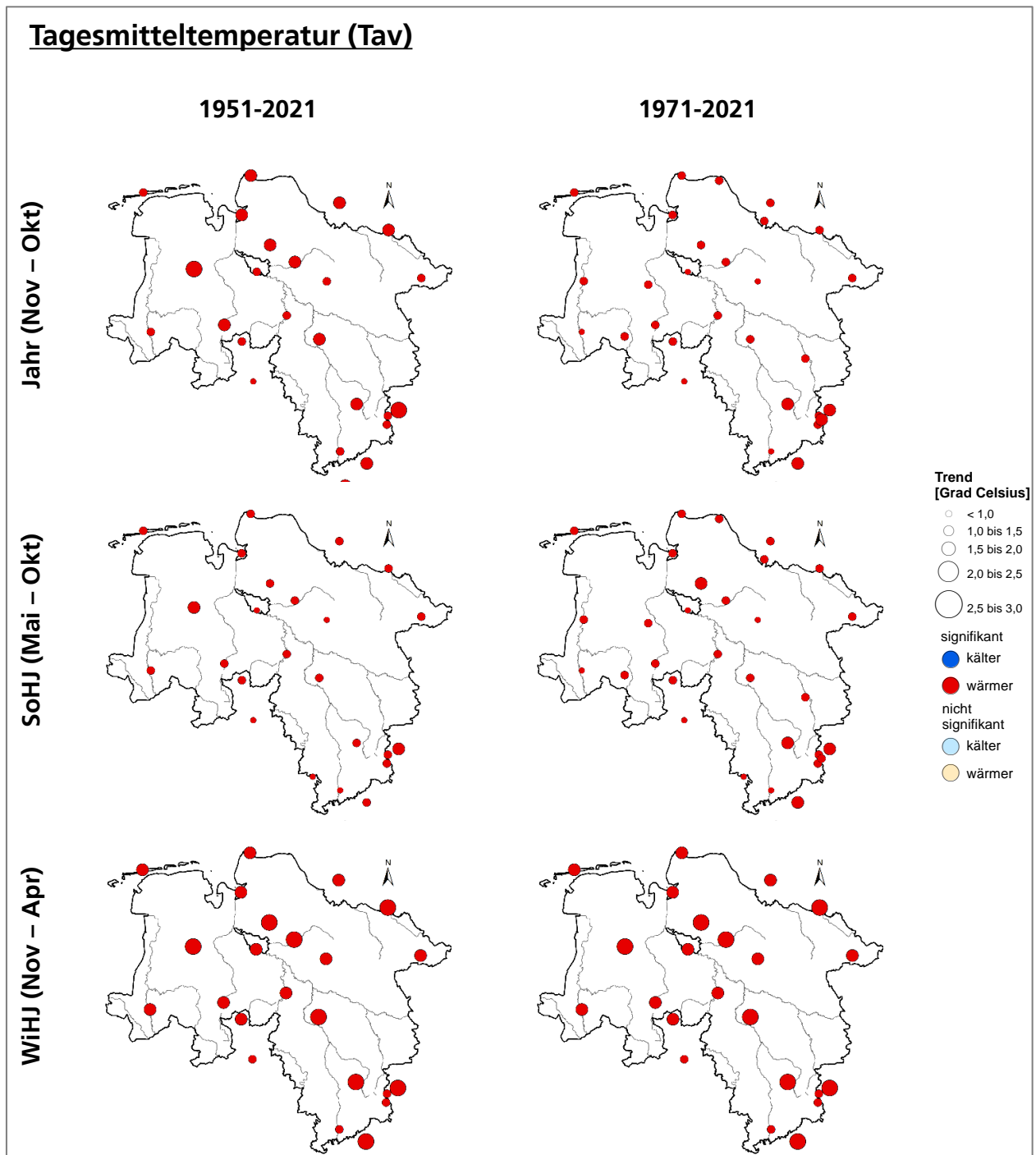


Abbildung 4.2: Trends der mittleren Temperatur (Tav) an den Messstationen des DWD für den Zeitraum 1951 bis 2021 bzw. 1971 bis 2021

In Abbildung 4.3 sind die Trends der Niederschlagssummen dargestellt. Im Zeitraum 1951 bis 2021 haben die Niederschlagssummen im Winterhalbjahr tendenziell zugenommen, insbesondere im Norden des Landes mit signifikant steigenden Trends. Die übrigen Landesteile zeigen zwar ebenfalls eine leichte Zunahme, die zumeist aber nicht signifikant ist und damit nicht statistisch abgesichert. Im Sommerhalbjahr kam es landesweit eher zu Abnahmen des Niederschlags, die aber ebenfalls nicht signifikant sind. Im Küstenbereich hingegen zeigen sich

leichte Zunahmen, die aber auch keine Signifikanz aufweisen.

Im Zeitraum 1971 bis 2021 haben die Niederschlagssummen im Mittel im Sommerhalbjahr landesweit tendenziell zugenommen, wobei vor allem im Norden einzelne Stationen einen signifikanten Trend aufweisen. Auch im Winterhalbjahr zeigt der Norden regional signifikant zunehmende Trends. In den Regionen Börden, Bergland und südliche Geestregion sind leichte Abnahmen zu erkennen, die nicht signifikant sind.

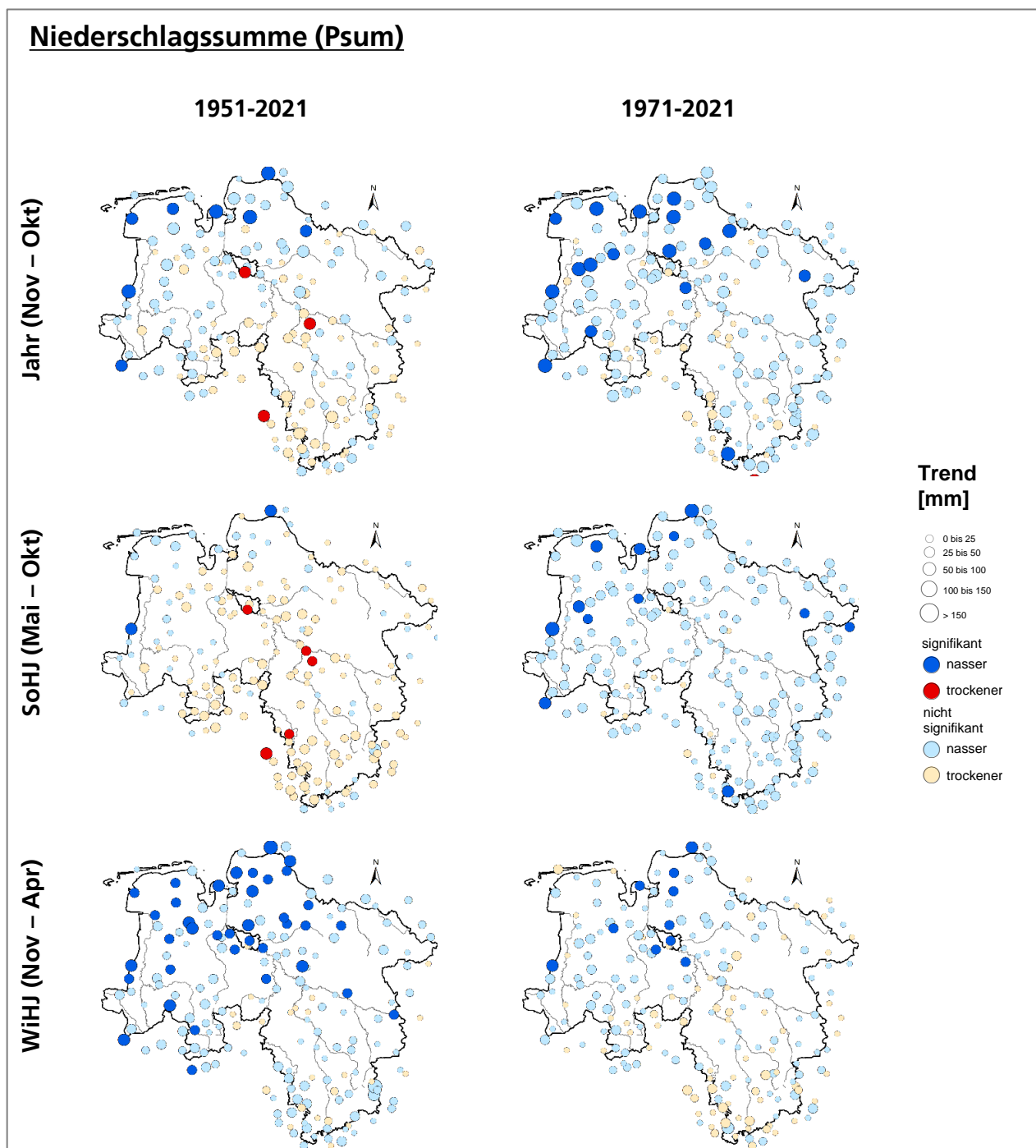


Abbildung 4.3: Trends der Niederschlagssummen (Psum) an den Messstationen des DWD für den Zeitraum 1951 bis 2021 und den Zeitraum 1971 bis 2021

In Abbildung 4.4 ist zu erkennen, dass die Verdunstung in dem Zeitraum 1951 bis 2021 an fast allen Messstationen sowohl im Gesamtjahr als auch für das Sommer- und Winterhalbjahr eine signifikante Zunahme zeigt. Aufgrund der geringen Stationszahl beschränken sich diese Aussagen auf den zentralen und nördlichen Teil von Niedersachsen.

Im Zeitraum 1971 bis 2021 hat die Verdunstung tendenziell landesweit zugenommen. Für das Jahr gibt es eine deutliche Zunahme der Verdunstung an den nördlich gelegenen Stationen und an den Stationen in der Börde und im Süden. Die Zunahme der Verdunstung im Winterhalbjahr fallen nicht so deutlich aus wie im Sommerhalbjahr, dafür zeigen aber mehr Stationen einen signifikanten Trend als im Sommerhalbjahr.

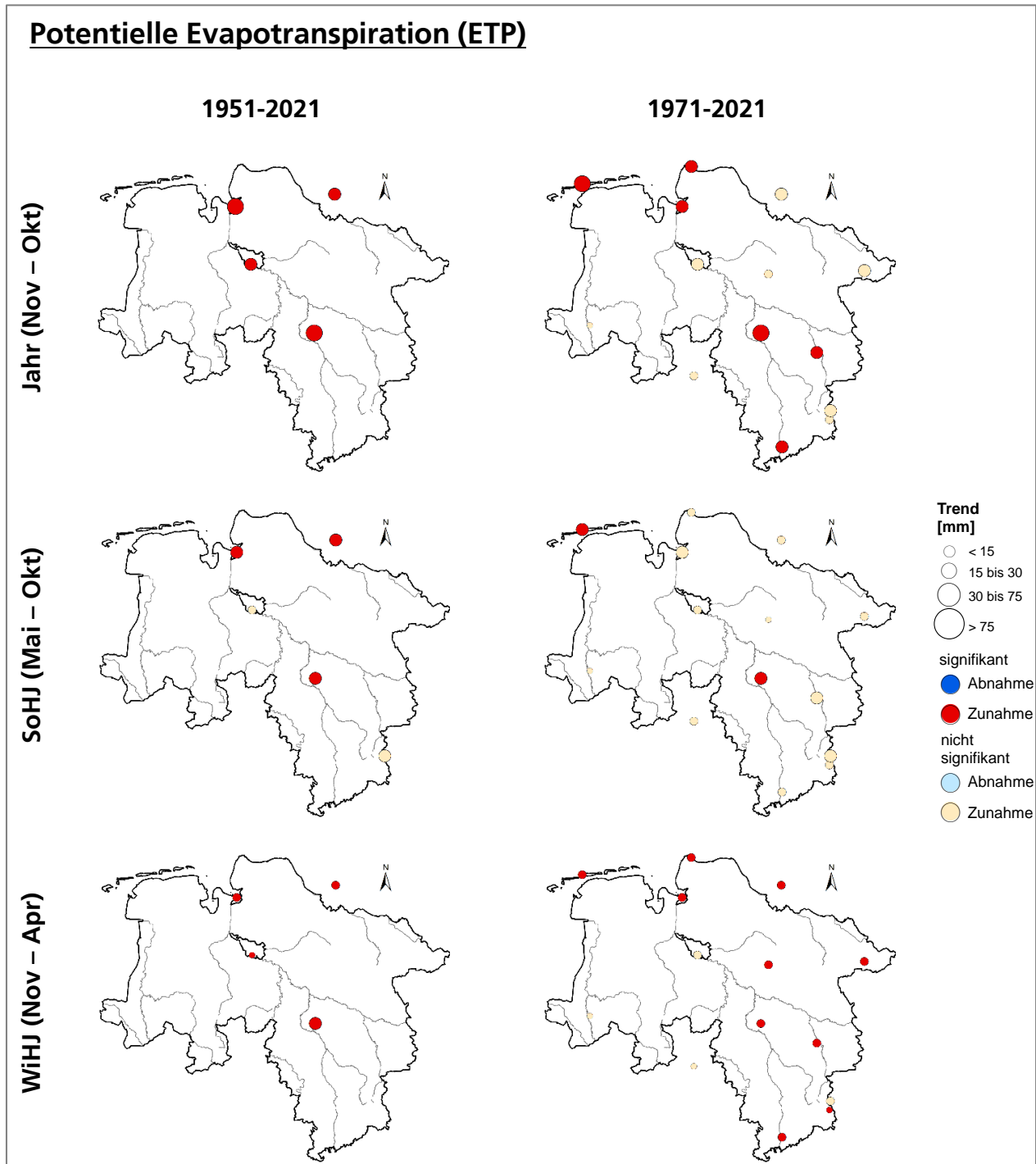


Abbildung 4.4: Trends der potentiellen Evapotranspiration (ETP) an den Messstationen des DWD für den Zeitraum 1951 bis 2021 und den Zeitraum 1971 bis 2021

Die Trends der klimatischen Wasserbilanz zeigen in Abbildung 4.5, dass in dem Zeitraum 1951 bis 2021 im Gesamtjahr und im Sommerhalbjahr zumindest im zentralen Niedersachsen eine Abnahme der verfügbaren Wassermengen erfolgte. Im Winterhalbjahr ist statistisch keine Änderung erkennbar.

Im Zeitraum 1971 bis 2021 sind im Gesamtjahr und für das Sommerhalbjahr statistisch keine Änderungen erkennbar. Im Winterhalbjahr zeigen drei Stationen signifikante Abnahmen (im Bereich der Inseln, des Berglandes und im Übergang von Geest zu Börden). Alle weiteren Messstationen zeigen landesweit keine signifikanten Veränderungen.

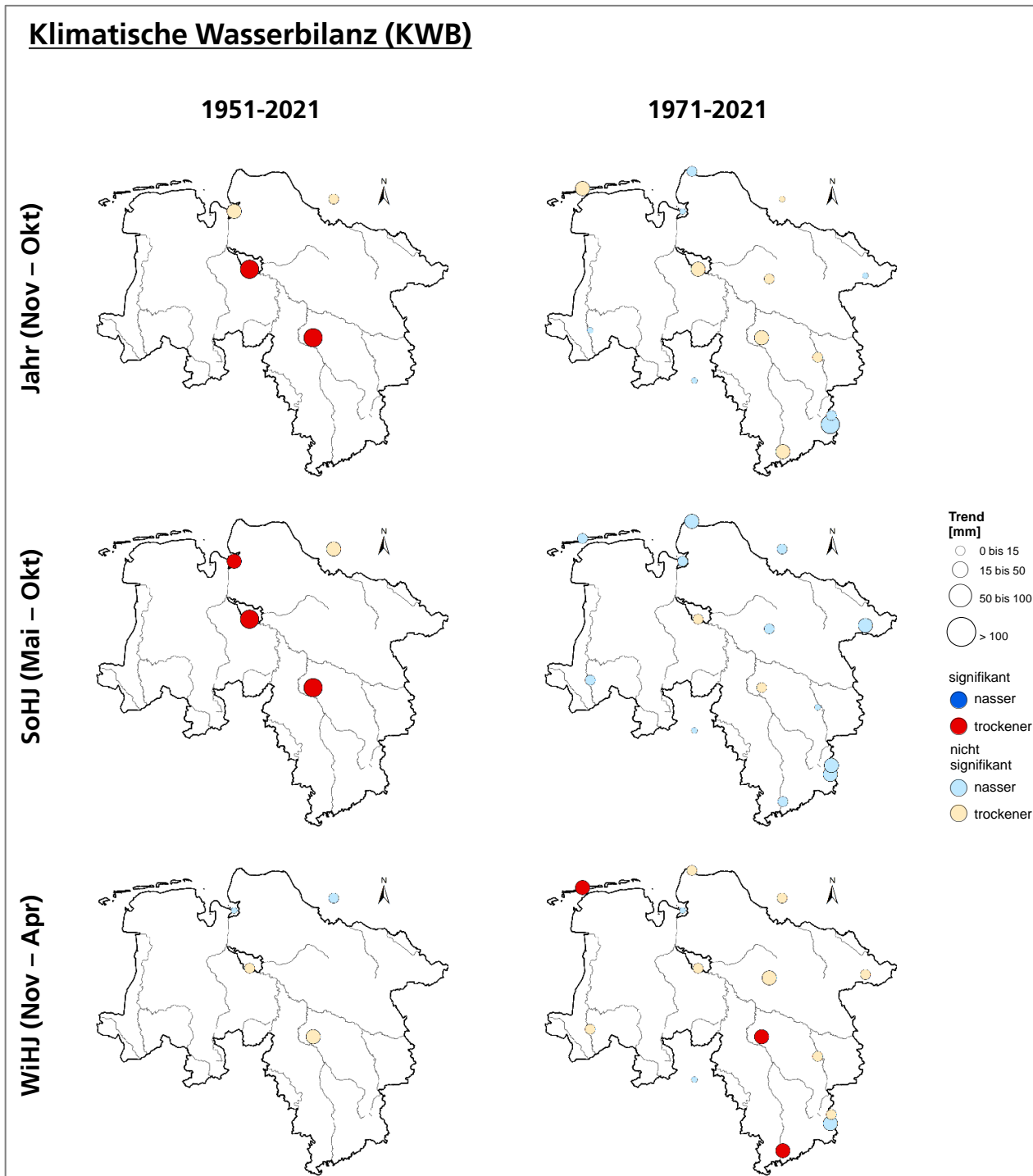


Abbildung 4.5: Trends der klimatischen Wasserbilanz (KWB) an den Messstationen des DWD für den Zeitraum 1951 bis 2021 und den Zeitraum 1971 bis 2021

In Abbildung 4.6 sind die Trends der thermischen Vegetationsperiode für den Beginn, das Ende und die Dauer abgebildet. In beiden Zeiträumen (1951 bis 2021 bzw. 1971 bis 2021) setzt der Beginn der Vegetationsperiode im zeitlichen Verlauf immer früher ein. Im ersten Zeitraum (1951 bis 2021) hat sich der Beginn der thermischen Vegetationsperiode insbesondere im Norden stärker verschoben als im südlichen Niedersachsen. Im zweiten Zeitraum (1971 bis 2021) ist der Beginn im Süden des Landes deutlich früher als in den restlichen Landesteilen und auch signifikant.

Die Dauer der Vegetationsphase hat sich in beiden Zeiträumen verlängert. Im ersten Zeitraum ist die Verlängerung landesweit signifikant zu erkennen. Im zweiten Zeitraum zeigt sich eine längere Vegetationsperiode im nördlichen und im südlichen Teil des Landes.

Das Ende der Vegetationsperiode setzt in beiden Zeiträumen tendenziell später ein. Die Veränderungen sind nicht signifikant und damit statistisch nicht abgesichert.

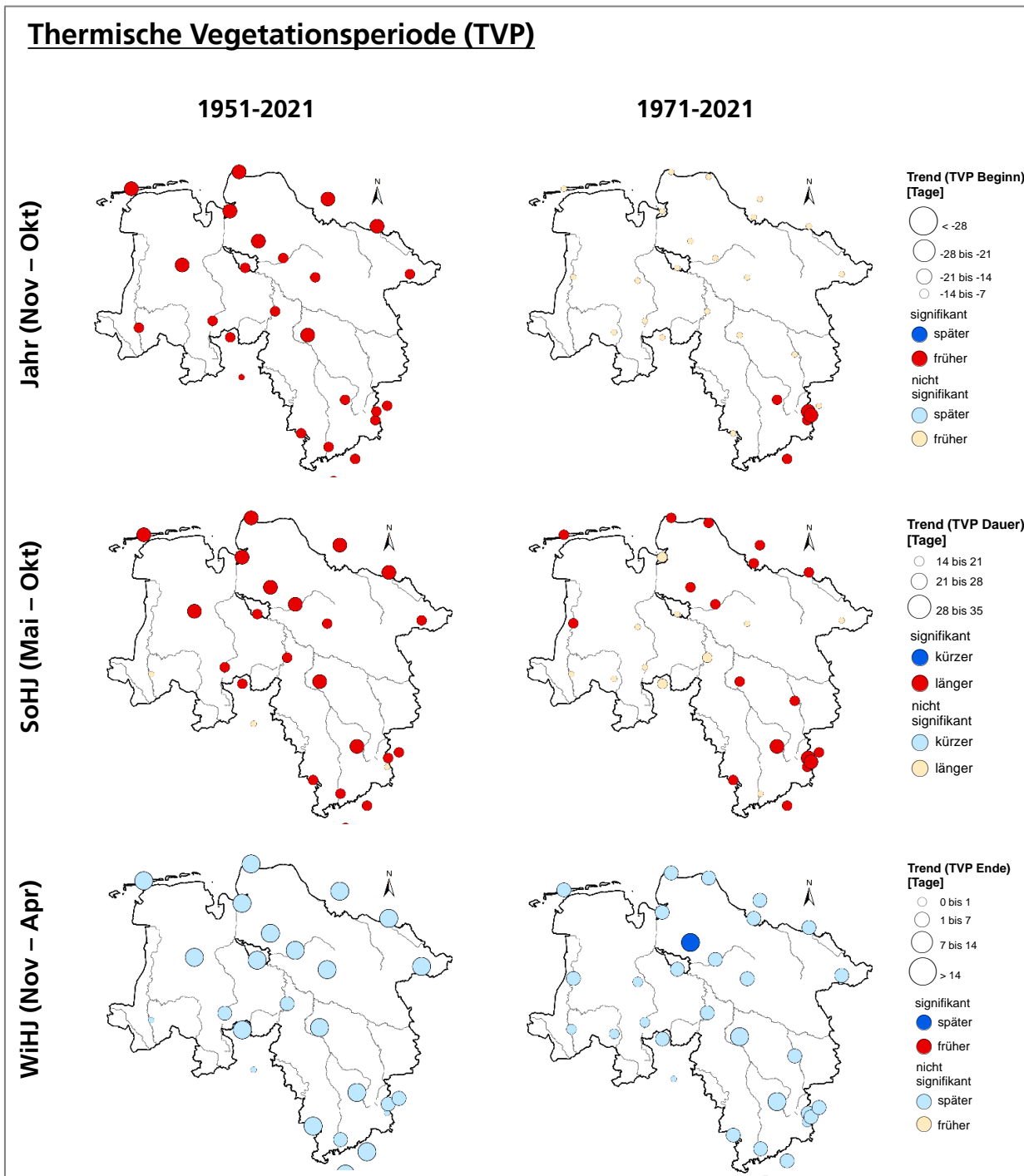


Abbildung 4.6: Trends der thermischen Vegetationsperiode (TVP) an den Messstationen des DWD für den Zeitraum 1951 bis 2021 und den Zeitraum 1971 bis 2021

## 4.4 Zusammenfassung

Aus den Trendanalysen der klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit können für Niedersachsen folgende Kernaussagen zusammengefasst werden:

- Die Temperaturen haben landesweit und über alle Zeiträume zugenommen.
- Die Niederschläge haben zugenommen, insbesondere im nördlichen Teil des Landes.
- Die Verdunstung hat landesweit zugenommen.
- Die Klimatische Wasserbilanz hat tendenziell eher abgenommen, v.a. seit den 1950er Jahren im Sommerhalbjahr und seit den 1970er Jahren im Winterhalbjahr
- Der Beginn der thermischen Vegetationsperiode setzte früher ein.
- Die Dauer der thermischen Vegetationsperiode hat sich deutlich verlängert.
- Das Ende der thermischen Vegetationsperiode setzte tendenziell später ein.

Tabelle 4.2: Mittlere Veränderung von Klimakenngößen in Niedersachsen in der Vergangenheit als linearer Trend auf Basis von Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, Climate Data Center)

Kenngröße	Abk.	Einheit	Jahr			SoHJ			WiHJ		
			1881-2021 <sup>1)</sup>	1951-2021 <sup>2)</sup>	1971-2021 <sup>2)</sup>	1881-2021 <sup>1)</sup>	1951-2021 <sup>2)</sup>	1971-2021 <sup>2)</sup>	1881-2021 <sup>1)</sup>	1951-2021 <sup>2)</sup>	1971-2021 <sup>2)</sup>
<b>Mittlere Temperatur</b>	Tav	°C	1,7	2,1	1,7	1,5	1,7	1,7	1,9	2,3	1,7
<b>Maximale Temperatur</b>	Txq90	°C	---	2,7	2,7	---	2,9	2,5	---	2,7	3,3
<b>Minimale Temperatur</b>	Tnq10	°C	---	2,0	1,1	---	1,1	1,1	---	2,9	1,8
<b>Niederschlag</b>	Psum	mm	83,8	14,0	54,4	2	-17,5	43,2	76,6	44,8	15,2
<b>Verdunstung</b>	ETP	mm	---	75,0	44,5	---	47,6	27,1	---	26,6	17,5
<b>Klimatische Wasserbilanz</b>	KWB	mm	---	-110,8	-6,8	---	-96,6	27,9	---	-13,0	-32,3
<b>Thermische Vegetationsperiode</b>	TVP	Tage	<b>Beginn</b>			<b>Dauer</b>			<b>Ende</b>		
			1951-2021 <sup>2)</sup>	1971-2021 <sup>2)</sup>	---	1951-2021 <sup>2)</sup>	1971-2021 <sup>2)</sup>	---	1951-2021 <sup>2)</sup>	1971-2021 <sup>2)</sup>	
			---	-19,5	-11,1	---	27,1	21,9	---	7,3	9,7

1) Gebietsmittel Niedersachsen

2) Stationsmittel Niedersachsen



## 5 Das Klimamodell-Ensemble von KliBiW

### 5.1 Globale und regionale Klimaprojektionen

Die natürliche Variabilität des Klimasystems ist ein Faktor, der die Vorhersagbarkeit der langfristigen Veränderungen des Klimas für die Zukunft erschwert. Für die Simulation des zukünftig zu erwartenden Klimas werden in der Regel globale und regionale Klimamodelle verwendet. Diese Modelle sind sogenannte Zirkulationsmodelle, die unter Verwendung physikalischer und atmosphärischer Gesetzmäßigkeiten Projektionen eines zukünftigen Klimas in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen wiedergeben (DWD, 2021). Gleichzeitig sind die ablaufenden Prozesse und Wechselwirkungen sehr komplex, wodurch das Klimasystem sehr sensitiv (quasi chaotisch) auf minimale Änderungen bei den Start- und Randbedingungen reagiert. Solche Prozesse im Klimasystem können von Klimamodellen nicht oder nur vereinfacht abgebildet werden. Die Klimaforschung entwickelt sich immer mehr in Richtung einer Erdsystemforschung, bei der neben den physikalischen Prozessen auch die Wechselwirkung mit den biogeochemischen Kreisläufen und der menschlichen Aktivität berücksichtigt werden (Abbildung 5.2). Letztere ist durch wechselhafte ökonomische, soziale und politische Interessen geprägt. Um mögliche Entwicklungen des Klimas im 21. Jahrhundert abzuschätzen, hat der IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Zwischenstaatlicher Ausschuss zum Klimawandel) verschiedene Emissionsszenarien formuliert, sogenannte Repräsentative Konzentrationspfade (RCP-Szenarien) (Weidlich, 2020). Sie sind die Grundlage der Klimaprojektionen für den fünften Sachstandsbericht des IPCC. Diese Szenarien geben die anthropogen bedingten Treibhausgasemissionen bzw. -konzentrationen vor und resultieren in einem zusätzlichen Strahlungsantrieb ( $W/m^2$ ), nach dem sie jeweils benannt sind, bezogen auf das Jahr 1750. Die Spannbreite reicht dabei von einem Strahlungsantrieb von  $2,6 W/m^2$  (Szenario mit Klimaschutz) bis  $8,5 W/m^2$  (Szenario ohne Klimaschutz) (Michaelowa, 2016).

Die Szenarien dienen als Antrieb bzw. Eingangsdaten für Klimamodelle. Grundsätzlich unterscheidet man zunächst zwischen zwei Kategorien von Klimamodellen: globale Klimamodelle (GCM: Global Circulation Models) und

regionale Klimamodelle (RCM: Regional Climate Model). Globale Klimamodelle simulieren die Prozesse im Klimasystem mit den physikalischen Vorgängen in der Erdatmosphäre, den Ozeanen und der Erdoberfläche für die gesamte Erde innerhalb eines dreidimensionalen Gitternetzes. Da die Modelle sehr komplex sind und eine große Menge an Daten anfällt, ist die räumliche Auflösung relativ grob (mehrere hundert Kilometer Gitterweite) (KLIWA, 2022). Regionale Klimamodelle simulieren im Gegensatz zu den globalen Klimamodellen einen bestimmten räumlichen Ausschnitt in einer höheren räumlichen Auflösung. Dabei werden als Eingangsgrößen bzw. Randbedingungen wesentliche Ergebnisse der globalen Modelle verwendet. Dieses Verfahren nennt sich „Downscaling“ (Krähenmann, 2021). Für die Regionalisierung globaler Klimamodelle gibt es zwei unterschiedliche Downscaling-Verfahren, die dynamischen Regionalmodelle und die statistischen Regionalmodelle. Dynamische Regionalmodelle simulieren das Klima in einem dreidimensionalen Ausschnitt der Erde anhand von atmosphärischen Zirkulationsmustern und werden dabei durch die Eingangsdaten der zugrundeliegenden Globalmodelle angetrieben. Durch die höhere räumliche Auflösung können bei diesem Verfahren z. B. Prozesse der Niederschlagsbildung besser beschrieben werden (Jacob et al., 2017). Ein anderes Verfahren des Downscaling-Ansatzes ist die statistische Methode, also das statistische Regionalmodell. Diese basieren auf lokalen Stationsdaten. In der statistischen Regionalisierung werden Beziehungen zwischen dem Zustand der Atmosphäre auf der großräumigen Skala und den regionalen Klimaverhältnissen an der Landoberfläche quantifiziert. (Kreienkamp, 2017).

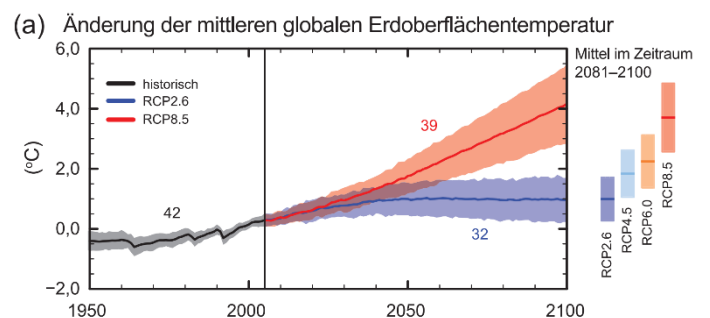


Abbildung 5.1: Die Szenarien der Treibhausgas-Entwicklung aus dem 5. Sachstandsbericht des IPCC sowie die daraus resultierende Veränderung der Globaltemperatur (bezogen auf 1986-2005) im Vergleich, jeweils mit der Anzahl der für die Berechnung verwendeten Modelle aus CMIP5 (IPCC, 2013/2014)

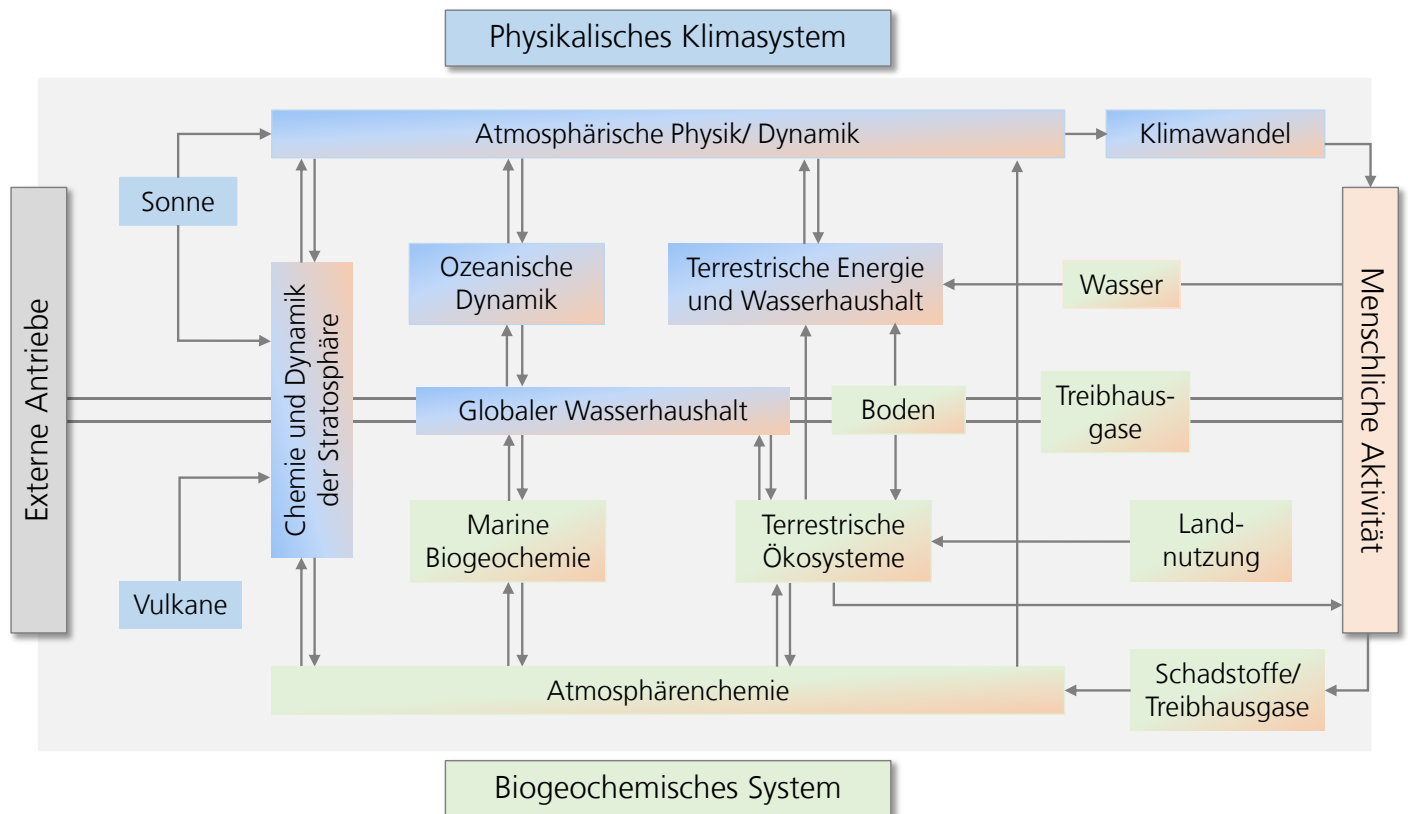


Abbildung 5.2: Schema des Erdsystemmodells mit deren Wechselwirkungen untereinander (physikalische Klimasystem in Blau, das biogeochemische System in grün und der Einfluss des Menschen in Rot dargestellt). Latif 2009, S.15

## 5.2 Ensemble-Mitglieder in KliBiW

Um für den 5. Sachstandsbericht des IPCC abgestimmte Experimente von Klima- bzw. Erdsystemmodellen mit einheitlichen Rahmenbedingungen bereitzustellen, wurde ein Vergleichsprojekt durchgeführt, das sog. Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5; Taylor et al., 2012). Die entsprechenden Simulationen basieren auf den RCP-Szenarien. Da die räumliche Auflösung der Ergebnisse aus CMIP5 nicht ausreicht, um regionale Klimaänderungen abzuschätzen, wurde durch das World Climate Research Programme (WCRP) die CORDEX-Initiative ins Leben gerufen (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment). Für verschiedene Regionen der Erde wurden Datensätze von Regionalen Klimamodellen, angetrieben von unterschiedlichen Globalmodellen, in einer Auflösung von etwa 50 km erstellt. Für Europa wurden ergänzend dazu Simulationen in einer Auflösung von rund 12,5 km durchgeführt (EURO-CORDEX; Jacob et al., 2013). Um die Bandbreite der möglichen Klimaentwicklungen für Deutschland noch sicherer abschätzen so können, wurde im Zuge des Projektes ReKliEs-De (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland; Hübner et al., 2017) die Modellmatrix noch einmal erweitert bzw. wurden weitere Modellkombinationen aus Global- / Regionalmodellen gerechnet.

Das im Zuge von KliBiW 7 betrachtete Klimaszenario ist das RCP8.5, ein Szenario ohne nennenswerte Maßnahmen zum

Klimaschutz (z.B. durch die Reduktion von Treibhausgas-Emissionen) in der Zukunft auf globaler Ebene. Für dieses Szenario lagen auf Basis von EURO-CORDEX und ReKliEs-De Mitte 2017 bereits 37 Modellsimulationen vor. Um die Gesamtheit der möglichen Entwicklungen in der Zukunft unter Berücksichtigung der natürlichen Klimavariabilität und der jeweiligen Modellunsicherheiten noch besser zu erfassen, wurde dieses Ensemble an regionalen Klimaprojektionen durch das Projekt PRINCIPLES (Producing Regional Climate Projections Leading to European Services) im Rahmen des Copernicus Climate Change Service (C3S) noch einmal erweitert. Die Verarbeitung dieser Menge an klimatischen Eingangsdaten stellt für die Wirk- bzw. Impaktmodellierung, die die Folgen des Klimawandels unter bestimmten Fragestellungen betrachtet, eine große Herausforderung dar bzw. ist durch die Endnutzer zum Teil nicht leistbar. Daher wurde auf Initiative des Bund-Länder-Fachgesprächs (BL-FG) „Interpretation von regionalen Klimamodelldaten“ der Versuch unternommen, dieses Gesamtensemble auf eine handhabbare Größe zu reduzieren, ohne wesentliche Informationen aus der maximalen Bandbreite aller verfügbaren Klimaprojektionen zu verlieren (siehe auch Linke et al., 2023). Zu diesem Zweck wurden zunächst Modelle aus der Matrix entfernt, von deren Nutzung die jeweiligen Entwickler aus bestimmten Gründen abgeraten haben (vgl. Errata Table EURO-CORDEX). Anschließend wurde mit den verbliebenen Modellen eine Qualitätsprüfung anhand ausgewählter Kriterien in Form eines Klimaaudits durchgeführt (LfU Bayern, 2020). Das Ergebnis bildet das sog. BL-FG Referenz-Ensemble. Dieses

wurde abschließend mit Hilfe einer statischen Methode des DWD (Dalelane et al., 2018) auf sechs Modelle reduziert, welche das sog. BL-FG Kern-Ensemble bilden, und in Bezug auf ausgewählte klimatische Kenngrößen rund 90% der Bandbreite des Referenz-Ensembles für Deutschland abdecken. Da sich dieses Kern-Ensemble aktuell nur aus dynamischen Modellen zusammensetzt, gibt es vom Bund-Länder-Fachgespräch noch eine Empfehlung zur Berücksichtigung von zwei zusätzlichen statistischen Regionalmodellen. Dieser Empfehlung folgend setzt sich das in KliBiW 7 genutzte Ensemble aus insgesamt acht regionalen Klimamodellprojektionen zusammen (vgl. Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2). Die Daten der sechs dynamischen Regionalmodelle aus dem Kern-Ensemble gehören wiederum zu einem größeren Ensemble von Modelldaten, die vom DWD im Rahmen des Ressortforschungsprojektes BMDV-Expertennetzwerk Themenfeld 1 aufbereitet wurden (Brienen et al., 2020). Im Zuge dieser Aufbereitung erfolgte

zunächst eine Bias-Adjustierung der Modelldaten. D.h. die Daten wurden auf systematische Abweichungen gegenüber verschiedenen Referenz-Beobachtungsdaten (u.a. HYRAS, COSMO-REA6) untersucht. Anschließend wurden unterschiedliche mathematische Verfahren auf die Modelldatenreihen angewendet, um diese Abweichungen im Beobachtungszeitraum zu minimieren, unter weitestgehender Erhaltung der physikalischen Konsistenz der Klimagrößen untereinander. Unter der Annahme, dass die Abweichungen sich in ähnlicher Weise auch in der Zukunft fortsetzen, wurden die ermittelten Anpassungsregeln auch auf den zukünftigen Szenarienzeitraum der Modelldaten angewendet. In einem abschließenden Schritt wurden die adjustierten Daten dann vom ursprünglichen Raster aus EURO-CORDEX (12,5x12,5 km) über ein Regionalisierungsverfahren auf das 5x5 km Raster der HYRAS-Daten interpoliert (Krähenmann, 2021).

Tabelle 5.1: Das Modell-Ensemble für KliBiW 7

Globalmodell	Regionalmodell	Abkürzung	Zeitraum	Typ
EC-EARTH_r1	RACMO22E	ECE_r1_RACMO	1951 bis 2100	Klimaprojektion
EC-EARTH_r12	RACMO22E	ECE_r12_RACMO	1951 bis 2100	Klimaprojektion
HadGEM2-ES	WETTREG2013	HadGEM_W13	1951 bis 2100	Klimaprojektion
HadGEM2-ES	WRF361H	HadGEM_WRF	1970 bis 2099	Klimaprojektion
MIROC5	CCLM4-8-17	MIROC_CCLM	1951 bis 2100	Klimaprojektion
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	MPI_CCLM	1951 bis 2100	Klimaprojektion
MPI-ESM-LR	WETTREG2013	MPI_W13	1951 bis 2100	Klimaprojektion
MPI-ESM-LR	WRF361H	MPI_WRF	1970 bis 2100	Klimaprojektion

Tabelle 5.2: Modellmatrix der verfügbaren Klimaprojektionen aus den Projekten EURO-CORDEX und ReKliEs (Stand: 2018) für das Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) für die Projektphase von KliBiW7

RCM GCM	CCLM	REMO	WRF361H	WETTREG 2013	STARS3	RCA4	RACMO	HIRHAM5
MPI-ESM_LR	EURO-CORDEX	<del>EURO-CORDEX *)</del>	EURO-CORDEX	ReKliEs	ReKliEs	EURO-CORDEX	---	---
CNRM-CM5	<del>EURO-CORDEX</del>	ReKliEs	---	ReKliEs	ReKliEs	<del>EURO-CORDEX</del>	---	---
HadGEM2-ES	EURO-CORDEX	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	EURO-CORDEX	EURO-CORDEX	---
EC-EARTH	EURO-CORDEX	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	EURO-CORDEX	EURO-CORDEX **)	<del>EURO-CORDEX</del>
CanESM2	ReKliEs	ReKliEs	---	ReKliEs	ReKliEs	---	---	---
MIROC5	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	---	---	---
IPSL-CM5A-MR	---	---	<del>EURO-CORDEX</del>	---	---	EURO-CORDEX	---	---
		Verwendung in KliBiW 7						
	<del>EURO-CORDEX</del>	Ausschluss aus BL-FG						
	ReKliEs	Referenz-Ensemble nach Plausibilitäts- und Qualitätsprüfung						
		*) REMO jeweils angetrieben mit dem Lauf1 und Lauf2 des GCM MPI-ESM-LR						
		**) RACMO jeweils angetrieben mit dem Lauf1 und Lauf12 des GCM EC-EARTH						

### 5.3 Aufbereitung von Klimamodelldaten

Die Daten des Modell-Ensembles in KliBiW 7 lagen im Original als netCDF-Dateien im Binärformat vor. Die räumliche Auflösung der dynamischen Ensemble-Mitglieder betrug, wie in Kapitel 5.2 bereits erläutert, 5x5 km und entsprach dem Raster der HYRAS-Daten des DWD. Die beiden statistischen Läufe mit dem Regionalmodell WETTREG2013 lagen im ursprünglichen Raster von EURO-CORDEX vor (12,5x12,5 km). Um eine einheitliche Datenbasis für die Impaktmodellierung zu schaffen, wurden die verschiedenen Datensätze auf ein gemeinsames 5x5 km Raster interpoliert. Hierzu wurden die netCDF-Daten mittels der Climate Data Operators (CDO) zunächst in ASCII-Daten umgewandelt. Anschließend erfolgte die Interpolation auf ein neues einheitliches 5x5 km Raster über die Inverse Distanz in Form des Quadrantenverfahrens.

# 6 Analysen der möglichen klimatischen Verhältnisse der Zukunft

## 6.1 Datenbasis

Die Analysen der möglichen klimatischen Verhältnisse in der Zukunft für das Projekt basieren auf einem Ensemble von acht Klimamodellläufen, die aus jeweils einem antreibenden Globalmodell sowie einem Regionalmodell bestehen (vgl. Tabelle 5.1). Sechs dieser Modelle sind dynamische Regionalmodelle, deren Daten einer Bias-Adjustierung unterzogen wurden. Die zwei weiteren Modellläufe wurden mit einem statistischen Modell (hier WETTREG2013) gerechnet. Diese Daten wurden keiner Bias-Adjustierung unterzogen. Nach der Aufbereitung der Daten (vgl. Kapitel 5.2) lagen die Informationen zu allen Modellen und Klimavariablen als Tageswerte auf einem einheitlichen 5x5 km Raster für Niedersachsen vor. Der Zeitraum der Modellzeitreihen erstreckt sich von 1951 bzw. 1970 bis 2100. Lediglich der Modelllauf HadGEM\_WRF361H geht bis zum Jahr 2099. Die Modelle wurden bis zum Jahr 2005 mit historisch beobachteten Treibhausgas-Emissionen angetrieben (sog. historischer Lauf). Ab dem Jahr 2006 bis zum Jahr 2100 (bzw. 2099) erfolgte der Antrieb der Modelle mit den zukünftigen Treibhausgas-Emissionen, aus dem Szenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5) (sog. Szenarien-Lauf).

## 6.2 Methodik

Die zukünftigen klimatischen Verhältnisse werden anhand von Veränderungen der analysierten Kenngrößen gegenüber einem Referenzzeitraum dargestellt. Gemäß der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) erfolgt die Betrachtung des Klimas und seiner Änderungen immer für einem 30-jährigen Zeitraum (DWD 2021). Ein Grund hierfür ist der Einfluss der natürlichen Variabilität des Klimas (d.h. schwer berechenbare Schwankungen) in verschiedenen Zeitabschnitten. Mit Unterstützung von Klimamodellen können die mittleren statistischen Eigenschaften des Klimas über langjährige Zeiträume relativ gut simuliert werden. Schwierigkeiten bereiten jedoch die sensitiven Schwankungen aufgrund der natürlichen Variabilität des Klimas innerhalb kürzerer Zeitabschnitte.

Zunächst werden für jeden der acht Klimamodellläufe des Kern-Ensembles die Kenngrößen entsprechend Tabelle 4.1 berechnet. Die Berechnung erfolgt für drei verschiedene Zeiträume. Einerseits für den Referenzzeitraum (1981 bis 2010) und andererseits für zwei unterschiedliche Zeiträume in der Zukunft (nahe Zukunft: 2021 bis 2050 und ferne Zukunft: 2071 bis 2100). Für jeden Modelllauf werden anschließend die jeweiligen Mittelwerte der 30-Jahres-Zeiträume der Zukunft ins Verhältnis gesetzt zu dem 30-Jahres-Mittelwert des Referenzzeitraums. Das Ergebnis sind

die modellspezifischen Veränderungen der jeweiligen Kenngröße in der Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum. Die Abweichungen werden als Klimaänderungssignal bezeichnet. Jedes Klimamodell produziert aufgrund unterschiedlicher Berechnungsansätze unterschiedliche Ergebnisse trotz gleicher Randbedingungen. Aus den verschiedenen Änderungssignalen ergibt sich eine Bandbreite an möglichen Ergebnissen für die jeweiligen Zeiträume in der Zukunft. Im nächsten Kapitel 6.3 erfolgt die Darstellung der Mittelwerte aus dieser Bandbreite als Raster in Kartenform sowie die minimale, mittlere und maximale Ausprägung bezogen auf Regionen. Hierbei sei darauf hingewiesen, dass, auch wenn der Mittelwert für Ensemblesimulationen der Vergangenheit häufig die realen Verhältnisse am besten abbildet, alle Klimaprojektionen eines Ensembles für die Zukunft als gleich wahrscheinlich angesehen werden müssen.

## 6.3 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Klimaprojektionen in Form einer Kartendarstellung und eines Balkendiagramms dargestellt (Abbildung 6.1 bis Abbildung 6.15).

Die Ergebnisse der Klimaprojektionen unter dem Szenario RCP 8.5 in Abbildung 6.1 zeigen einen deutlichen Temperaturanstieg in Niedersachsen im Laufe des 21. Jahrhunderts. Dabei fallen die Temperaturzunahmen in der nahen Zukunft geringer aus als in der fernen Zukunft. Die mittlere projizierte Änderung der Jahresmitteltemperatur, bezogen auf den Referenzzeitraum 1981 bis 2010, beträgt für ganz Niedersachsen für die nahe Zukunft +1,1 °C und für die ferne Zukunft +3,3 °C. Das bedeutet die Temperaturen werden im Jahresmittel in der nahen Zukunft bei 10,5 °C und in der fernen Zukunft bei 12,6 °C liegen. Im Sommerhalbjahr beträgt die mittlere Änderung in der nahen Zukunft +1,2 °C, während die Projektionen für die ferne Zukunft eine Zunahme von +3,3 °C aufzeigen. Die Temperaturen werden dann im Sommer in der nahen Zukunft 16,3 °C betragen und in der fernen Zukunft auf 17,9 °C klettern. Im Winterhalbjahr beträgt die mittlere Änderung zum Referenzzeitraum in der nahen Zukunft +1,1°C und in der fernen Zukunft eine Änderung von +3,2 °C. Die absoluten Temperaturwerte werden dann in der nahen Zukunft 5,6 °C und in der fernen Zukunft 8,3 °C betragen.

In Abbildung 6.2 sind die projizierten Änderungen der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die ausgewählten Regionen anhand der Bandbreiten zu sehen. Allgemein zeigen die Bandbreiten der Tagesmitteltemperatur keine großen Schwankungen. Es zeigt sich, dass im Mittel sowohl für das Jahr (November bis Oktober) als auch das Sommer-(Mai bis Oktober) sowie Winterhalbjahr (November bis April) die Zunahmen der Temperaturen von den nördlichen Inseln hin zum Bergland leicht ansteigen sowohl in der nahen als

auch fernen Zukunft. Wobei die Regionen Marschen, Niederungen, Geest, Börden und Bergland eine relativ ähnliche Änderung erfahren. Die Inseln erfahren eine mittlere Änderung der Tagesmitteltemperatur sowohl für das Jahr als auch das Sommer- und Winterhalbjahr in der nahen Zukunft von ca. 0,5 °C und in der fernen Zukunft von ca. 1,4 °C. Die weiteren Regionen weisen für das Jahr eine mittlere Änderung in der nahen Zukunft von ca. 1,0 im Norden (Marschen) bis 1,2 °C im Süden (Bergland) und in der fernen Zukunft eine Änderung von ca. 3,0 °C (Marschen) bis 3,4 °C (Bergland) auf. Im Sommerhalbjahr in der nahen / fernen Zukunft sind für die Regionen Marschen, Niederungen, Geest über Börde und Bergland mittlere Änderungen von ca. 1,0 °C / 3,2 °C (Marschen) bis etwa 1,2 °C / 3,4 °C (Bergland) zu erwarten. Im Winterhalbjahr sind die mittleren Änderungen ähnlich den Änderungen im Sommerhalbjahr.

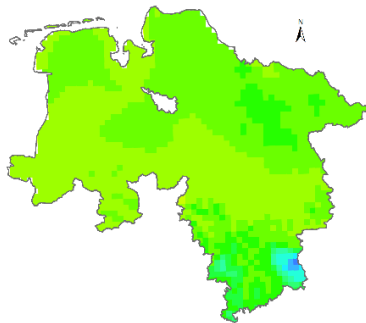
# Tagesmitteltemperatur (Tav)

Jahr (Nov – Okt)

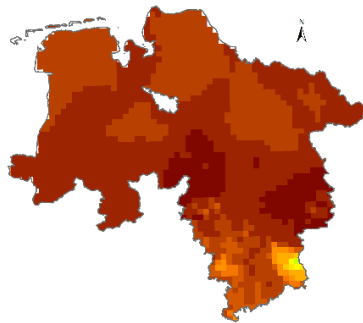
SoHJ (Mai – Okt)

WiHJ (Nov – Apr)

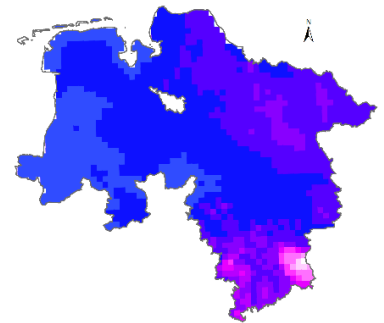
1981-2010



Gebietsmittel: 9,4 °C

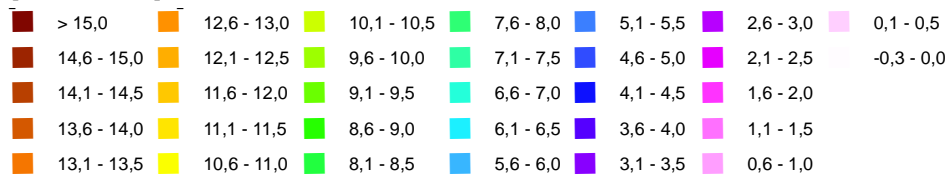


Gebietsmittel: 14,6 °C

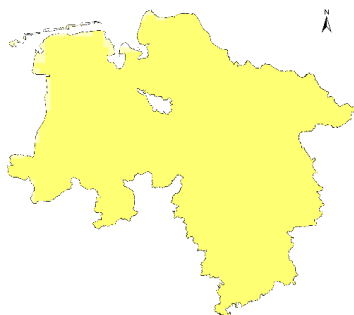


Gebietsmittel: 4,1 °C

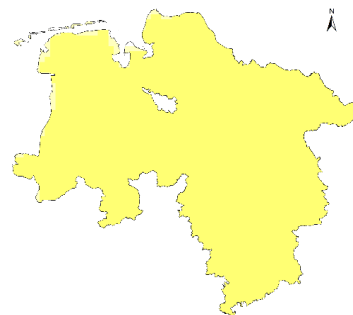
[Grad Celsius]



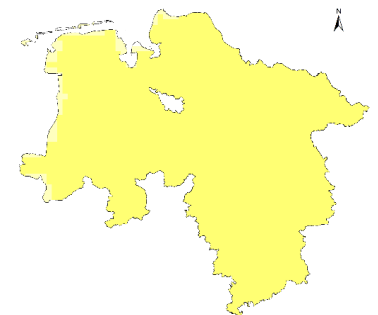
Änderung  
nahe Zukunft  
2021-2050



Mittlere Änderung: +1,1 °C

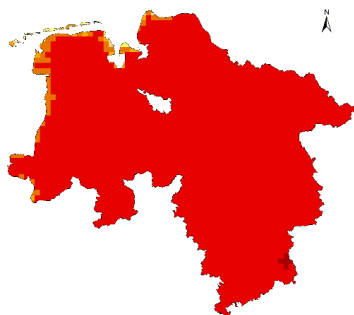


Mittlere Änderung: +1,2 °C

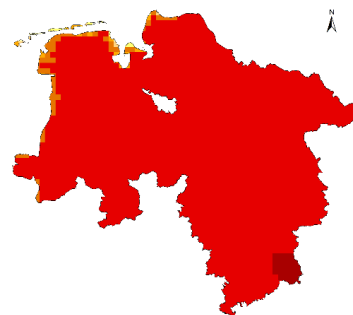


Mittlere Änderung: +1,1 °C

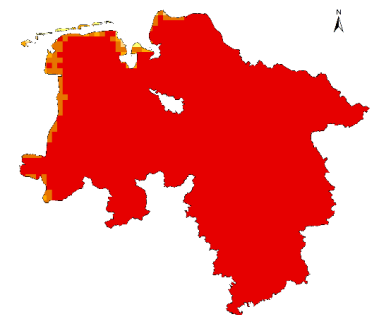
Änderung  
ferne Zukunft  
2071-2100



Mittlere Änderung: +3,3 °C

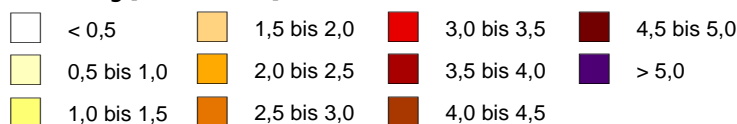


Mittlere Änderung: +3,3 °C



Mittlere Änderung: +3,2 °C

Änderung [Grad Celsius]



Datengrundlagen:  
HYRAS-DE-TAS v5.0 (DWD)  
AR-NI v2.0 (Hajati et al., 2022)

Abbildung 6.1: Die Tagesmitteltemperatur für die Referenzperiode 1981 bis 2010 für das hydrologische Jahr (November bis Oktober) sowie das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) und das Winterhalbjahr (November bis April). Mittlere projizierte Veränderung der Tagesmitteltemperatur in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5 gegenüber dem Referenzzeitraum für die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2071 bis 2100) Zukunft.

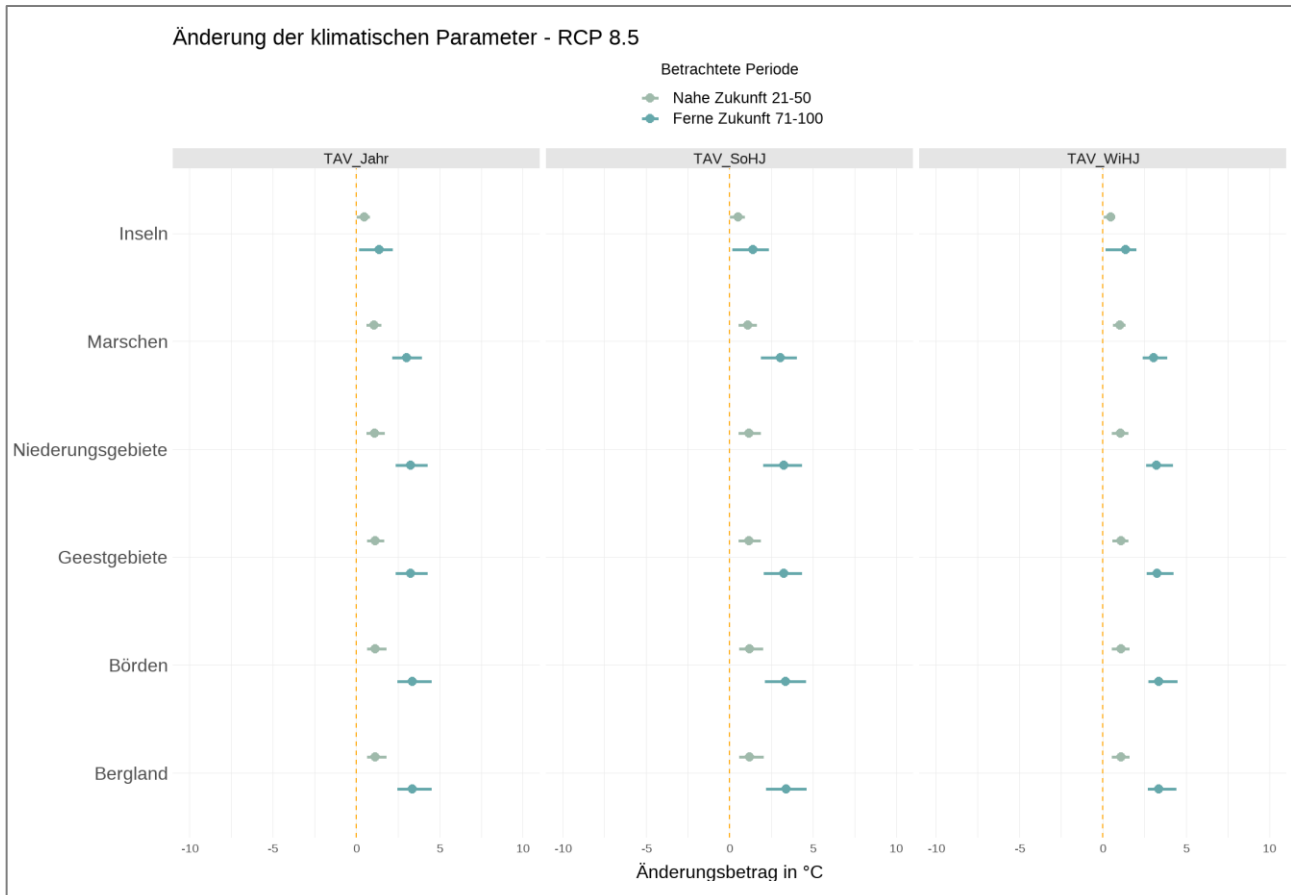


Abbildung 6.2: Bandbreiten der Änderungssignale nach Regionen. Änderung der Tagesmitteltemperatur gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 (in °C) für das hydrologische Kalenderjahr und Sommer- und Winterhalbjahr.

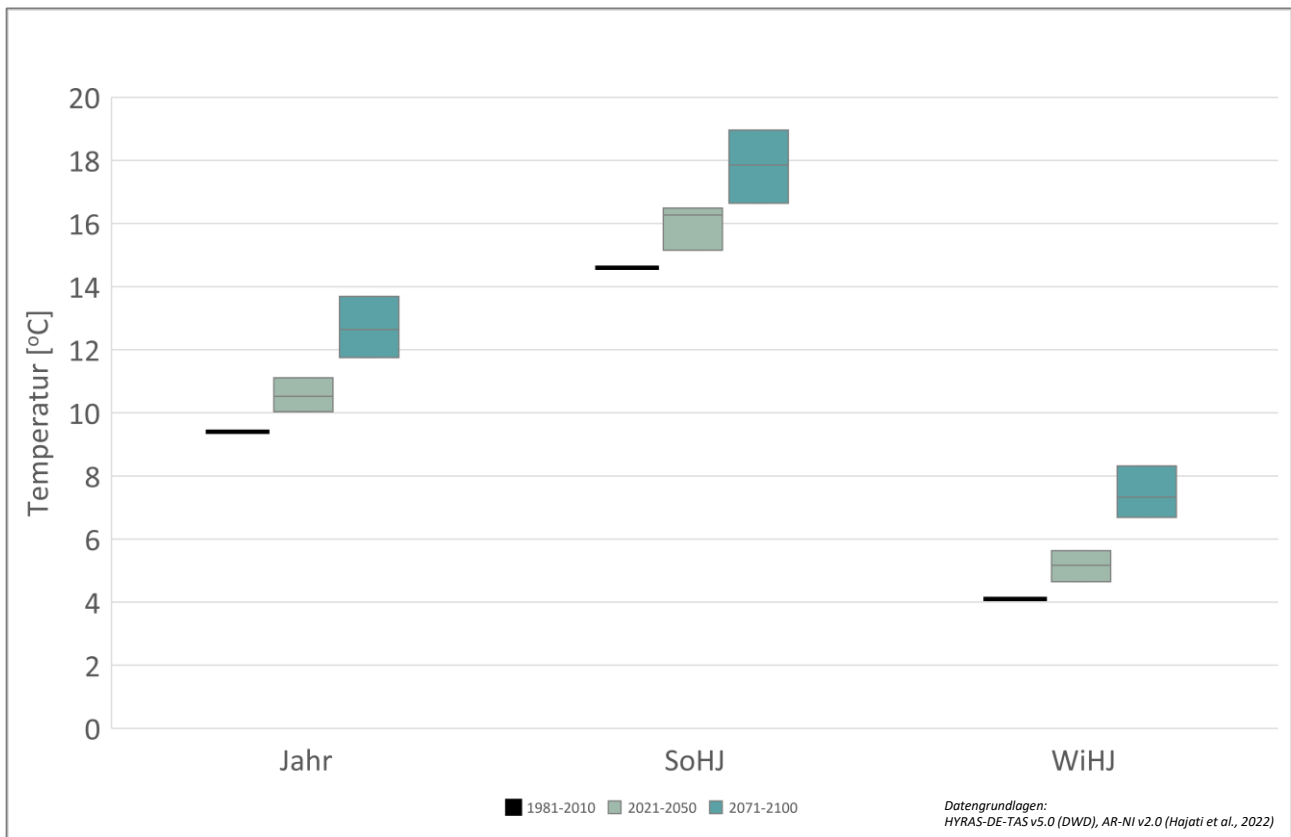


Abbildung 6.3: Bandbreiten der Tagesmitteltemperatur für Niedersachsen. Absolute Werte für das hydrologische Kalenderjahr sowie das Sommer- und Winterhalbjahr.



Die Ergebnisse der Klimaprojektionen für die Niederschlagssumme zeigen eine geringe Erhöhung der mittleren Jahresniederschlagsmenge im Laufe des 21. Jahrhunderts (Abbildung 6.4 und Abbildung 6.6). In der Referenzperiode liegt die Gesamtniederschlagsmenge bei etwa 784 mm und steigt in der fernen Zukunft auf 810 mm. In der fernen Zukunft kommt es insbesondere in den Wintermonaten zu einer Zunahme. Bei Betrachtung der absoluten Gesamtmenge ist eine projizierte Niederschlagssumme von 413 mm gegenüber der Referenzperiode mit 370 mm Niederschlag im Winter möglich. Im Norden und Westen Niedersachsens sind die zunehmenden Änderungen deutlicher als in den restlichen Landesteilen (Größenordnung 50 bis 100 mm). Im Sommerhalbjahr gibt es kaum Veränderungen zum Referenzzeitraum (Referenz: 414 mm über die nahe/ ferne Zukunft: 403 mm). Eine Ausnahme bilden das Bergland und die Harzregion mit geringfügigen Abnahmen.

Bei der regionalen Betrachtung in Abbildung 6.2 fällt die Bandbreite für die Inseln wesentlich größer aus als bei den anderen fünf Regionen. Dieser Aspekt ist jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, da einige Klimamodelle in dieser Region unvollständige Rasterdaten aufweisen. In dieser Darstellungsform ist zu erkennen, dass im Jahr für die Inseln die mittlere Änderung von der nahen Zukunft (-28 mm) hin zur fernen Zukunft (-5 mm) die Niederschlagsmengen zunehmen, aber im Vergleich zum Referenzzeitraum abnehmen. Während die anderen Regionen eine mittlere Zunahme von der nahen Zukunft (3 bis 10 mm) hin zur fernen Zukunft (23 bis 49 mm) erfahren werden. Im Winterhalbjahr sind die Zunahmen innerhalb der Regionen von der nahen zur fernen Zukunft ähnlich. Im Sommerhalbjahr dagegen sind für den Küstenbereich (Z2: -16mm / Z3: -14mm) und das Bergland (Z2: -8mm / Z3: -14mm) Abnahmen zu erkennen im Vergleich zum Referenzzeitraum. In den Marschen, Niederungen, Geest und Börden liegen die modellierten Änderungen in der nahen Zukunft im Mittel zwischen 1 bis 3 mm und in der fernen Zukunft zwischen 0 bis 7 mm.

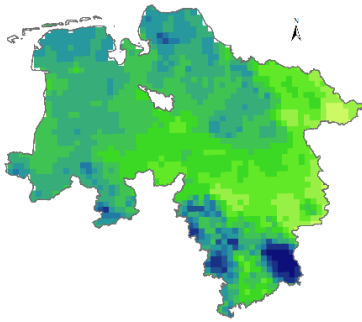
# Niederschlagssumme (Psum)

Jahr (Nov – Okt)

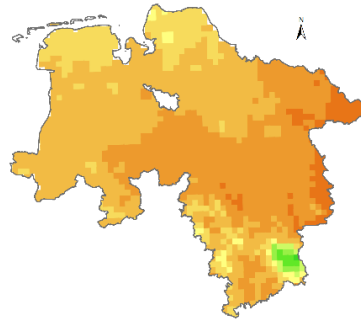
SoHJ (Mai – Okt)

WiHJ (Nov – Apr)

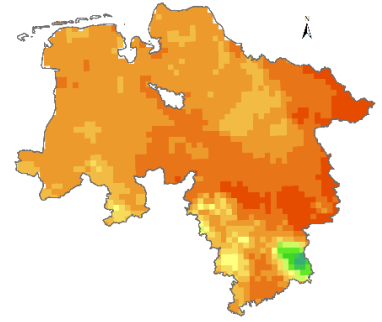
1981-2010



Gebietsmittel: 780 mm

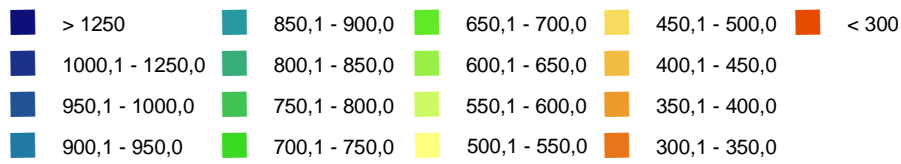


Gebietsmittel: 411 mm

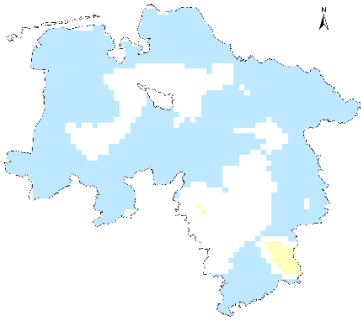


Gebietsmittel: 367 mm

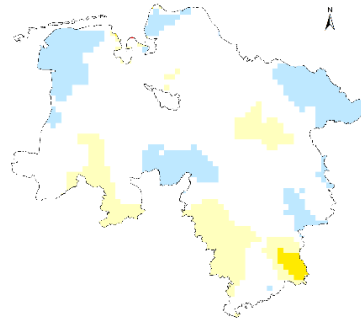
[mm]



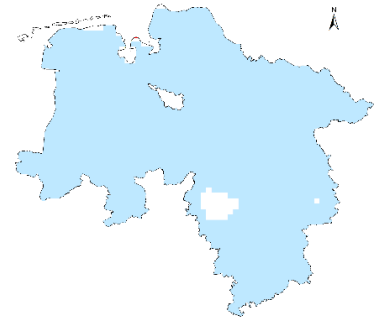
Änderung  
nahe Zukunft  
2021-2050



Mittlere Änderung: +6 mm

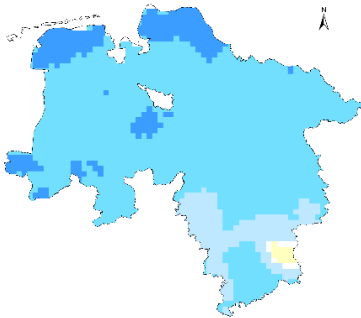


Mittlere Änderung: -1 mm

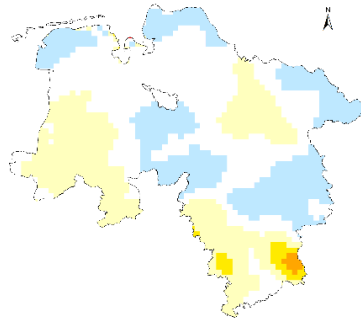


Mittlere Änderung: +9 mm

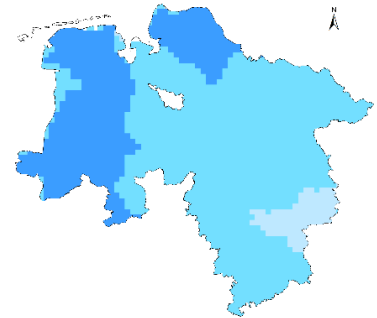
Änderung  
ferne Zukunft  
2071-2100



Mittlere Änderung: +38 mm

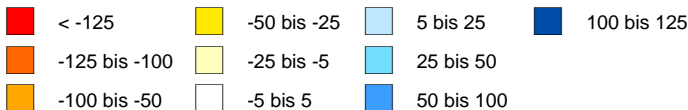


Mittlere Änderung: -3 mm



Mittlere Änderung: +42 mm

Änderung [mm]



Datengrundlagen:  
HYRAS-DE-PRE v3.0 (DWD)  
AR-NI v2.0 (Hajati et al., 2022)

Abbildung 6.4: Die Niederschlagssumme für die Referenzperiode 1981 bis 2010 für das hydrologische Jahr (November bis Oktober) sowie das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) und das Winterhalbjahr (November bis April). Mittlere projizierte Veränderung der Niederschlagssumme in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5 gegenüber dem Referenzzeitraum für die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2071 bis 2100) Zukunft.

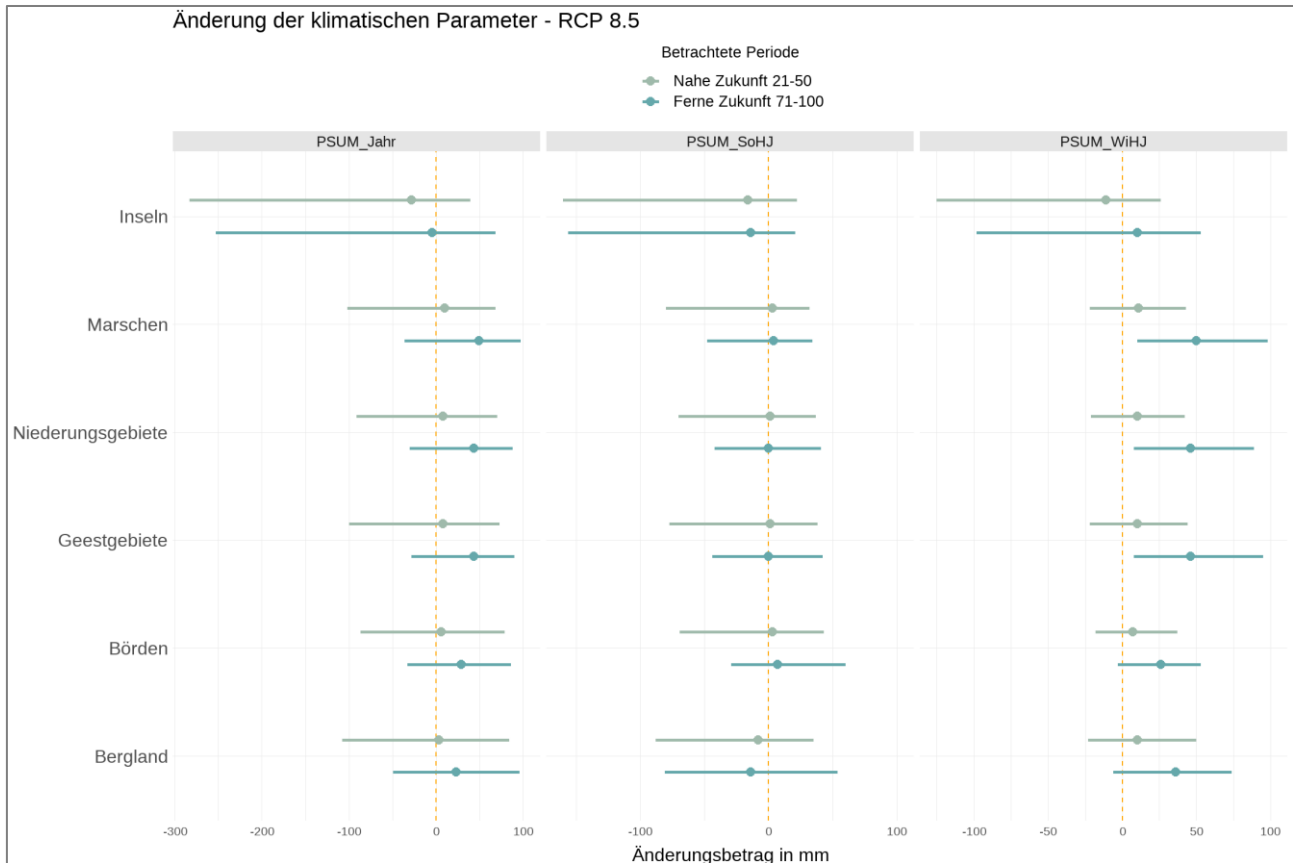


Abbildung 6.5: Bandbreiten der Änderungssignale nach Regionen. Änderung der Niederschlagssumme gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 (in mm) für das hydrologische Kalenderjahr und Sommer- und Winterhalbjahr.

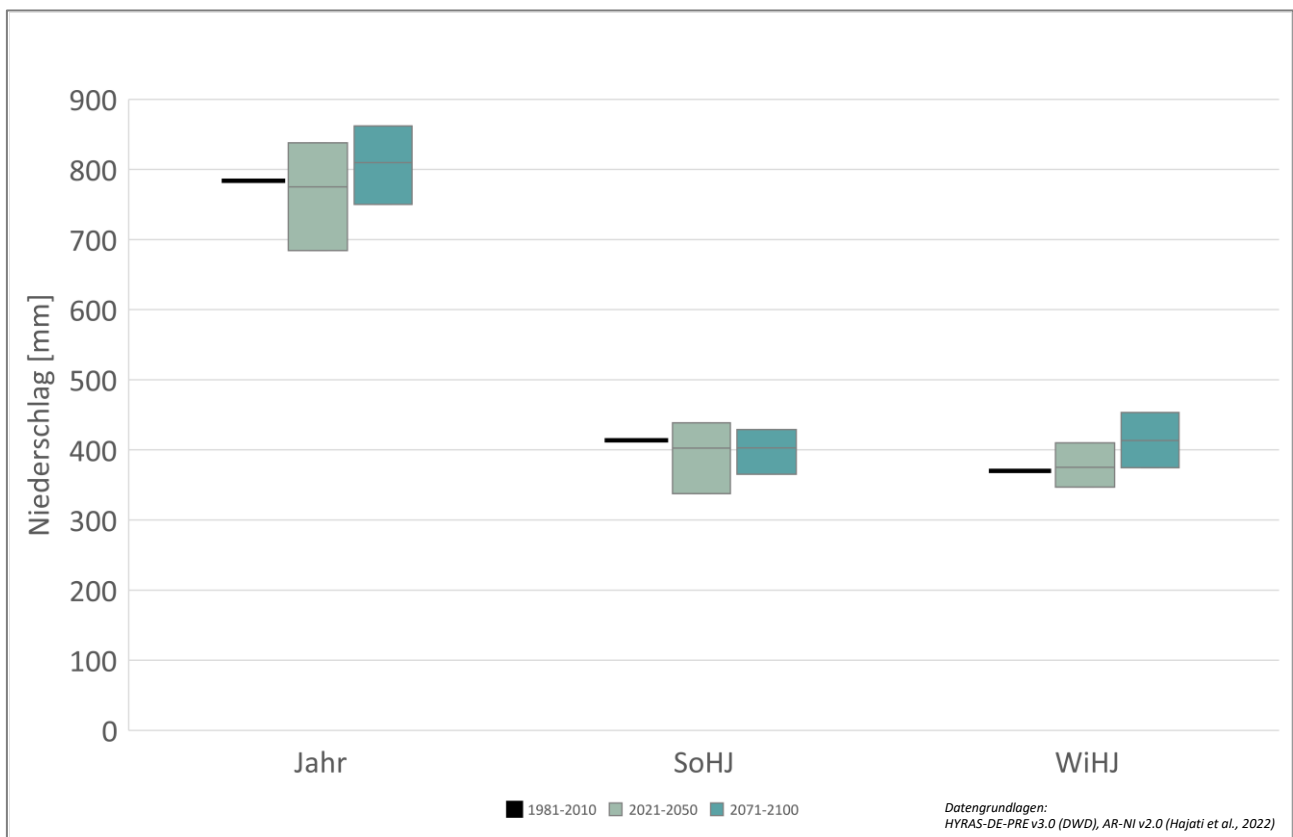


Abbildung 6.6: Bandbreiten der Niederschlagssummen für Niedersachsen. Absolute Werte für das hydrologische Kalenderjahr sowie das Sommer- und Winterhalbjahr.

Die mittlere jährliche Verdunstung (FAO-Gras-Referenzverdunstung) liegt in Niedersachsen bei 576 mm/Jahr in dem Zeitraum 1981 bis 2010 (Abbildung 6.7). Auf Grund der Kontinentalität nimmt die Verdunstung von Nordwesten nach Südosten zu. Im Sommerhalbjahr (443 mm/Jahr) ist die Verdunstung höher als im Winterhalbjahr (133 mm/Jahr).

Die Klimaprojektionen zeigen für die nahe und ferne Zukunft eine landesweite Zunahme der Verdunstung. Da die Verdunstung u.a. an die Temperaturverhältnisse gekoppelt ist, sind die Zunahmen im Winterhalbjahr geringer als im Sommerhalbjahr.

Ein Blick auf das Balkendiagramm (Abbildung 6.9) zeigt, dass die Bandbreiten für das Jahr und das Sommerhalbjahr wesentlich größer sind als im Winterhalbjahr. Im Winterhalbjahr liegt die Verdunstung in der nahen Zukunft innerhalb einer Bandbreite von ca. +1 bis +15 mm/a. In der fernen Zukunft erfolgt eine Zunahme zwischen ca. +12 und +50 mm/a. Im Sommerhalbjahr ist die Spannweite in der nahen Zukunft (zwischen -6 bis +75 mm/a) breiter, aber innerhalb der Regionen verhält sie sich ähnlich. In der fernen Zukunft liegen die Zunahmen etwa zwischen +10 bis +138 mm/a. Die Bandbreite wird von Süden (Bergland) zu Norden (Inseln) schrittweise kleiner. Dieses Muster zeigt die Abbildung ebenfalls für die Bandbreitendarstellung für das Jahr. Von der nahen zur fernen Zukunft nehmen die Änderungen der Verdunstung zu. In der nahen Zukunft liegt die Bandbreite zwischen -4 bis +90 mm/a. In der fernen Zukunft zeigt die Bandbreite Werte zwischen +32 bis 186 mm/a an.

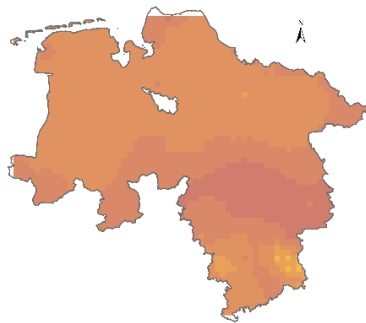
# Verdunstung (ETP)

Jahr (Nov – Okt)

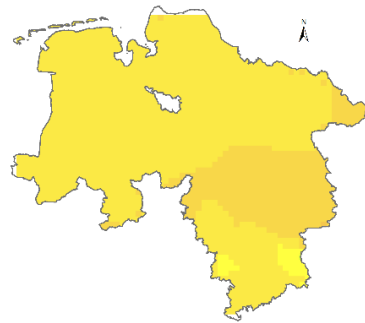
SoHJ (Mai – Okt)

WiHJ (Nov – Apr)

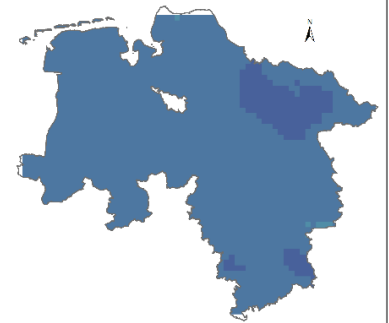
1981-2010



Gebietsmittel: 576 mm

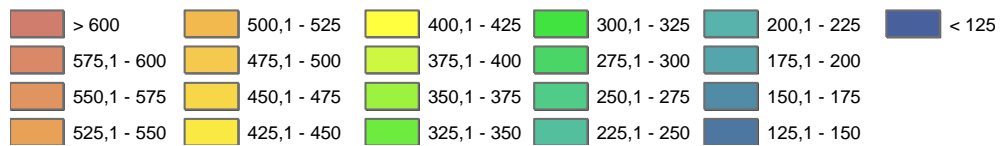


Gebietsmittel: 443 mm

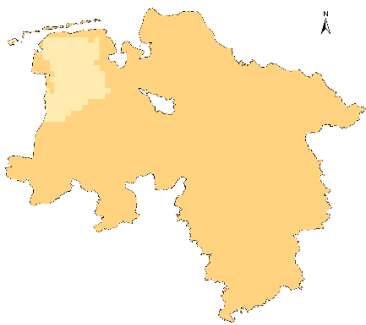


Gebietsmittel: 133 mm

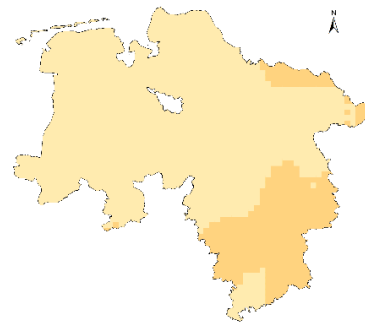
[mm]



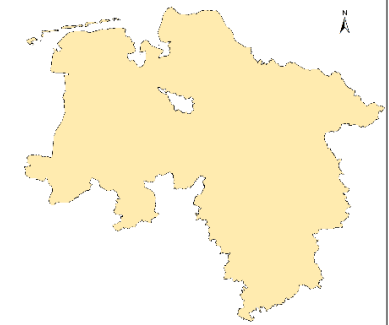
Änderung  
nahe Zukunft  
2021-2050



Mittlere Änderung: +29 mm

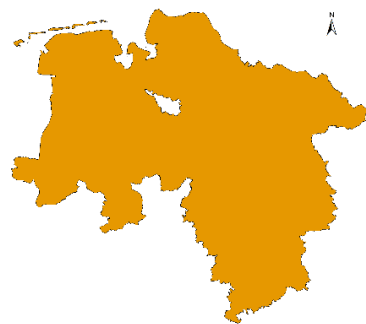


Mittlere Änderung: +23 mm

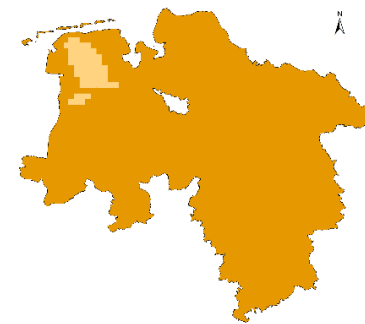


Mittlere Änderung: +7 mm

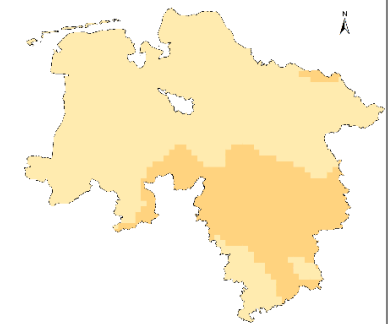
Änderung  
ferne Zukunft  
2071-2100



Mittlere Änderung: +81 mm

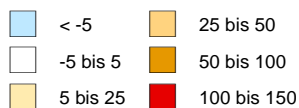


Mittlere Änderung: +57 mm



Mittlere Änderung: +24 mm

Änderung [mm]



Datengrundlagen:  
IWW (Haberlandt et al., 2015)  
AR-NI v2.0 (Hajati et al., 2022)

Abbildung 6.7: Die Verdunstung für die Referenzperiode 1981 bis 2010 für das hydrologische Jahr (November bis Oktober) sowie das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) und das Winterhalbjahr (November bis April). Mittlere projizierte Veränderung der Verdunstung in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5 gegenüber dem Referenzzeitraum für die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2071 bis 2100) Zukunft.

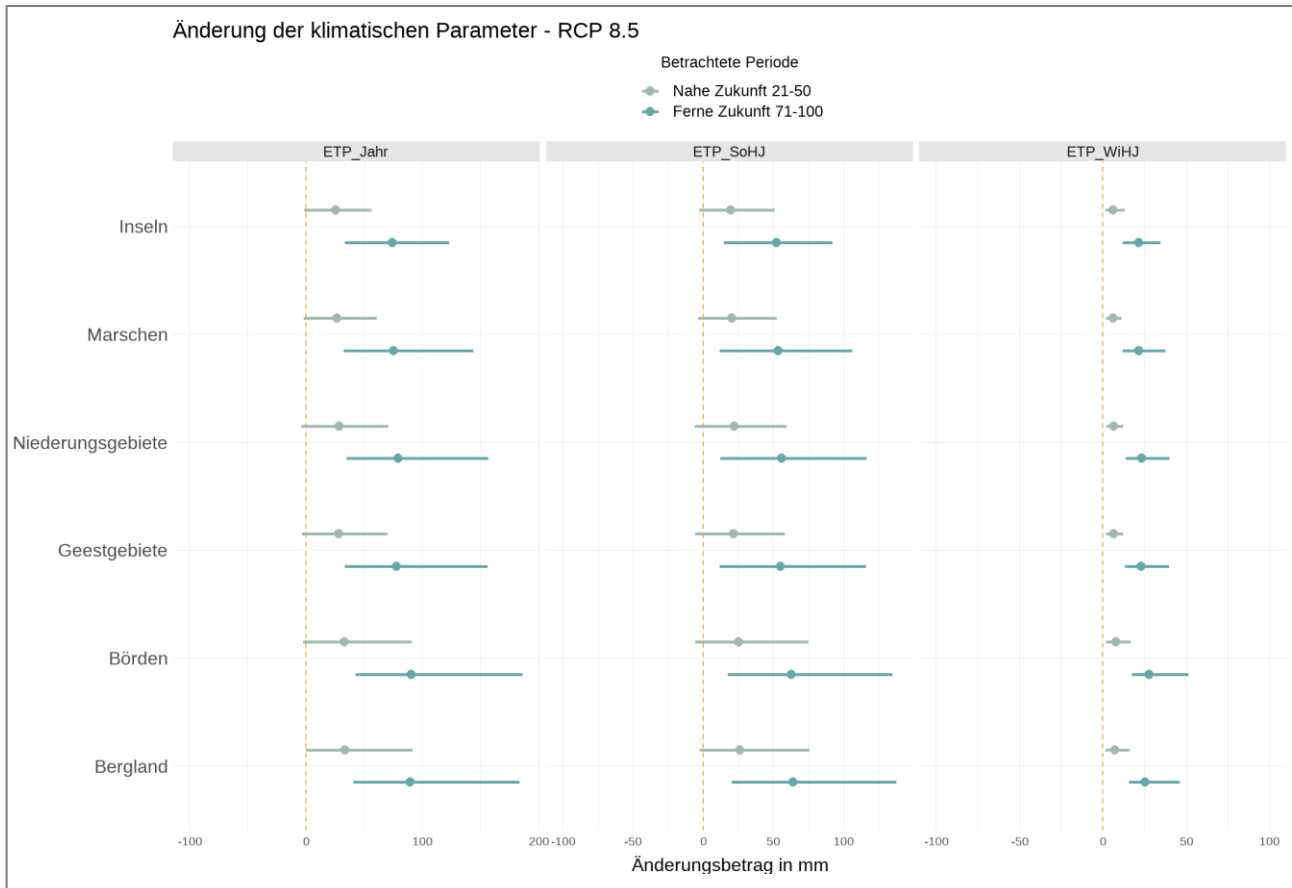


Abbildung 6.8: Bandbreiten der Änderungssignale nach Regionen. Änderung der Verdunstung gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 (in mm) für das hydrologische Kalenderjahr und Sommer- und Winterhalbjahr.

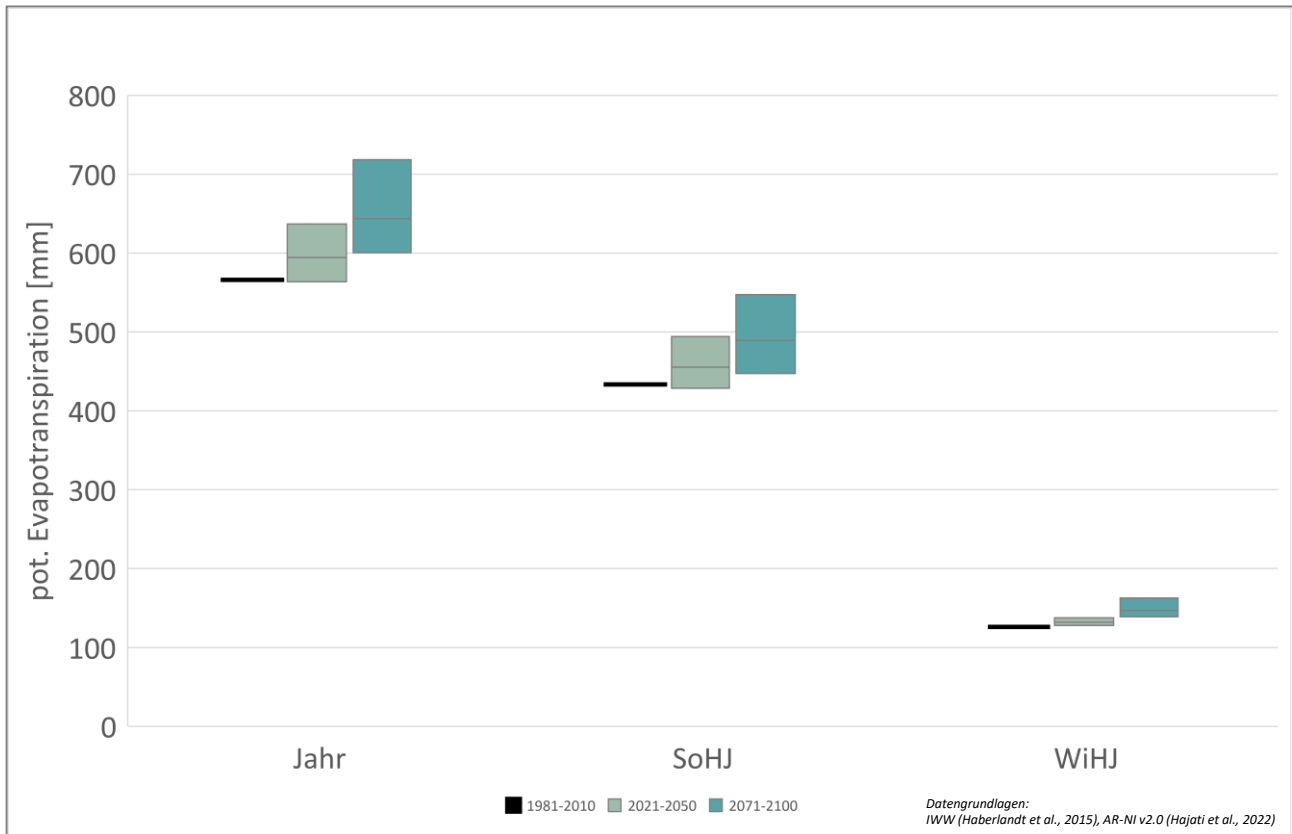


Abbildung 6.9: Bandbreiten der Verdunstung für Niedersachsen. Absolute Werte für das hydrologische Kalenderjahr sowie das Sommer- und Winterhalbjahr.

In Niedersachsen nimmt die klimatische Wasserbilanz in der nahen Zukunft in Richtung der Kontinentalität von Norden nach Südosten ab. Im Jahr liegt die mittlere Änderung bei einer Abnahme von -22 mm bei einem Jahresmittel im Referenzzeitraum von 202 mm/Jahr. Das Sommerhalbjahr weist in der nahen Zukunft ein Wasserbilanzdefizit von -25 mm/a auf. In der fernen Zukunft verschärft sich das Defizit (-61 mm/a). Im Winterhalbjahr nimmt die Wasserbilanz von der nahen (+3 mm/a) zur fernen (+19 mm/a) leicht zu (Abbildung 6.10).

Bei der näheren Betrachtung für die einzelnen Regionen und der Bandbreite der Klimaprojektionen ist insbesondere für die Jahresbetrachtung eine große Bandbreite möglich (Abbildung 6.11). Die Spannweiten in der nahen Zukunft liegen zwischen -163 mm/a und +63 mm/a im Bergland. Die Spannweiten der anderen Regionen liegen zwischen etwa -150 mm/a und +50 mm/a. In der fernen Zukunft nimmt die klimatische Wasserbilanz im Mittel in jeder Region im Vergleich zur nahen Zukunft zu. Die Spannweiten sind hier ebenfalls sehr breit aufgestellt. Im Sommerhalbjahr liegen die Bandbreiten in der nahen Zukunft für alle Regionen zwischen etwa +25 mm/a bis -130 mm/a. In der fernen Zukunft nehmen alle mittleren Änderungen der jeweiligen Regionen zu. Im Bereich der Küste, Marschen, Niederungs- und Geestgebiete liegt die Spannweite zwischen im Maximum +8 mm/a und im Minimum bei ca. -140 mm/a. In den Börden und dem Bergland zeigt sich eine Spannweite zwischen etwa 20 mm/a und 180 mm/a. Im Winterhalbjahr ist die Bandbreite für die Klimaprojektionen nicht so groß. In den Börden ist von der nahen in die ferne Zukunft eine mittlere Abnahme der Wasserbilanz projiziert (von -0,5 mm/a bis -2 mm/a). Alle anderen Regionen weisen eine mittlere Zunahme der Wasserbilanz auf.

# Klimatische Wasserbilanz (KWB)

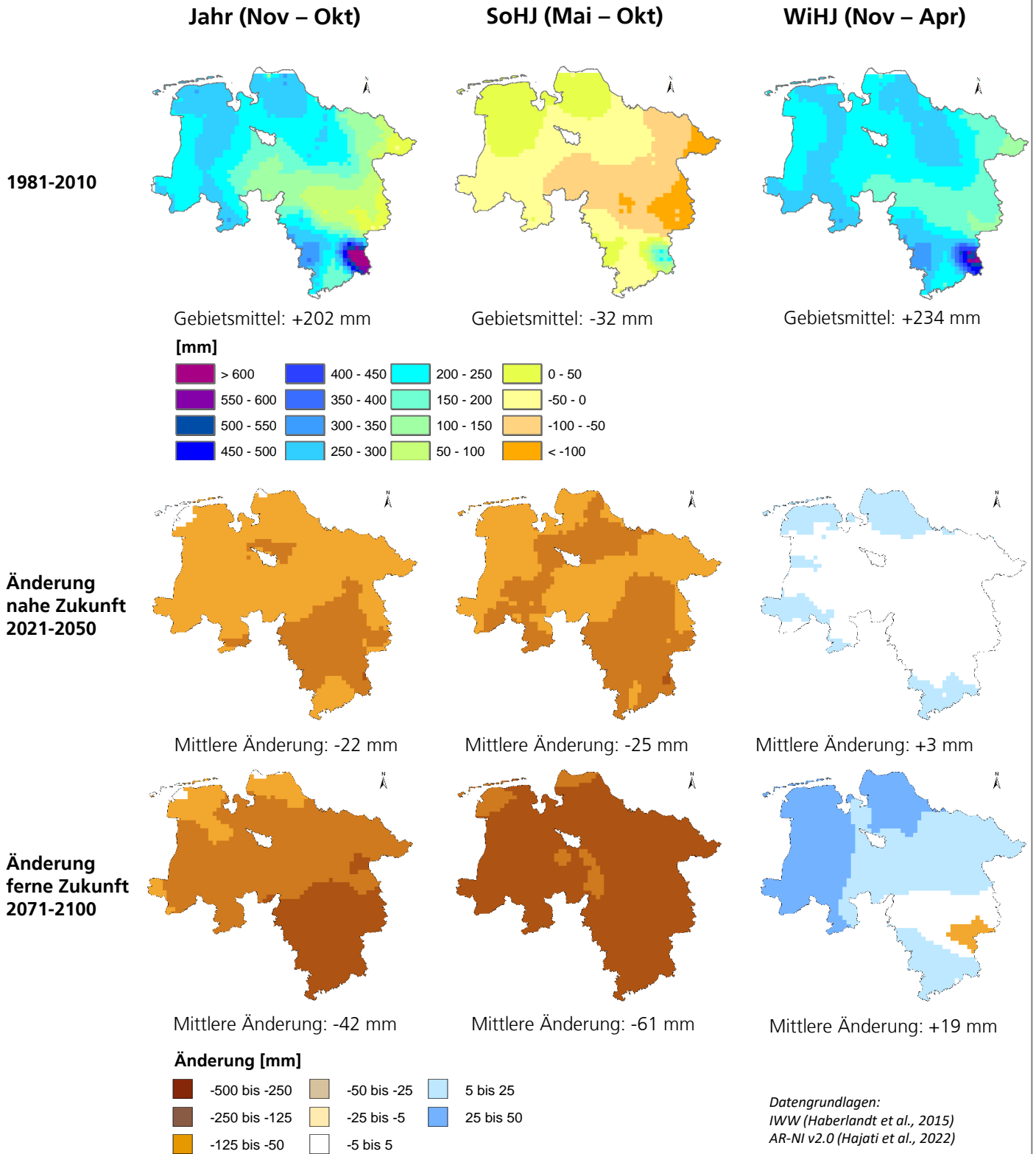


Abbildung 6.10: Die klimatische Wasserbilanz für die Referenzperiode 1981 bis 2010 für das hydrologische Jahr (November bis Oktober) sowie das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) und das Winterhalbjahr (November bis April). Mittlere projizierte Veränderung der klimatischen Wasserbilanz in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5 gegenüber dem Referenzzeitraum für die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2071 bis 2100) Zukunft.



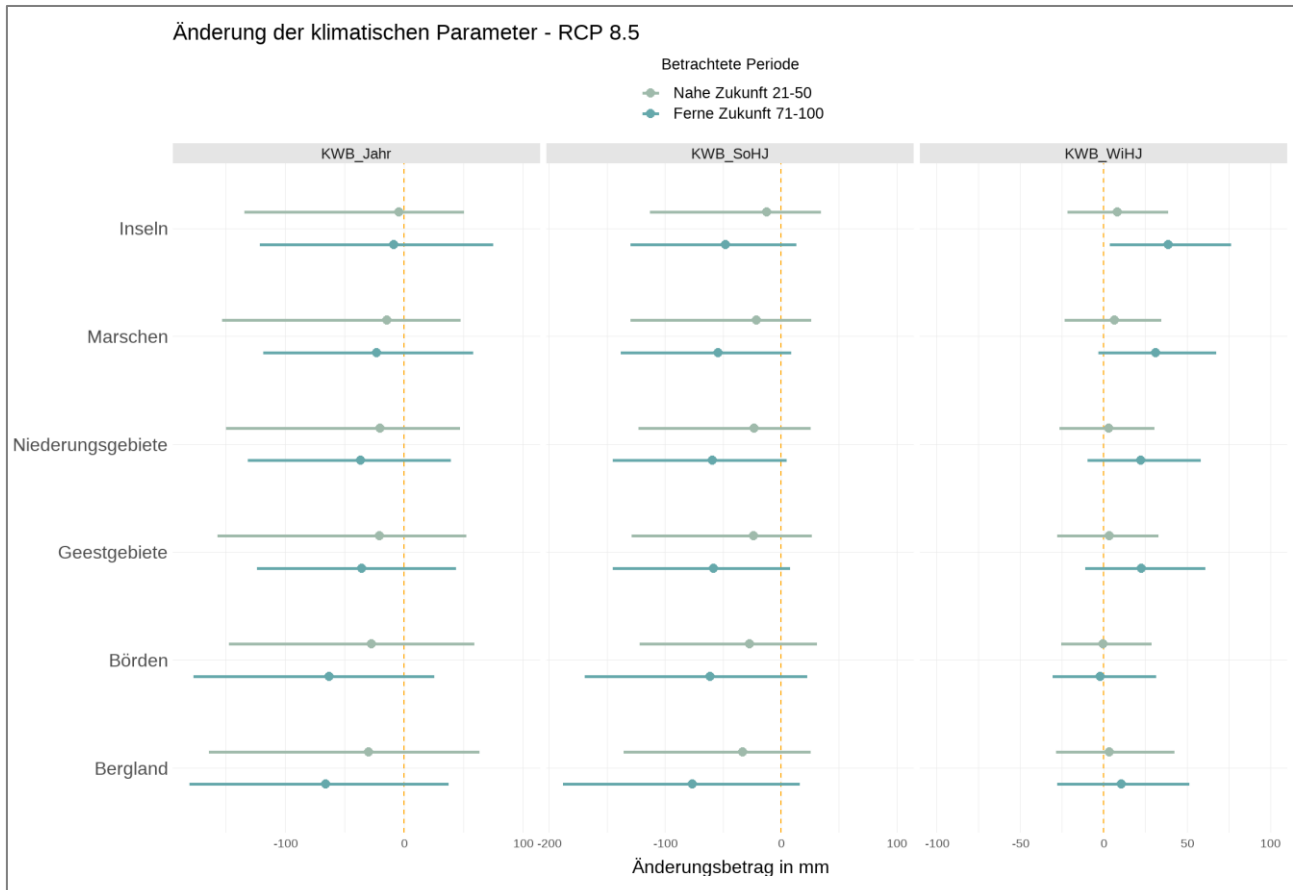


Abbildung 6.11: Bandbreiten der Änderungssignale nach Regionen. Änderung der klimatischen Wasserbilanz gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 (in mm) für das hydrologische Kalenderjahr und Sommer- und Winterhalbjahr.

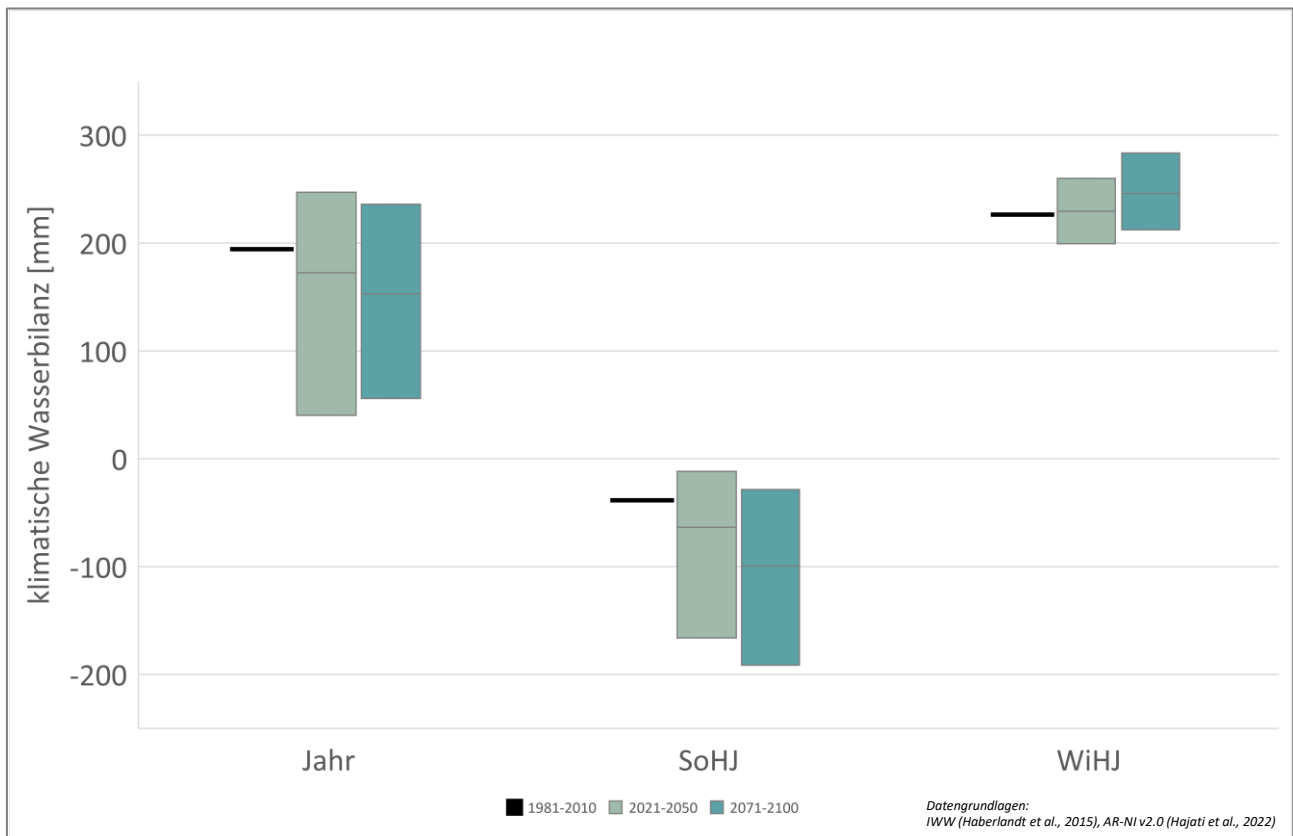


Abbildung 6.12: Bandbreiten der Klimatischen Wasserbilanz für Niedersachsen. Absolute Werte für das hydrologische Kalenderjahr sowie das Sommer- und Winterhalbjahr.

In Abbildung 6.13 sind die Ergebnisse der Klimaprojektionen für die thermische Vegetationsperiode für den Beginn, die Dauer und das Ende aufgeführt. Die Entwicklungsphasen von Pflanzen sind eng an vorherrschende Umwelt- und Klimabedingungen geknüpft. Der Beginn der Periode liegt im Gebietsmittel für den Referenzzeitraum bei Tag 81. In der Zukunft wird ein früheres Einsetzen der Vegetationsphase erwartet. In der nahen Zukunft beträgt die mittlere Änderung -10 Tage und in der fernen Zukunft -25 Tage.

Bei der regionalen Betrachtung (Abbildung 6.14) setzt der Beginn in der nahen Zukunft im Landesinneren (zwischen etwa -5 bis -11 Tage) früher ein als im Küstenbereich (-0,3 bis -5 Tage). In der fernen Zukunft zeigt sich ein ähnliches Bild für den Vegetationsbeginn in den Regionen Marschen, Niederungs- und Geestgebiete, Börden und Bergland. Hier liegt die mittlere Änderung zwischen -18 und -28 Tagen.

Die Dauer der Vegetationsperiode liegt im Mittel im Referenzzeitraum bei 248 Tagen. In Abbildung 6.10 ist für beide Zukunftszeiträume eine Zunahme zu erkennen (Z2: +14 Tage; Z3: +40 Tage).

Die stärkste Zunahme ist in den Regionen südlich des Küstenbereichs zu sehen (Abbildung 6.11). Während in der nahen Zukunft eine Zunahme zwischen +12 bis +21 Tage projiziert wird, zeigen sich in der fernen Zukunft Werte zwischen +34 bis +53 Tage.

Auch das Ende der Vegetationsperiode verschiebt sich nach hinten im Laufe des Kalenderjahres. Im Referenzzeitraum liegt das mittlere Ende bei Tag 329 (Abbildung 6.13). In der nahen Zukunft verschiebt sich der Zeitpunkt um + 6 Tage und in der fernen Zukunft um + 18 Tage.

In der regionalen Betrachtung (Abbildung 6.14) verschiebt sich das Ende von den Marschen hin zum Bergland zwischen +3 bis 14 Tage in der nahen Zukunft. In der fernen Zukunft zeigt die Bandbreite Werte zwischen +15 bis +30 Tage.

# Thermische Vegetationsperiode (TVP)

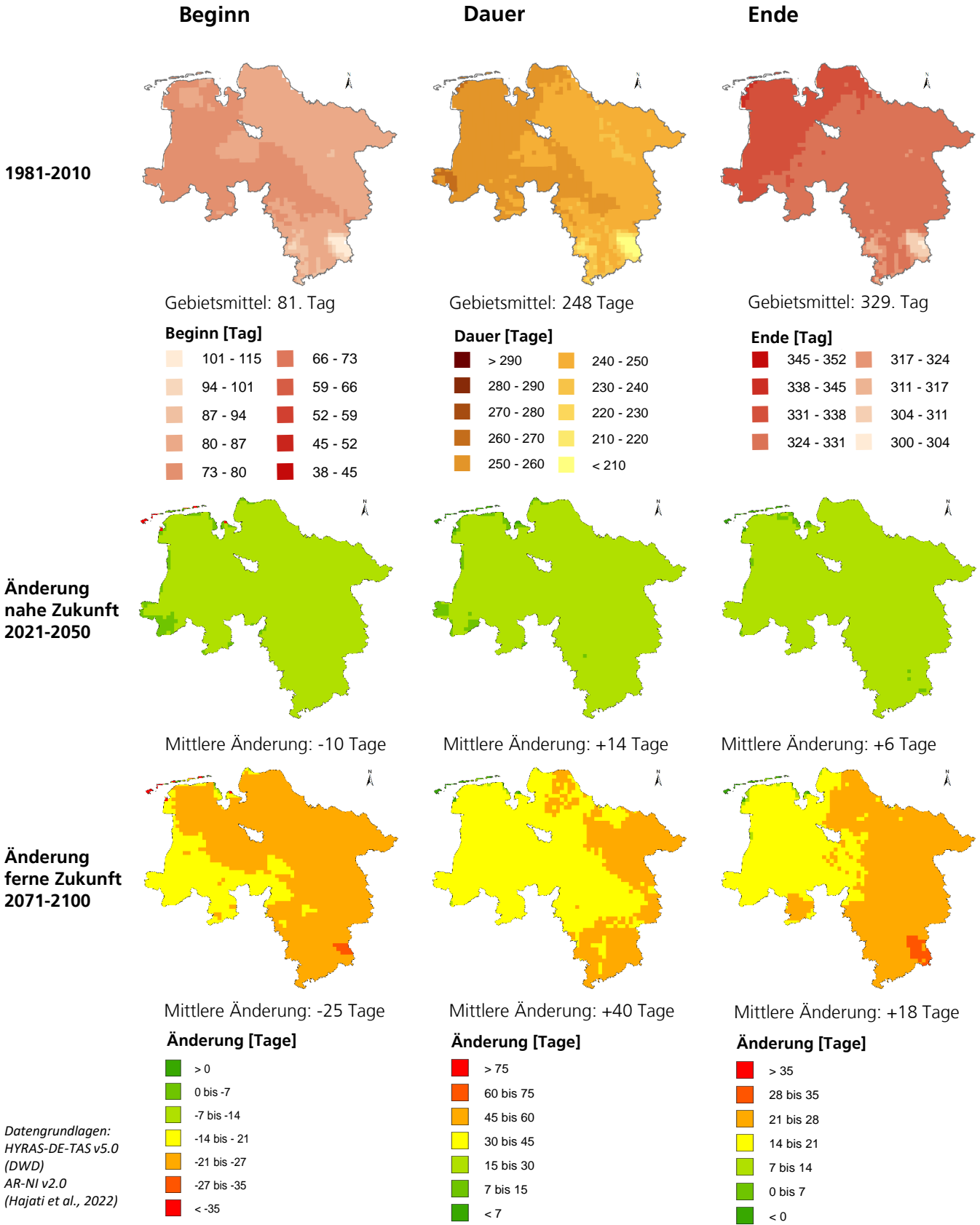


Abbildung 6.13: Die thermische Vegetationsperiode mit mittlerem Beginn, Dauer und Ende für die Referenzperiode 1981 bis 2010 für das Kalenderjahr (Januar bis Dezember) sowie das Sommerhalbjahr (April bis September) und das Winterhalbjahr (Oktober bis März). Mittlere projizierte Veränderung der thermischen Vegetationsperiode (Beginn, Dauer und Ende) in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5 gegenüber dem Referenzzeitraum für die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2071 bis 2100) Zukunft.

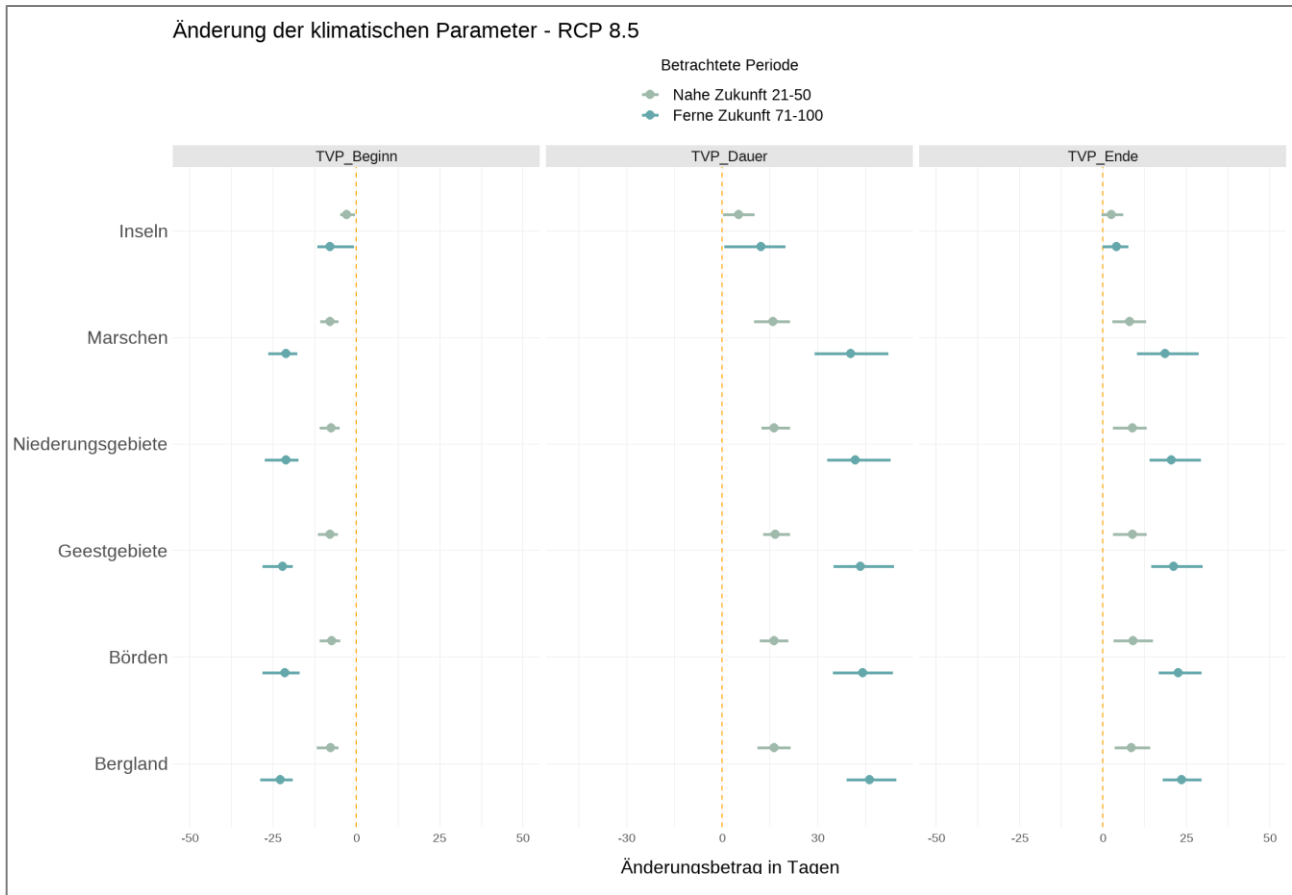


Abbildung 6.14: Bandbreiten der Änderungssignale nach Regionen. Änderung der thermischen Vegetationsperiode gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 (in Tagen) für den Beginn, die Dauer und das Ende.

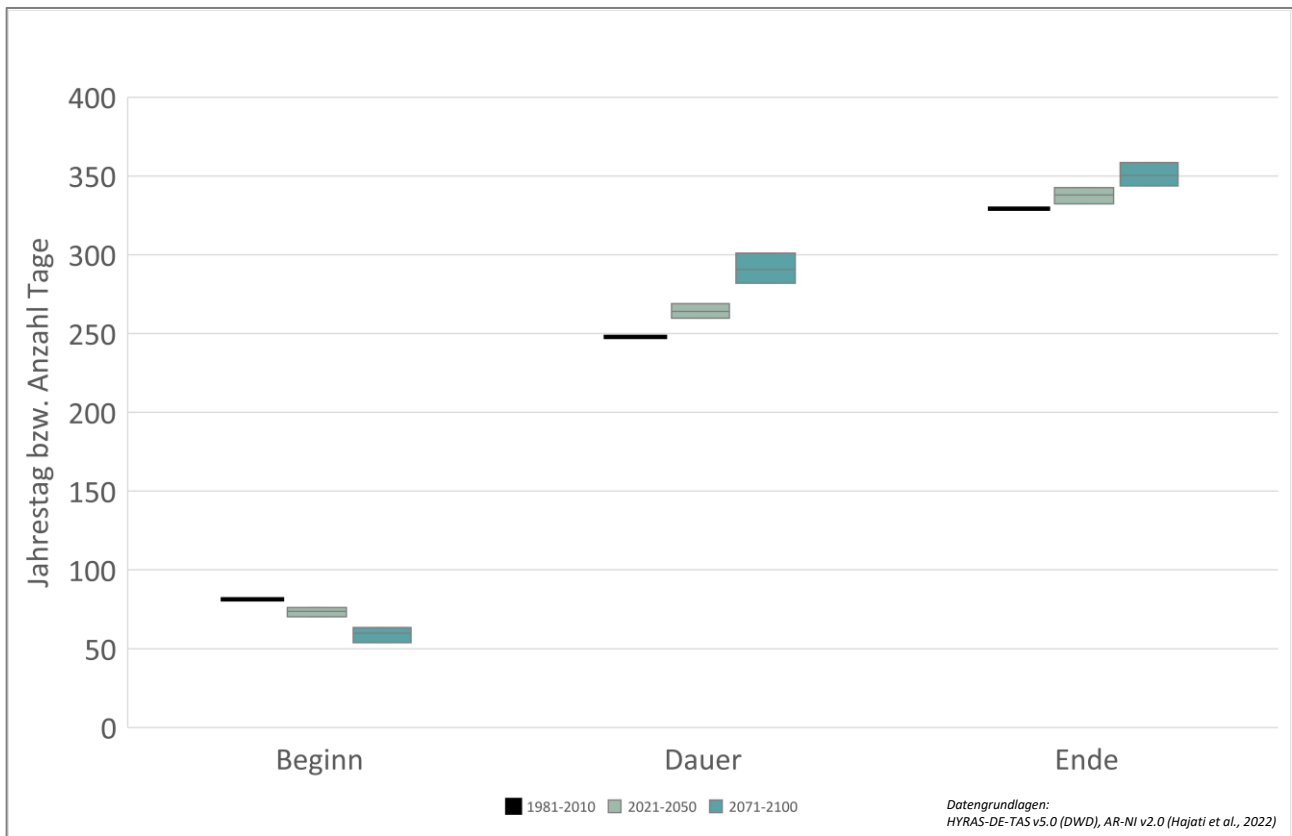


Abbildung 6.15: Bandbreiten der thermischen Vegetationsperiode (Beginn, Dauer, Ende) für Niedersachsen. Absolute Werte für das hydrologische Kalenderjahr sowie das Sommer- und Winterhalbjahr.

## 6.4 Zusammenfassung

Die zukünftigen klimatischen Entwicklungen in Niedersachsen weisen unter der Annahme des Szenarios ohne Klimaschutz (RCP 8.5) trotz leichter Bandbreiten eine deutliche landesweite Zunahme der Temperaturen auf.

Die Niederschlagsmengen zeigen unter dem „Weiter-wie-bisher“-Szenario insgesamt eine Zunahme. Räumliche Schwerpunkte sind im Norden und Westen erkennbar insbesondere in den Wintermonaten. Für die Sommermonate lässt sich keine eindeutige Entwicklung erkennen. In einigen Regionen wird eine leichte Abnahme und in anderen Regionen eine leichte Zunahme projiziert.

Die Klimaprojektionen für die Verdunstung zeigen einheitlich eine Zunahme für die Zukunft. Insbesondere in den Sommermonaten.

Da zum einen die Sommerniederschläge leicht abnehmen, gleichzeitig höhere Temperaturen erwartet werden, die zu einer höheren Verdunstung führen, verringert sich zukünftig die klimatische Wasserbilanz in den Sommermonaten. In den Wintermonaten wird im Mittel eine leichte Zunahme der Wasserbilanz erwartet.

Die Entwicklung der thermischen Vegetationsperiode für die Zukunft zeigt mit der Erwärmung einhergehend einen früheren Eintritt der Vegetationsphase sowie ein späteres Ende und daraus resultierend auch eine längere Dauer.

# 7 Analyse der möglichen Grundwasserstandsverhältnisse der Zukunft

Die Simulation der hydrologischen Verhältnisse wurde anhand vier unterschiedlicher Verfahren durchgeführt. Der Fokus der Modellierung liegt auf der Simulation der Grundwasserstandsentwicklung in Niedersachsen.

## 7.1 Modellierung der Grundwasserstands-dynamik in Teilprojekt A

### 7.1.1 Überblick

Das Teilprojekt A wurde vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) durchgeführt. Grundlage für die Berechnungen des Teilprojektes A ist ein Zeitreihenmodell, dass auf Basis einer vorgegebenen Modellstruktur für die einzelnen Grundwassermessstellen kalibriert wird und für diese Messstellen eine Projektion der Grundwasserstandsentwicklung in die Zukunft durchführt.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die teilprojektspezifischen Besonderheiten der Datenaufbereitung, stellen den verwendeten Modellansatz vor und erläutern die Kalibrierung/Validierung des Modellansatzes. Anschließend erfolgt die Darstellung der finalen Messstellenauswahl auf Basis der Validierungsergebnisse sowie die Präsentation der Berechnungsergebnisse, d.h. der Änderungssignale in der nahen und fernen Zukunft für die betrachteten Indikatoren und Regionen.

### 7.1.2 Besonderheiten der Datenaufbereitung

Der IWW-Datensatz mit den beobachteten und regionalisierten Klimadaten wurde für die Bearbeitung im Teilprojekt A in aggregierter Form für ein 10x10 km-Raster bereitgestellt. Die Zuordnung zu den einzelnen Grundwassermessstellen erfolgte in diesem Fall unmittelbar über die Zelle, in der sich eine Grundwassermessstelle befindet. Die potentielle Verdunstung wurde nach dem Verfahren von Penman-Monteith (Allen, 1995) berechnet.

Auch die Klimaprojektionsdaten lagen als Rasterdatensatz vor. Analog zu den beobachteten Klimadaten wurde zunächst die Verdunstung nach Penman-Monteith (Allen, 1995) berechnet. Eine Übertragung der Klimaprojektionsdaten auf die Grundwassermessstellen erfolgte zunächst durch Identifikation der Rasterzelle, in der eine Grundwassermessstelle liegt. Anschließend wurde eine Umgebung von 3 x 3 Rasterzellen um die

Grundwassermessstelle identifiziert und die Werte über diese 9 Rasterzellen gemittelt.

### 7.1.3 Modellbeschreibung

#### 7.1.3.1 Einleitung

Die Grundwasserstandsdynamik wird im Teilprojekt A über ein Speichermodell abgebildet, das aus den Klimaparametern Niederschlag und Verdunstung eine Zeitreihe der Grundwasserstandsentwicklung („klimatische Ganglinie“) generiert, die über einen Optimierungsalgorithmus an einen standörtlich beobachteten Ganglinienverlauf angepasst werden kann. Analog zur Vorgehensweise bei Anwendung von Filtermodellen wie dem Wiener-Mehrkanalfilters (Bucher 1999, Grossmann & Skowronek 2005) soll es dadurch möglich werden, die Grundwasserstandsdynamik hinsichtlich Übereinstimmung mit und Abweichungen von der natürlichen, witterungsbedingten Dynamik zu beurteilen.

Vorhergehende Studien von Wriedt (2017) konnten zeigen, dass sich die Grundwasserdynamik an unbeeinflussten Messstellen mit guter Näherung direkt über die klimatische Wasserbilanz darstellen lässt. Dieser Ansatz basierte auf der Transformation der klimatischen Wasserbilanz durch einen Tiefpassfilter und eine zeitliche Verschiebung in eine theoretische Grundwasserganglinie. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist das Fehlen eines Speichermoduls, mit dem das (autokorrelierte) Verhalten des Grundwasserspeichers prozessorientiert abgebildet werden kann. Der in Wriedt (2017) konzipierte Ansatz der „klimatischen Ganglinie“ wird daher durch den vorliegenden Modellansatz erweitert.

Der Modellansatz besteht aus drei Modellkomponenten (Abbildung 7.1), welche in einfacher Form die Grundwasserneubildung, den Transport durch die ungesättigte Zone und das Speicherverhalten des Grundwasserleiters abbilden.

#### 7.1.3.2 Grundwasserneubildung

Die erste Modellkomponente ist ein Bodenwasserhaushaltsmodul, das aus den Eingangsdaten Niederschlag und Verdunstung eine Zeitreihe der Sickerwasserbildung bzw. der potentiellen Grundwasserneubildung generiert. Hier sind verschiedene Varianten unterschiedlicher Komplexität möglich:

- Im einfachsten Fall (Variante 1) wird der Wasserüberschuss aus der klimatischen Wasserbilanz (=positive Werte) direkt als Sickerwasser übernommen:

$$DRN(t) = \begin{cases} KWB(t) & KWB(t) > 0 \\ 0 & KWB(t) < 0 \end{cases}$$

- mit  $DRN(t)$  = Wasserüberschuss im Zeitschritt  $t$ ,  $KWB(t)$  = Klimatische Wasserbilanz im Zeitschritt  $t$

In einer modifizierten zweiten Variante wird auch der negative Anteil der klimatischen Wasserbilanz weitergegeben. Der Verdunstungsüberschuss kann über den Reduktionsfaktor  $f_c$  anteilig reduziert werden. Der Faktor  $f_c$  wird im Zuge der Modelloptimierung ermittelt. Dadurch kann näherungsweise die Grundwasserzehrung eines Grundwasserleiters infolge der Verdunstung von Grundwasser bei geringen Flurabständen abgebildet werden:

$$DRN(t) = \begin{cases} KWB(t) & KWB(t) > 0 \\ f_c \cdot KWB(t) & KWB(t) < 0 \end{cases}$$

- Eine dritte Variante implementiert ein einfaches Bodenwasserhaushaltsmodell nach Jackson (2012). Diese Variante konnte im Rahmen der KLBIW7-Studie nicht mehr erprobt und eingesetzt werden, daher wird auf eine detaillierte Darstellung verzichtet.

### 7.1.3.3 Ungesättigte Zone

In einer zweiten Modellkomponente bildet eine Transferfunktion den Zeitverzug und eine Glättung des Grundwasserneubildungssignals während der Passage durch die ungesättigte Zone bzw. die Deckschichten (d.h. von der Bodenuntergrenze bis zur Grundwasseroberfläche) ab. Als Transferfunktion wird die Weibull-Dichteverteilungsfunktion zugrunde gelegt (Jackson, 2012). Dabei wird die Neubildung eines Monats auf eine vorgegebene Anzahl von Monaten (Modellparameter  $n$ ) verteilt. Die Verteilung der Grundwasserneubildung über die  $n$  Monate wird mit Hilfe einer 2-Parameter Weibull-Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bestimmt:

$$f(x, \lambda, \kappa) = \begin{cases} \frac{\kappa}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\kappa-1} e^{-(x/\lambda)^\kappa} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

Dabei ist  $\kappa > 0$  ein Formparameter und  $\lambda > 0$  ein Skalierungsparameter der Verteilung. Die resultierende Verteilung wird so skaliert, dass die Fläche unter der Kurve 1 entspricht. Die Neubildung aus dem aktuellen Zeitschritt wird dann entsprechend dieser Verteilung über die  $n$  folgenden Monate verteilt. Die Weibull-Funktion kann exponentiell ansteigende wie absteigende sowie rechts- und links-schiefe Verteilungen abbilden (Jackson, 2012).

### 7.1.3.4 Grundwasser

In der dritten Modellkomponente wird das so ermittelte Neubildungssignal einem Speichermodell zur Abbildung der Grundwasserstandsdynamik übergeben. Das Modell basiert auf dem Ansatz von Bidwell (2002, 2005) und implementiert mathematisch gesehen eine Speicherstruktur aus einem Eingangsspeicher ( $S_v$ ) und zwei nachgeordneten, parallel

geschalteten ( $S_1$  und  $S_2$ ) Durchlaufspeichern. Den Speichern kann jeweils eine charakteristische Verweilzeit zugeordnet werden.

Die Grundwasserstandsdynamik wird durch folgende Modellgleichung beschrieben:

$$U^*(t) = b_1 \cdot R(t) + b_2 \cdot R(t-1) + a_1 \cdot U^*(t-1) + a_2 \cdot U^*(t-2) + a_3 \cdot U^*(t-3)$$

mit  $U^*(t)$  = zentrierter Grundwasserstand im Zeitschritt ( $t$ ),  $R(t)$  = „Grundwasserneubildung“ im Zeitschritt  $t$ , sowie  $a_1, a_2, a_3$  und  $b_1, b_2$  = Koeffizienten.

Weiter ergibt sich der Grundwasserstand an der Messstelle durch eine entsprechende Verschiebung auf das Messstellenniveau:

$$U(t) = D_{xy} + U^*(t)$$

mit  $U(t)$  = Grundwasserstand im Zeitschritt  $t$  und  $D_{xy}$  = Verschiebungsparameter.

Die Koeffizienten der Modellgleichung sind nicht beliebig wählbar. Die Werte werden durch die folgende Gleichungsstruktur nach dem Ansatz von Bidwell (2002, 2005) in Relation zueinander festgelegt, wodurch die spezifische Speicherstruktur des Modells festgelegt wird:

$$b_1 = (1 - \alpha_v)(\beta_1 + \beta_2)$$

$$b_2 = (1 - \alpha_v)(-\beta_1 \alpha_2 + \beta_2 \alpha_1)$$

$$a_1 = \alpha_1 + \alpha_2$$

$$a_2 = \alpha_v(\alpha_1 + \alpha_2) - \alpha_1 \alpha_2$$

$$a_3 = -\alpha_1 \alpha_2 \alpha_v$$

mit  $\alpha_v, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  = Modellparameter.

Die Parameter  $D_{xy}, \alpha_v, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  stellen die eigentlichen Modellparameter für die dritte Modellkomponente dar, die im Zuge der Modellkalibrierung bestimmt werden.

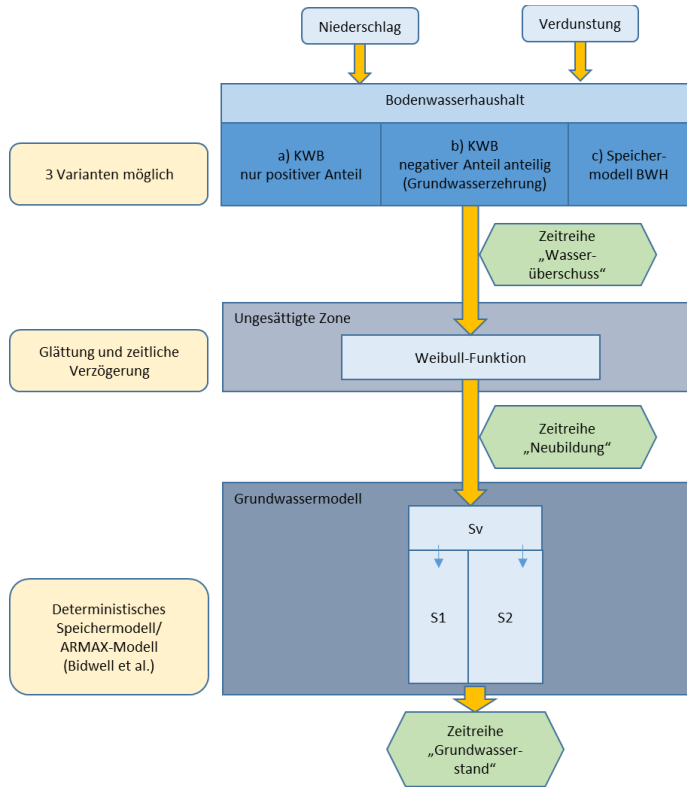


Abbildung 7.1: Modellansatz zur Simulation der Grundwasserneubildung in Teilprojekt A. Modellkonzept.

## 7.1.4 Kalibrierung und Validierung des Modellansatzes

### 7.1.4.1 Vorgehensweise

Die Kalibrierung und Validierung des Modellansatzes erfolgte über einen Split-Sample-Test. Dabei wird der im Modell simulierte Zeitraum in zwei separate Abschnitte untergliedert, einen Kalibrierungszeitraum und einen Validierungszeitraum. Die Modellparameter werden durch den Optimierungsalgorithmus für den Kalibrierungszeitraum bestimmt (d.h. durch Erreichen der bestmöglichen

Übereinstimmung im Kalibrierungszeitraum). Die im Kalibrierungszeitraum ermittelte Modellgüte kann dann mit der für den Validierungszeitraum ermittelten Modellgüte (auf Basis der gleichen Modellparameter) verglichen werden. Im Split-Sample-Test wird geprüft, ob das Modell die Grundwasserstandsdynamik im Validierungszeitraum ähnlich gut darstellen kann wie im Kalibrierungszeitraum und damit der optimierte Parametersatz eine allgemeine Beschreibung der Grundwasserstandsdynamik im Modell ermöglicht.

Insgesamt wurden zwei Split-Sample-Tests für unterschiedliche Kalibrierungs- und Validierungszeiträume durchgeführt (Tabelle 7.1). Bei der Festlegung geeigneter Kalibrierungszeiträume waren verschiedene Aspekte zu berücksichtigen:

- Im Vorfeld durchgeführte Varianten mit veränderten Kalibrierungszeiträumen führten zu dem Schluss, dass die Jahre 1994/1995 mit extremen Grundwasserhochständen sowie die davor und danach auftretenden Jahre 1993 und 1996 mit extremen Tiefständen unbedingt in der Kalibrierungsphase berücksichtigt werden müssen, andernfalls war eine sinnvolle Modellkalibrierung nicht möglich.
- In den 70er und 80er Jahren treten in vielen Messstellen zum Teil sehr deutliche anthropogene Einflüsse auf (siehe Kapitel 2.4), so dass diese Zeiträume nur in Einzelfällen für eine Validierung geeignet sind. Dadurch ist die Auswahl geeigneter Kalibrierungs- und Validierungszeiträume von vornherein deutlich eingeschränkt.
- Der Messstellenpool des Landes Niedersachsen wurde vor allem in den 80er und 90er Jahren aufgebaut. Viele Messstellen decken daher nicht den gesamten, auf Basis der Klimadaten möglichen Modellierungszeitraum ab.

Tabelle 7.1: Split-Sample-Tests zur Modellvalidierung

Bezeichner	Kalibrierungszeitraum	Validierungszeitraum	Dauer
KALVALv1	1990 bis 2005	2005 bis 2017	15 Jahre/12 Jahre
PAROPTv1*	1988 bis 2013	1972 bis 1988	25 Jahre/17 Jahre

\* Die IWW-Daten decken den Zeitraum bis 2017 ab, aus technischen Gründen wurden für diese Daten ursprünglich jedoch nur Verdunstungswerte bis 2013 berechnet. Aufgrund des Zeitbedarfs der Modelloptimierung wurde auf eine Wiederholung mit Daten bis 2017 verzichtet.



### 7.1.4.2 Parameteroptimierung

Die Kalibrierung des Modells an die beobachtete Grundwasserdynamik erfolgt unter Nutzung eines Optimierungsverfahrens, das in Form eines automatisierten Algorithmus die Parameterwerte so bestimmt, dass das Modellergebnis für den Kalibrierungszeitraum die geringste Abweichung zu den Beobachtungsdaten aufweist.

Für die Optimierung wurde die R-Programmbibliothek DEOptim eingesetzt (Mullen et al., 2011, Ardia et al. 2011). Die Funktion DEOptim verwendet einen genetischen Algorithmus zur Parameteroptimierung. Die Wertebereiche der Parameter können hier vorgegeben werden. Dieser Algorithmus führte in der Regel zu einer guten Modellanpassung, sofern die möglichen Wertebereiche für die einzelnen Parameter sinnvoll definiert wurden. Im Vergleich mit der alternativ getesteten R-Funktion „optim“ erwies sich die Funktion DEOptim zwar als deutlich zeitintensiver, dafür aber auch als stabiler und weniger störanfällig.

Eine Übersicht der in die Optimierung einbezogenen Modellparameter enthält Tabelle 7.2. Die Modellparameter werden gruppenweise und sequentiell durch einen

Optimierungsalgorithmus bestimmt. Zielgröße des Optimierungsalgorithmus ist die Summe der quadratischen Abweichungen (= sum of squared errors, SSE). Die einzelnen Optimierungsschritte sind festgelegt und werden in definierter Reihe durchlaufen. Die Ergebnisse des jeweils vorangegangenen Schrittes führen zu neuen Startwerten für die Parameteroptimierung im nächsten Schritt:

- Schritt 0: Festlegung der Startparameter
- Schritt 1: Optimierung der Parameter für die Komponente Grundwasserstand
- Schritt 2: Optimierung der Parameter für die Komponente Ungesättigte Zone
- Schritt 3: Optimierung der Parameter für die Komponente Grundwasserstand (Rekalibrierung)
- Schritt 4: Optimierung der Parameter für die Komponente Grundwasserstand unter Berücksichtigung der Grundwasserzehrung (Modul 1, Variante 2)
- Schritt 5: Vergleich Schritt 3 und Schritt 4, Übernahme der Simulation mit dem geringeren SSE-Wert.

Tabelle 7.2: Liste der in der Optimierung berücksichtigten Modellparameter

Parameter	Funktion	Teilmodell	Code-Bezeichnung
f1	Reduktionsfaktor	Bodenwasserhaushaltsmodul: Variante Grundwasserzehrung	f1
n	Anzahl der Monate zur Verteilung der Grundwasserneubildung	Transferfunktion „ungesättigte Zone“	
$\kappa$	Formparameter	Transferfunktion „ungesättigte Zone“	conv_k
$\lambda$	Skalierungsparameter	Transferfunktion „ungesättigte Zone“	conv_lambda
Dxy	Skalierungsparameter	Grundwassermodell	Dxy
alpha1	Speicherparameter S1	Grundwassermodell	alpha1
beta1	Speicherparameter S1	Grundwassermodell	beta1
alpha2	Speicherparameter S2	Grundwassermodell	alpha2
beta2	Speicherparameter S2	Grundwassermodell	beta2
alphaV	Speicherparameter Sv	Grundwassermodell	alphaV

#### 7.1.4.3 Gütemaße

Die Anpassungsgüte des Modells an die beobachteten Daten kann dabei über verschiedene Gütemaße bestimmt werden. Für die Auswertung wurden folgende Gütemaße bestimmt:

- Die Wurzel des mittleren Quadratfehlers (Root Mean Squared Error- RMSE) misst die durchschnittliche Abweichung (in Metern) von simulierter und beobachteter Ganglinie. Er ist vergleichbar mit der Summe der quadratischen Abweichungen, die als Zielgröße im Optimierungsprozess minimiert wird. Eine pauschale Definition einer guten Modellanpassung ist über den RMSE-Wert als solchen nicht möglich, da der RMSE in Relation zur Streuung der Daten beurteilt werden muss.
- Die Nash-Sutcliffe-Efficiency NSE reagiert sehr empfindlich auf Abweichungen in den Extrembereichen (Peaks), der Wertebereich liegt zwischen  $-\infty$  und 1. Bei Werten  $> 0$  ist das Modell besser als der arithmetische Mittelwert.
- Der revised Index of Agreement (IOAR, Willmott et al. 2012) reagiert weniger sensitiv auf Extreme und ist daher geeigneter, um die generelle Übereinstimmung der berechneten und beobachteten Dynamik zu beschreiben als der NSE. Sein Wertebereich liegt, vergleichbar einem Korrelationskoeffizienten, zwischen -1 und +1.

#### 7.1.4.4 Split-Sample-Test KALVALv1

Der erste Split-Sample-Test KALVALv1 beinhaltet einen Kalibrierungszeitraum von 1990 bis 2005 (15 Jahre) und einen Validierungszeitraum von 2005 bis 2017 (12 Jahre). Der Kalibrierungszeitraum enthält dabei die extremen Grundwasserhochstände der Jahre 1994/1995 und die extremen Grundwassertiefstände der Jahre 1992/1993 sowie 1996/1997 ab.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Kalibrierungszeitraum tendenziell eine hohe Anpassungsgüte erreicht wird, der IOAR wie auch der NSE liegen überwiegend oberhalb des festgelegten Schwellenwertes von 0,6 (als Maß für eine ausreichende Modellgüte). Im Validierungszeitraum zeigt sich jedoch eine deutliche Verschlechterung. IOAR-Werte

bewegen sich hier im Spektrum von 0,8 bis -0,5, NSE-Werte im Bereich von 0,8 bis -4.

Die visuelle Prüfung ergab kein einheitliches Bild möglicher Ursachen für die beobachtete Verschlechterung im Validierungszeitraum. Hier kommen mehrere Faktoren in Betracht:

- Der Kalibrierungszeitraum ist möglicherweise zu kurz und führt nicht zu einem stabilen Ergebnis. Die Dominanz extremer Grundwasserstandsveränderungen könnte eine gute Modellanpassung an die reguläre Dynamik beeinträchtigen.
- Der Grundwasserstand wird in vielen Messstellen durch geringe anthropogene Einflüsse überprägt, diese werden im Kalibrierungszeitraum implizit in der Optimierung mitberücksichtigt, führen aber im Validierungszeitraum zu Abweichungen und damit einhergehend einer Verschlechterung der Modellgüte. Zu diesen Einflüssen zählen z.B. regulierte Grundwasserstandsniveaus in Marsch- und Niederungsgebieten.
- Das Modell bildet die Saisonalität und die Langzeitdynamik der Grundwasserganglinie zwar insgesamt gut und plausibel ab, es bestehen aber Defizite in der Abbildung einzelner Peaks oder generell ist der Fehler in der Abbildung der beobachteten Werte sehr hoch. Hier können lokalklimatische Effekte, besondere hydraulische Randbedingungen oder die hydrogeologische Situation der Messstelle eine Rolle spielen, auch die über eine Regionalisierung aus Stationsdaten erzeugten Klimarasterdaten können eine von den beobachteten Verhältnissen abweichende Dynamik bedingen.
- Der Modellansatz ist bewusst einfach gehalten und kann daher möglicherweise nicht alle für die Grundwasserdynamik relevanten hydraulischen Effekte abbilden. Anthropogene Einflüsse jeder Art werden gar nicht berücksichtigt. Neben Entnahmen sind auch schleichende Veränderungen der Landschaft und der wasserwirtschaftlichen Randbedingungen denkbar, die über längere Zeiträume zu Veränderungen der Grundwasserstände führen.

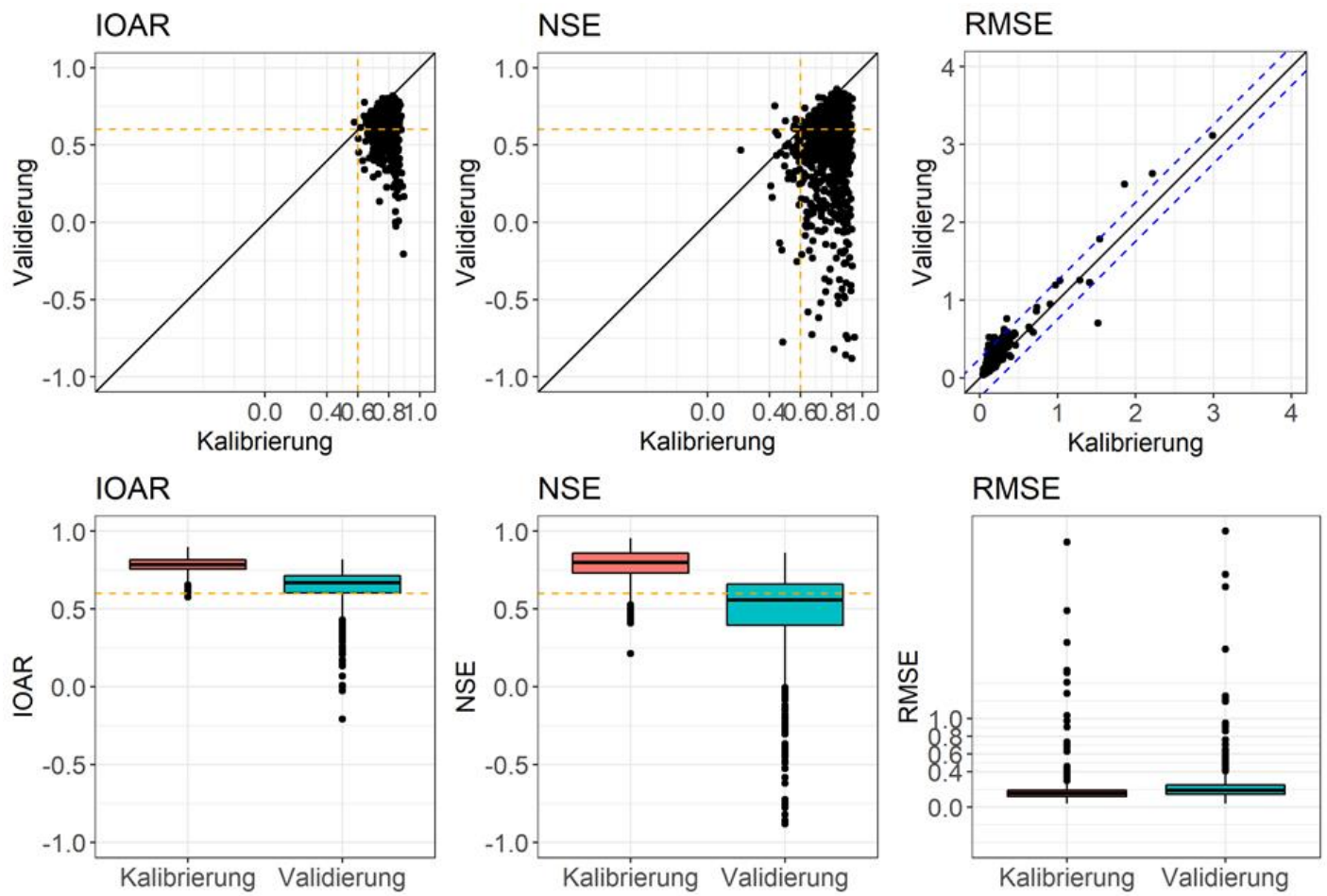


Abbildung 7.2: Ergebnisse Split-Sample-Test KALVALv1: Scatterplot und Boxplot für ausgewählte Gütekriterien.

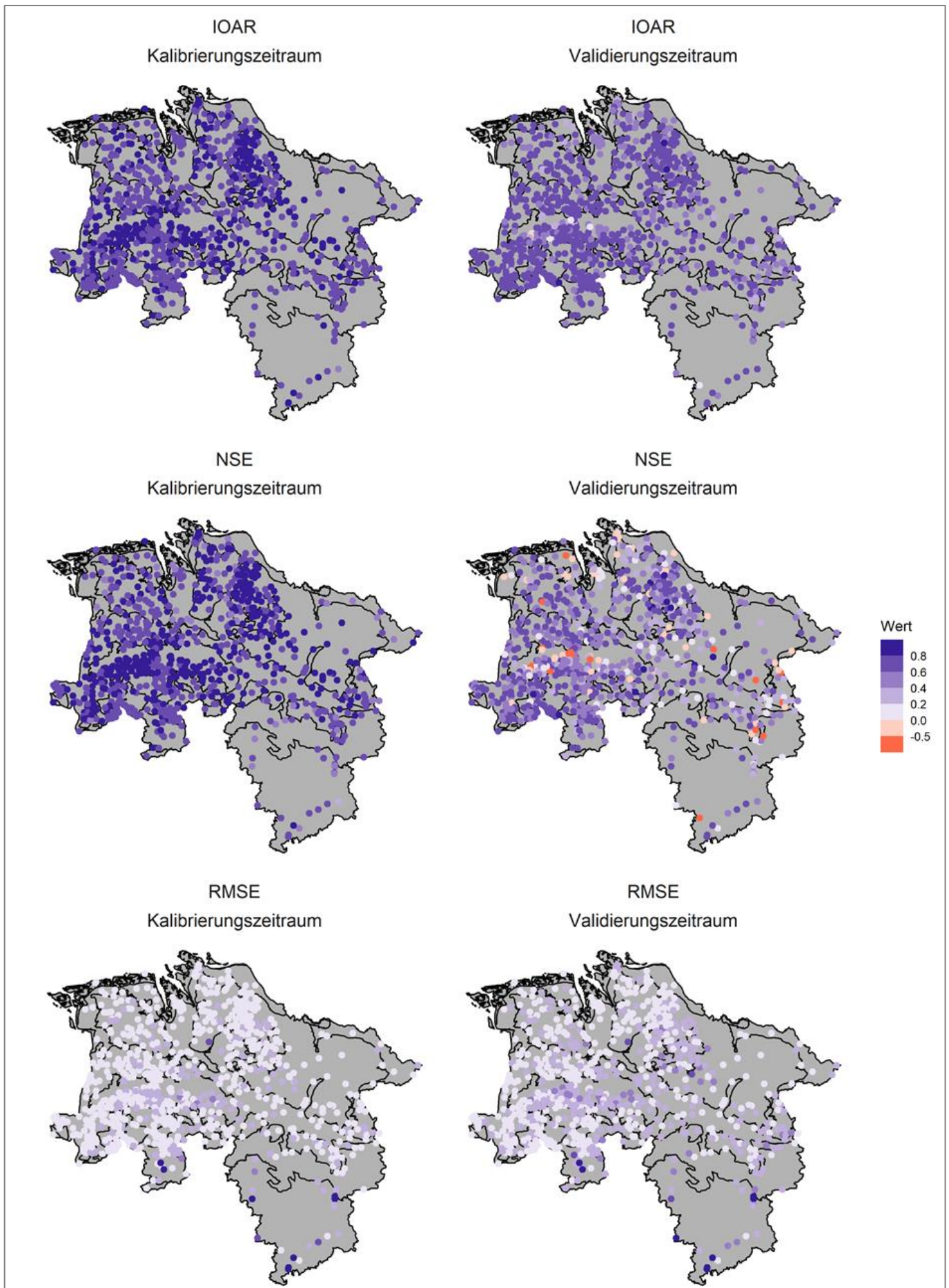


Abbildung 7.3: Ergebnisse Split-Sample-Test KALVALV1: ausgewählte Gütekriterien und räumliche Verteilung

#### 7.1.4.5 Split-Sample-Test PAROPTv1

Der Split-Sample-Test PAROPTv1 beinhaltet einen Kalibrierungszeitraum von 1988 bis 2013 (25 Jahre) und einen Validierungszeitraum von 1972 bis 1987 (17 Jahre). Der Kalibrierungszeitraum enthält dabei neben den Grundwasserstandshochständen der Jahre 1994/1995 (extrem hoch) und den Grundwassertiefständen der Jahre 1992/1993 sowie 1996/1997 eine Phase von Grundwasserstandsschwankungen auf mittlerem Standsniveau mit abnehmender Tendenz zwischen 2000 und 2013.

Grundsätzlich zeichnet sich ein vergleichbares Ergebnis zum ersten Split-Sample-Test KALVALv1 ab. In der Validierungsphase zeigt sich auch hier eine deutlich schlechtere Modellanpassung als in der Kalibrierungsphase.

Die oben angeführten Faktoren sind auch hier in gleicher Weise relevant. Ergänzend ist folgendes festzuhalten:

In den 70er und 80er Jahren sind vermehrt gravierende anthropogene Einflüsse in einzelnen Ganglinien zu beobachten. In Betracht kommen hier Grundwasserstandsveränderungen in Folge von z.B. Flußvertiefungen und -begradigung, Flurbereinigung, Entwässerung, Moorkultivierung, Inbetriebnahme von Trinkwassergewinnungsgebieten, Ausbau der Feldberegnung, Flächenversiegelung und Ertragssteigerungen in der Landwirtschaft. Damit eignet sich

der vorgesehene Validierungszeitraum nur in Einzelfällen zur Modellvalidierung.

Der Datenerhebungszeitraum an den einzelnen Messstellen variiert erheblich. In vielen Messstellen beginnt die Messung erst im Verlauf der 80er Jahre. Das bedeutet, dass der Validierungszeitraum oftmals nicht in vollem Umfang durch Grundwasserstandsdaten erfasst werden kann.

In den 80er Jahren zeigen viele Messstellen insbesondere in den Geestgebieten eine ausgeprägte Phase hoher Grundwasserstände. Diese wird im Modell in der Regel nicht abgebildet, wobei die saisonale Dynamik im Vergleich zu den Beobachtungsdaten parallel, aber auf unverändertem Niveau weiterläuft. Aus den Niederschlagsdaten des DWD (DWD CDC 2022) bzw. dem IWW-Datensatz (Haberlandt et al. 2015) ergeben sich keine Anhaltspunkte für eine besonders feuchte Phase, welche die hohen Grundwasserstände in den 1970er und 1980er Jahren erklären könnte (Abbildung 7.4). Vielmehr finden sich auch in dieser Zeit feuchte und trockene Jahre, die 1970er Jahre weisen dabei auch eine ausgeprägte Trockenphase auf. Angesichts der im Kalibrierungszeitraum sehr guten Modellanpassung sowie auch der im Validierungszeitraum weitgehend parallel zur beobachteten Dynamik verlaufenden simulierten Grundwasserstände wäre zu erwarten, dass eventuelle Auswirkungen einzelner besonders feuchter Jahre zu Beginn der 80er auch vom Modell entsprechend abgebildet würden.

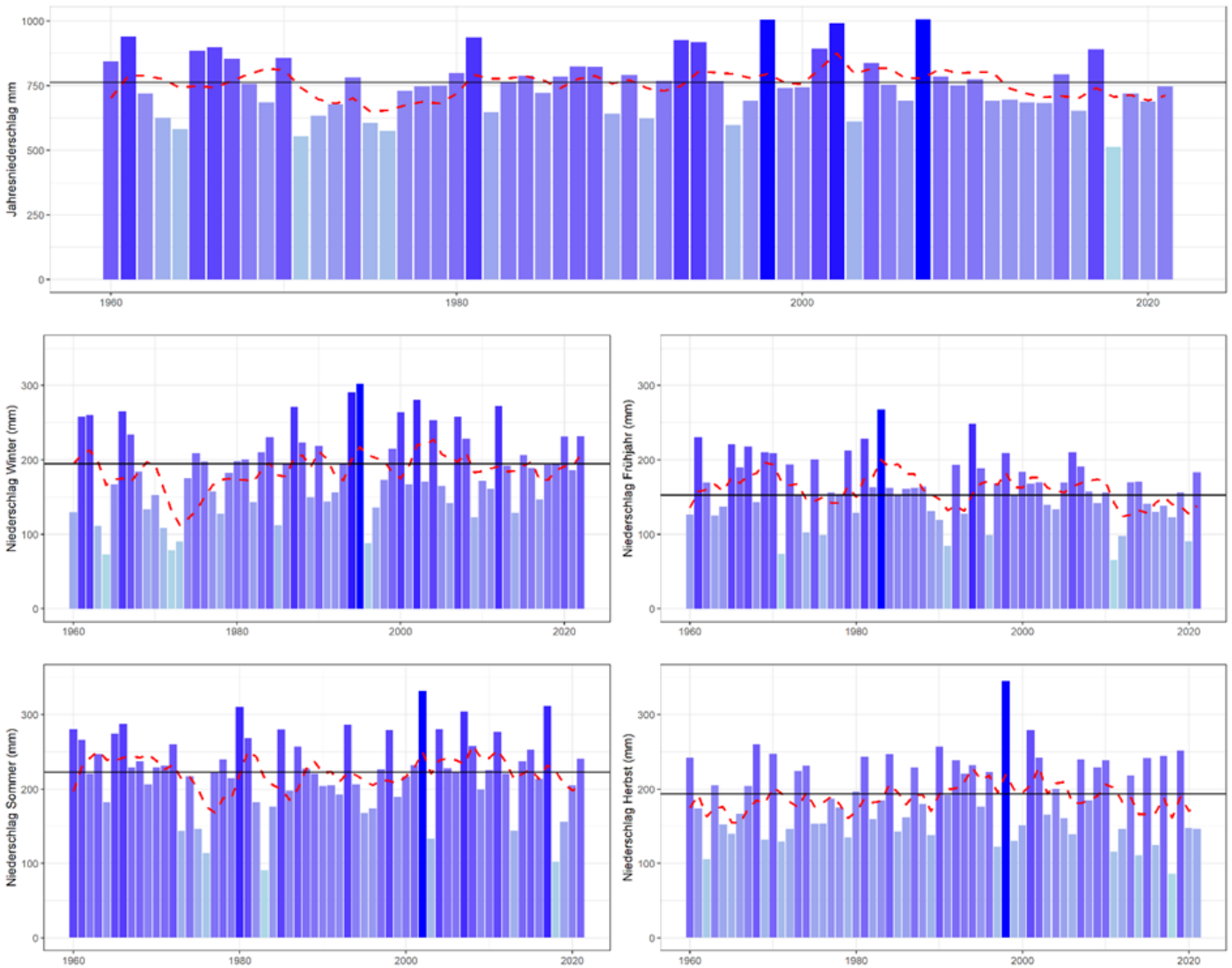


Abbildung 7.4: Niederschlagsentwicklung in Niedersachsen, Jahresniederschläge und saisonale Niederschläge. Durchgezogene Linie: Mittelwert 1991-2020; gestrichelte Linie: gleitender Mittelwert über 5 Jahre. Datenquelle: DWD CDC 2022

Veränderungen des Kalibrierungszeitraums führten nicht zu einer besseren Modellanpassung an die hohen Grundwasserstände in den 80er Jahren. Begleitende Untersuchungen legen nahe, dass ein Zusammenhang besteht zwischen der Ausprägung dieser Hochstände und damit der Modellabweichung und hydraulischen Faktoren, wie dem Grundwasserflurabstand oder der Gangliniencharakteristik (über den Indikator „Range-Ratio“ (Wunsch et al., 2019).

Für die endgültige Messstellenauswahl anhand der Gütekriterien im Validierungszeitraum stellt die

Grundwasserstandsanomalie in den 70er und 80er Jahren ein Problem dar. Ein Ausschluss von Messstellen anhand einer schlechteren Modellgüte im Validierungszeitraum würde dazu führen, niederungstypische Grundwassermessstellen bevorzugt zu selektieren und geostypische Messstellen auszuschließen, obwohl die Grundwasserdynamik insgesamt auch im Validierungszeitraum plausibel abgebildet wird (paralleler Verlauf). Als Kompromisslösung wurden daher für die finale Projektauswertung auch Messstellen akzeptiert, die im Gesamtzeitraum Validierung/Kalibrierung einen IOAR-Wert von 0,6 unterschritten.

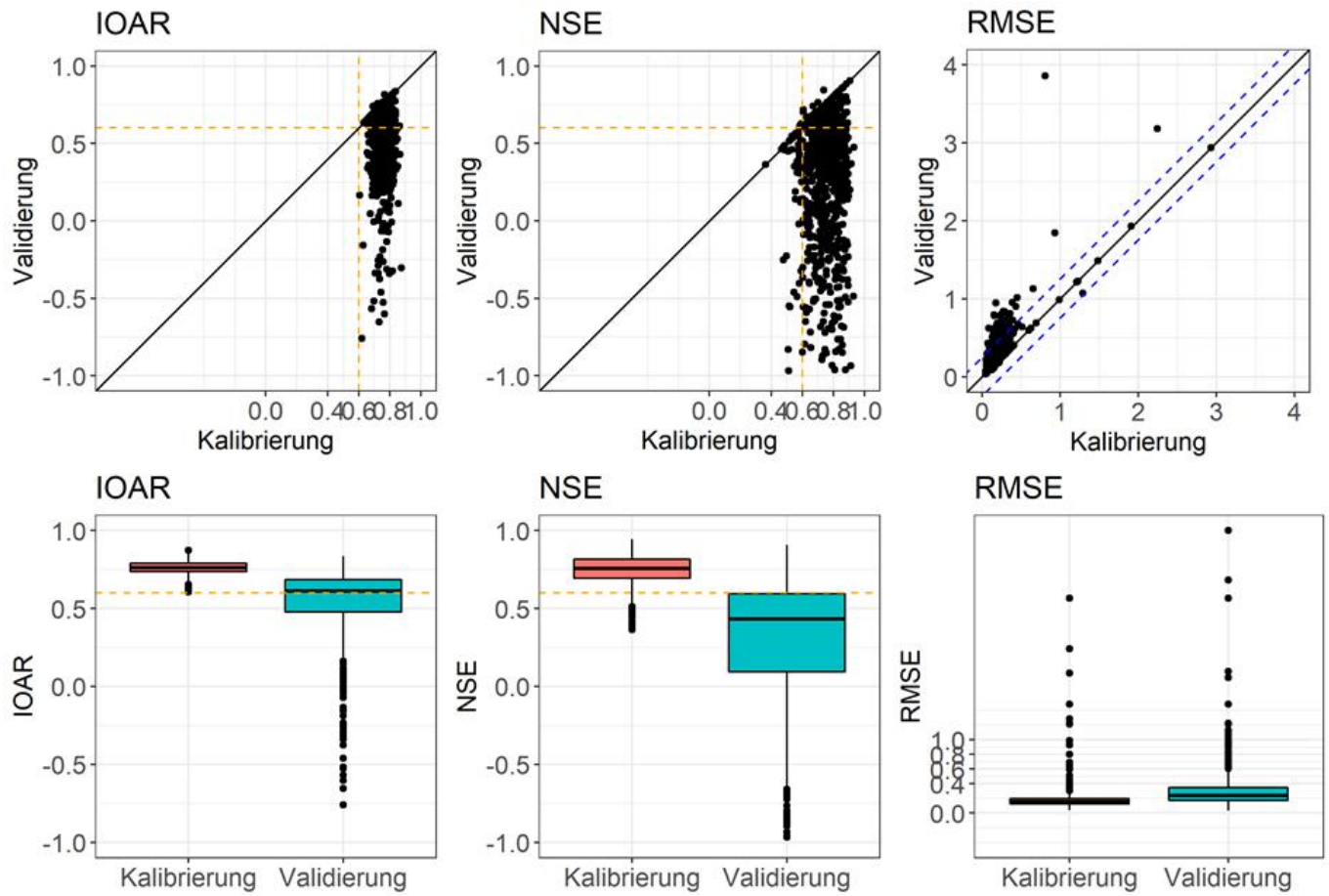


Abbildung 7.5: Ergebnisse Split-Sample-Test PAROPTv1: Scatterplot und Boxplot für ausgewählte Gütekriterien.

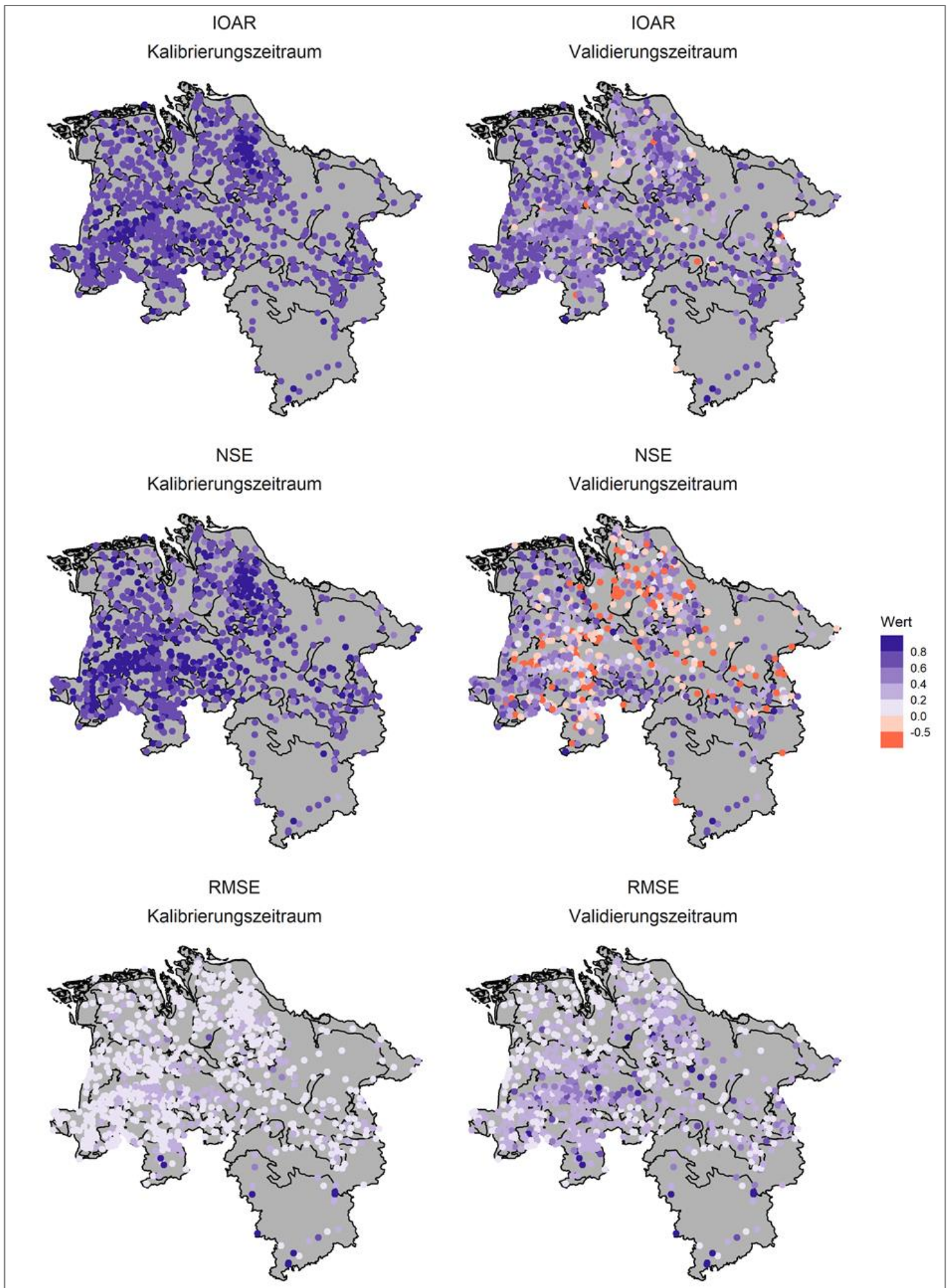


Abbildung 7.6: Ergebnisse Split-Sample-Test PAROPTv1: ausgewählte Gütekriterien und räumliche Verteilung



#### 7.1.4.6 Besonderheiten der Kalibrierung und Validierung

Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die Simulationsergebnisse für den Testlauf PAROPTv1. Die Messstellen Altenoythe (Abbildung 7.7) und Scharrelerdamm 3/79 (Abbildung 7.8) weisen einen eher niederungstypischen Ganglinienverlauf auf, die Messstellen Astrup (Abbildung 7.9) und Bethen 2/6 I (Abbildung 7.10) einen eher geesttypischen Ganglinienverlauf.

Im Kalibrierungszeitraum wird in allen Modellen eine gute Modellanpassung an die beobachteten Werte erreicht. Gleichzeitig wird in den geesttypischen Messstellen eine deutliche Abweichung im Validierungszeitraum deutlich. In den 1980er Jahren und auch in den 1970er Jahren liegen die

beobachteten Grundwasserstände auf einem deutlich erhöhten Niveau, vergleichbar oder höher als in den 2000er Jahren. Diese Phase wird von der Simulation nicht nachvollzogen. Die Grundwasserstände weisen zwar eine ähnliche Dynamik auf wie die beobachteten Grundwasserstände, liegen jedoch auf einem tieferen Niveau.

Diese Anomalie in den 1970er und 1980er Jahren tritt bei einer hohen Anzahl an Messstellen auf und weist Korrelationen zum Ganglinientypus (Niederungs- und Geestcharakteristik) – hier über den Indikator RangeRatio (Wunsch et al., 2019) und zum Flurabstand auf (Abbildung 7.11).

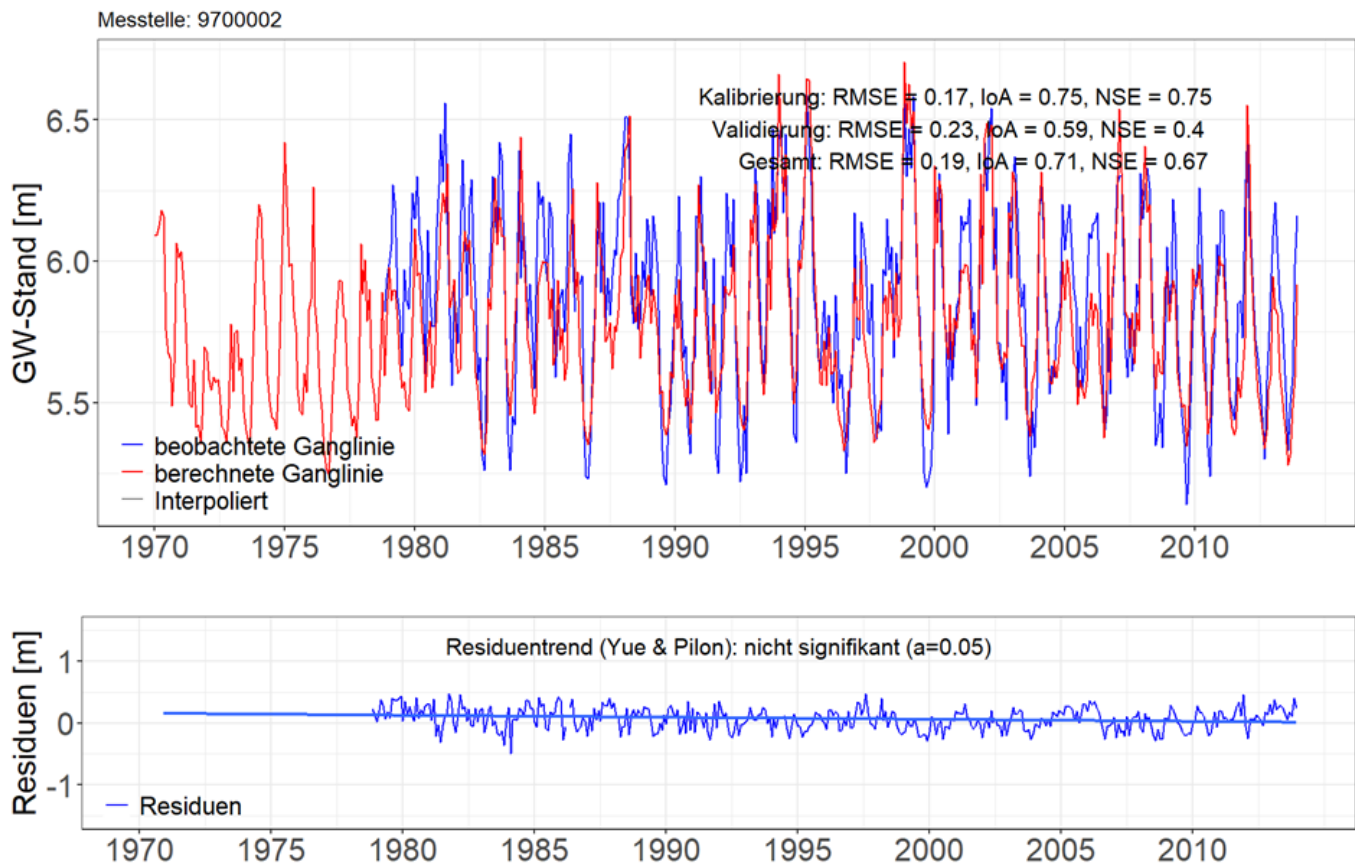


Abbildung 7.7: Kalibrierungsergebnis Messtelle 9700002 Altenoythe

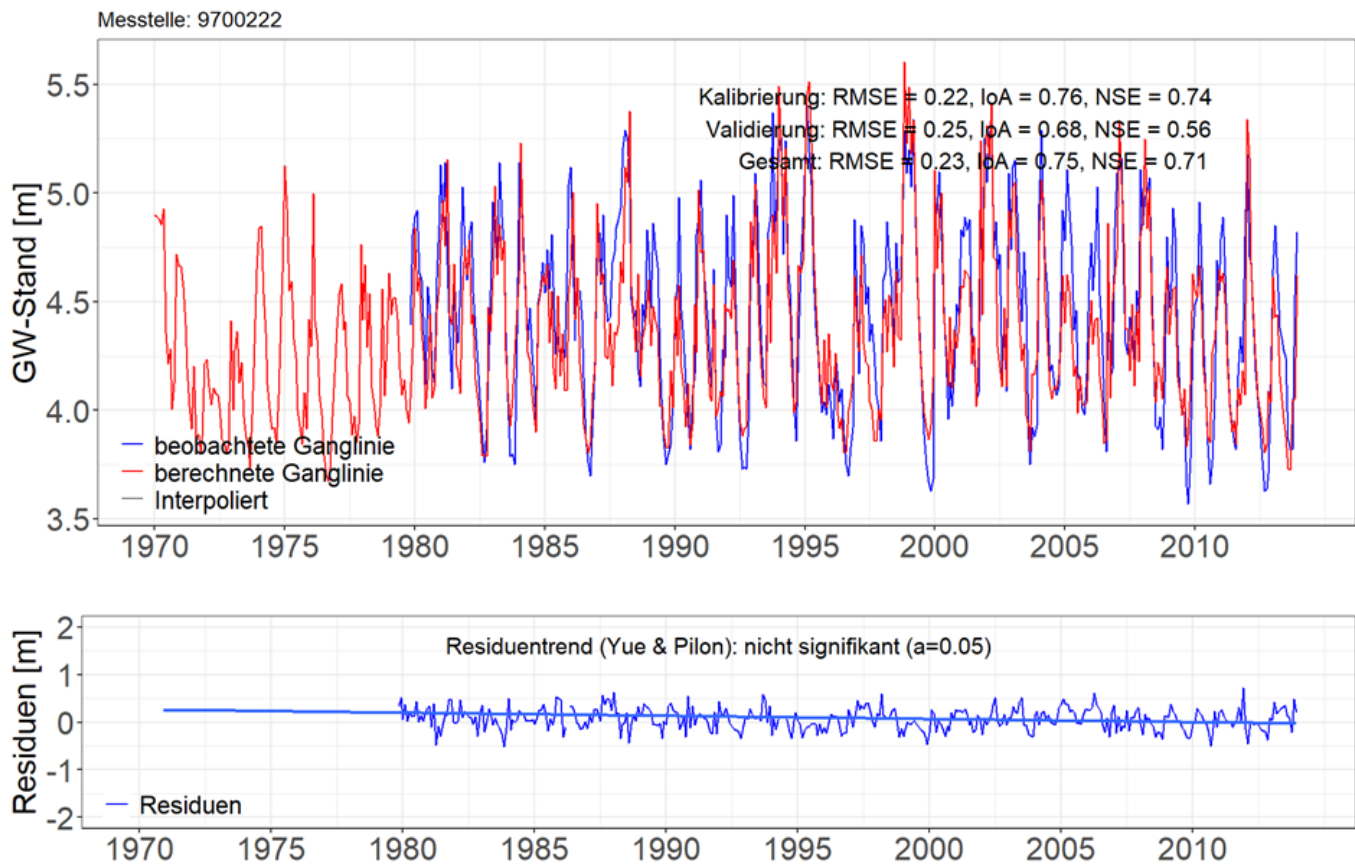


Abbildung 7.8: Kalibrierungsergebnis Messtelle 9700222 Scharrelerdamm 3/79.

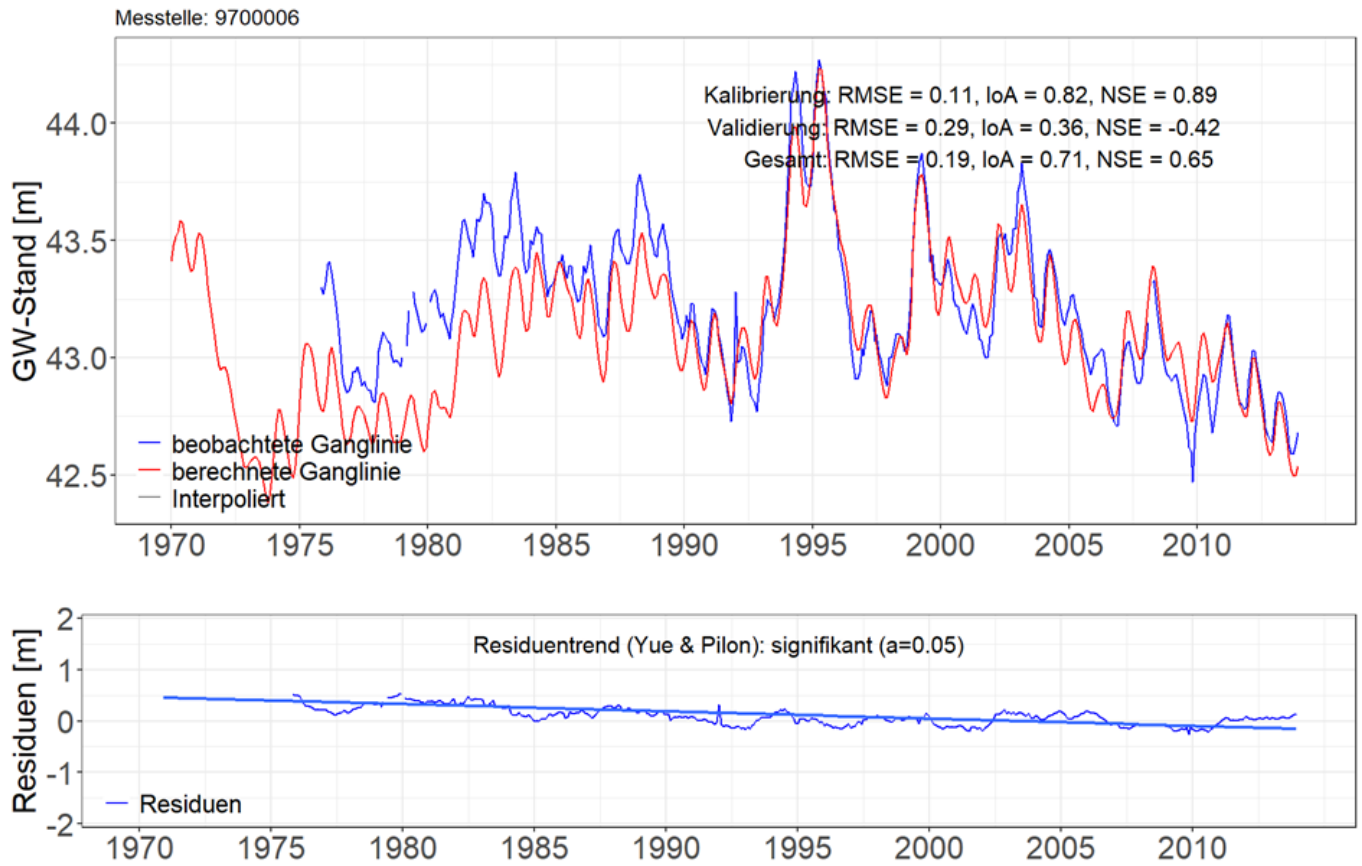


Abbildung 7.9: Kalibrierungsergebnis Messstelle 9700006 Astrup.

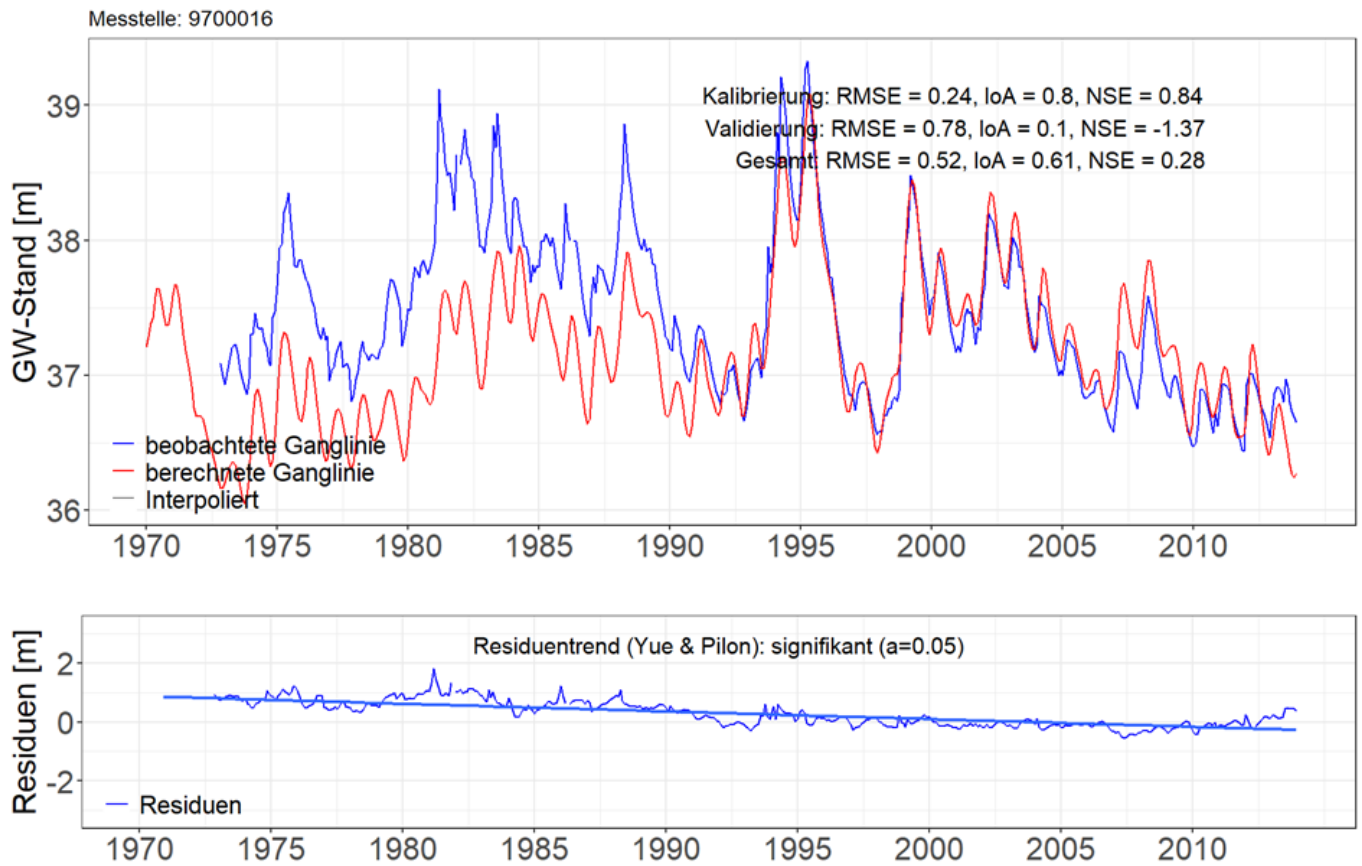


Abbildung 7.10: Kalibrierungsergebnis Messstelle 9700016 Bethen 2/6 I.

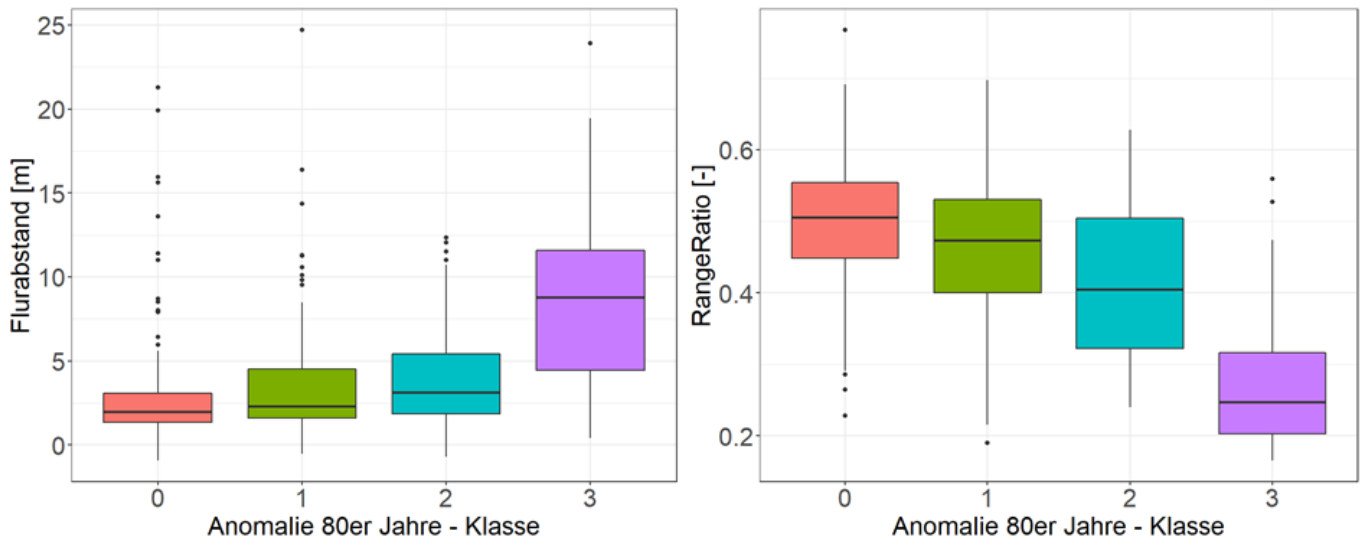


Abbildung 7.11: Anomalie der 80er Jahre (in subjektiven Stufen von 0 - nicht erkennbar bis 3 - deutliche Abweichung ohne Überlappung der Wertebereiche von beobachteter und simulierter Ganglinie) im Verhältnis zu Grundwasserflurabstand (in Metern, links) und Ganglinientypus (rechts, Indikator RangeRatio: hohe Werte niederungstypisch, niedrige Werte geesttypisch)

#### 7.1.4.7 Diskussion des Modells für die Verwendung im KLBIW7-Projekt

### Ausgangssituation

Die Ergebnisse der Split-Sample-Tests führen nicht zu einer eindeutigen Klärung der Anwendbarkeit des Modells. In der Kalibrierungsphase werden auch durchweg gute bis sehr gute Modellanpassungsgüten erreicht, alle Ganglinien konnten mit einer Anpassungsgüte von IOAR > 0,6 abgebildet werden, 92% der Messstellen mit einem NSE > 0,6. In der Validierungsphase zeigt sich insgesamt jedoch eine deutlich schlechtere Modellanpassungsgüte, nur 54% der Messstellen erreichten einen IOAR > 0,6, 23% einen NSE > 0,6. Das Modell zeigt sich dabei grundsätzlich in der Lage, eine Grundwasserstandsdynamik abzubilden, die sowohl die Saisonalität der Grundwasserstände als auch die Reaktion auf Witterungsschwankungen plausibel und auch visuell nachvollziehbar wiedergibt. Insbesondere in den 1970er und 1980er Jahren zeigen viele Messstellen in der Simulation einen parallelen Verlauf, der sich mehr oder weniger deutlich von einem höheren beobachteten Grundwasserstandsniveau abhebt. Diese Anomalie korreliert mit dem Flurabstand und dem Ganglinientypus und stellt eine wesentliche Ursache für die starke Diskrepanz der Güteindikatoren von Kalibrierungs- und Validierungszeitraum dar.

In Hinblick auf die Eignung des Modells sind modellseitige Einschränkungen, datenseitige Einschränkungen sowie allgemeine Veränderungen im Landschaftswasserhaushalt zu betrachten:

### Modellseitige Begrenzungen

Das hier verwendete Modell weist eine starre Modellstruktur auf, das Modellverhalten wird über die Modellparameter an die beobachtete Grundwasserdynamik angepasst. Dabei kann nur eine begrenzte Anpassungsgüte erreicht werden bzw. ein gewisser Modellfehler ist in Kauf zu nehmen. Nicht-klimatische Einflüsse auf das Grundwasser können nicht abgebildet werden, da entsprechende Prozesse bzw. Modellparameter nicht im Modell implementiert sind.

Das führt dazu, dass sich die Grundwasserstandsdynamik ausschließlich aus der Entwicklung der klimatischen Eingangsparameter ergibt. Andere Effekte lassen sich über eine Kalibrierung nicht implizit im Modell abbilden. Insofern ist auch hier nicht auszuschließen, dass Abweichungen der Anpassungsgüte über längere Zeiträume tatsächlich auf überlagernde Einflüsse hindeuten, die nicht auf die klimatischen Eingangsparameter zurückführbar sind.

Insbesondere basiert das Modell auf einer Beschreibung der standortbezogenen Dynamik, sofern sie unmittelbar aus der Dynamik der Klimaparameter ableitbar ist. Überlagernde

Effekte, die sich möglicherweise aus dem hydraulischen Zusammenhang des Gesamtsystems ergeben (Staueffekte, Gradient und Entfernung zum Vorfluter, Gradient und Entfernung zur Grundwasserscheide, Übergangsphasen von zeitlich andauernde Veränderungsprozessen) sind nicht abbildbar.

### Datenseitige Begrenzungen

Der IWW-Datensatz der beobachteten Daten basiert auf einer Regionalisierung von Klimadaten. Dabei besteht die Gefahr, dass aufgrund der zeitlichen Veränderungen im Stationsnetz (Wegfall oder Aufnahme von Klimastationen) künstliche Sprünge oder Trends im Datensatz erzeugt werden.

Die Grundwasserneubildung wird in der vorliegenden Modellversion über die modifizierte klimatische Wasserbilanz als Eingangsgröße abgebildet und nicht aus einem komplexen Bodenwasserhaushaltsmodell (z.B. mGROWA18-Modell des LBEG, Teilprojekt D). Unter Verweis auf die erreichten Modellanpassungsgüten erscheint dieses Vorgehen bislang ausreichend. Jedoch können unterschiedliche Ergebnisse bei Verwendung anderer Eingangsdaten nicht ausgeschlossen werden. So könnte unter Verwendung eines komplexeren Ansatzes die Dynamik der Grundwasserneubildung von der Dynamik der Klimatischen Wasserbilanz bzw. der Wasserüberschüsse abweichen bis hin zur Entwicklung unterschiedlicher Grundwassertrends über längere Zeiträume. Unterschiedliche Modellanpassungen im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum könnten hierfür ein Hinweis sein. Ein Vergleich mit der Verwendung der berechneten Grundwasserneubildungsdaten des LBEG (nach mGROWA18) konnte im Rahmen dieser Studie nicht mehr realisiert werden. Ein entsprechender Vergleich kann jedoch in der Zukunft weitere Hinweise darauf liefern, ob es zu systematischen Unterschieden in der Modellaussage kommen kann.

### Veränderungen im Landschaftswasserhaushalt

Darüber hinaus sind eine Vielzahl weiterer Effekte in der Landschaft zu berücksichtigen, die zu schnellen oder auch lang andauernden Grundwasserstandsveränderungen geführt haben können.

- Natürliche und künstliche Vertiefung von Gewässern und Anpassung der Grundwasserspiegel
- Gebietsentwässerung und Drainage von Flächen
- Flächenversiegelung und Oberflächenentwässerung mit resultierendem Rückgang der für Grundwasserneubildung zur Verfügung stehenden Flächen

- Ertragssteigerungen in der Landwirtschaft und damit verbundene Veränderungen in der Bodenwasserhaushaltsdynamik
- Veränderungen des Entnahmedrucks (z.B. Ausbau Trinkwassergewinnung und Feldberegnung) mit regionalen Anpassungen der Grundwasseroberfläche.

Eine Prüfung auf offensichtliche anthropogene Einflüsse in den Messstellendaten erfolgte auf Basis von vorhandenen Auswertungen nur für Zeiträume ab Ende der 80er Jahre. In der Betrachtung der Daten vor 1990 zeigen vereinzelte Grundwassermessstellen durchaus deutliche Veränderungen im Grundwasserstands-niveau, die auf anthropogene Einflüsse im Zusammenhang mit Flurbereinigung/Entwässerung oder der Einrichtung von Trinkwassergewinnungsgebieten hindeuten.

Bei einem Betrachtungszeitraum über mehrere Jahrzehnte lässt sich nicht ausschließen, dass es durch derartige Prozesse auch zu schleichenden, aber durchaus signifikanten Veränderungen im Landschaftswasserhaushalt und damit auch des Grundwasserstands-niveaus gekommen ist, die nicht unbedingt unmittelbar in der Grundwasserstandsganglinie zu erkennen sind.

Vor diesem Hintergrund ist die abnehmende Modellanpassungsgüte in den Validierungszeiträumen zumindest kritisch zu hinterfragen, eine langfristige Beeinflussung der Beobachtungsdaten durch reale Veränderungen in der Landschaft ist nicht von vornherein auszuschließen.

Frühere Zeiträume vor 1990 sind daher nur bedingt als Maßstab für die Beurteilung der Modellgüte geeignet und stellen möglicherweise auch nur bedingt eine Referenz für zukünftige Zustände dar.

## Fazit

Die Verschlechterung der Modellanpassungsgüte im Validierungszeitraum gegenüber dem Kalibrierungszeitraum kann entweder auf die klimatischen Eingangsdaten oder auf externe Effekte zurückzuführen sein. Diese Frage ist nicht abschließend geklärt.

Für den weiteren Verlauf der Studie wird davon ausgegangen, dass das Modell die Auswirkungen von Klima und Witterung auf die Grundwasserstandsdynamik grundsätzlich gut darstellen kann, diese Dynamik aber weiter überprüft werden könnte durch weitere Faktoren, die im gesamten Grundwassersystem wirken und im Modell nicht mehr abgebildet werden.

Für die Verwendung im KLIBIW7-Projekt erscheint es grundsätzlich vorteilhaft, die Kalibrierung anhand einer

möglichst langen Zeitreihe von wenigstens 30 Jahren durchzuführen, um möglichst vielfältige Grundwasserstands- und Witterungssituationen mit extremen Verhältnissen abzubilden und so eine möglichst ausgeglichene Modellanpassung für die Langzeitsimulation bis 2100 zu erhalten.

### 7.1.5 Auswahl der Messstellen für die Auswertung

Für die Auswertung wurde aus den 962 Messstellen eine Auswahl hinsichtlich der Modellanpassungsgüte sowie hinsichtlich der Vollständigkeit der Beobachtungsdaten im Referenzzeitraum getroffen.

Hinsichtlich der Modellanpassungsgüte wurde festgelegt, dass für die Gütemaße (hier: IOAR) ein Wert von 0,6 mindestens eingehalten werden sollte. Aufgrund der Grundwasserstands-anomalie in den 70er und 80er Jahren würde ein Ausschluss von Messstellen aufgrund einer schlechteren Modellgüte im Validierungszeitraum dazu führen, niederungstypische Grundwassermessstellen bevorzugt zu selektieren und geesttypische Messstellen von der Analyse auszuschließen, obwohl die Grundwasserdynamik insgesamt auch im Validierungszeitraum als paralleler Verlauf plausibel abgebildet wird und andere, nicht-klimatische Faktoren als Ursache für diese Abweichungen vermutet werden. Als Kompromisslösung wurden daher für die finale Projektauswertung auch Messstellen akzeptiert, an denen zwar im Validierungszeitraum ein IOAR-Wert von 0,6 unterschritten wurde, aber im Gesamtzeitraum Validierung/Kalibrierung ein IOAR-Wert von 0,6 eingehalten werden konnte.

Der NSE wurde nicht in die finale Messstellenauswahl einbezogen, da der NSE-Wert besonders empfindlich auf extreme Werte reagiert und daher nur bedingt die Anpassungsgüte für Grundwasserstände in einem mittleren Wertebereich repräsentiert.

Für die Berechnung der absoluten Veränderungen nach dem Delta-Change-Ansatz war es erforderlich, den Referenzzeitraum 1981-2010 durch Beobachtungsdaten möglichst vollständig zu erfassen, um einen Bias durch unvollständige Referenzzeiträume zu vermeiden. Hier haben die Projektbeteiligten festgelegt, dass die Beobachtungsdaten in diesem Zeitraum maximal 5% Fehlwerte aufweisen durften.

Hieraus ergibt sich die in Tabelle 4 dargestellte Verteilung der Messstellen auf die Güteklassen und Güteparameter. Im Ergebnis wurden 709 Messstellen mit weniger als 5% Fehlwerten und einem Gütemaß IOAR von mindestens 0,6 im kombinierten Kalibrierungs- und Validierungszeitraum in die endgültige Auswertung übernommen.

Tabelle 7.3: Verteilung der Messstellen auf die Güteklassen für die Gütemaße IOAR und NSE sowie IOAR unter Berücksichtigung der zulässigen Fehlwerte

n=962	IOAR	NSE	IOAR / max 5% Fehlwerte (1981 bis 2010)
> 0,6 im Kalibrierungszeitraum	962 (=100%)	889 (=92%)	743 (=77%)
> 0,6 im Validierungszeitraum	521 (=54%)	219 (=23%)	352 (=37%)
> 0,6 im Gesamtzeitraum Kalibrierung/Validierung	921 (=96%)	616 (=64%)	<b>709 (=74%)</b>

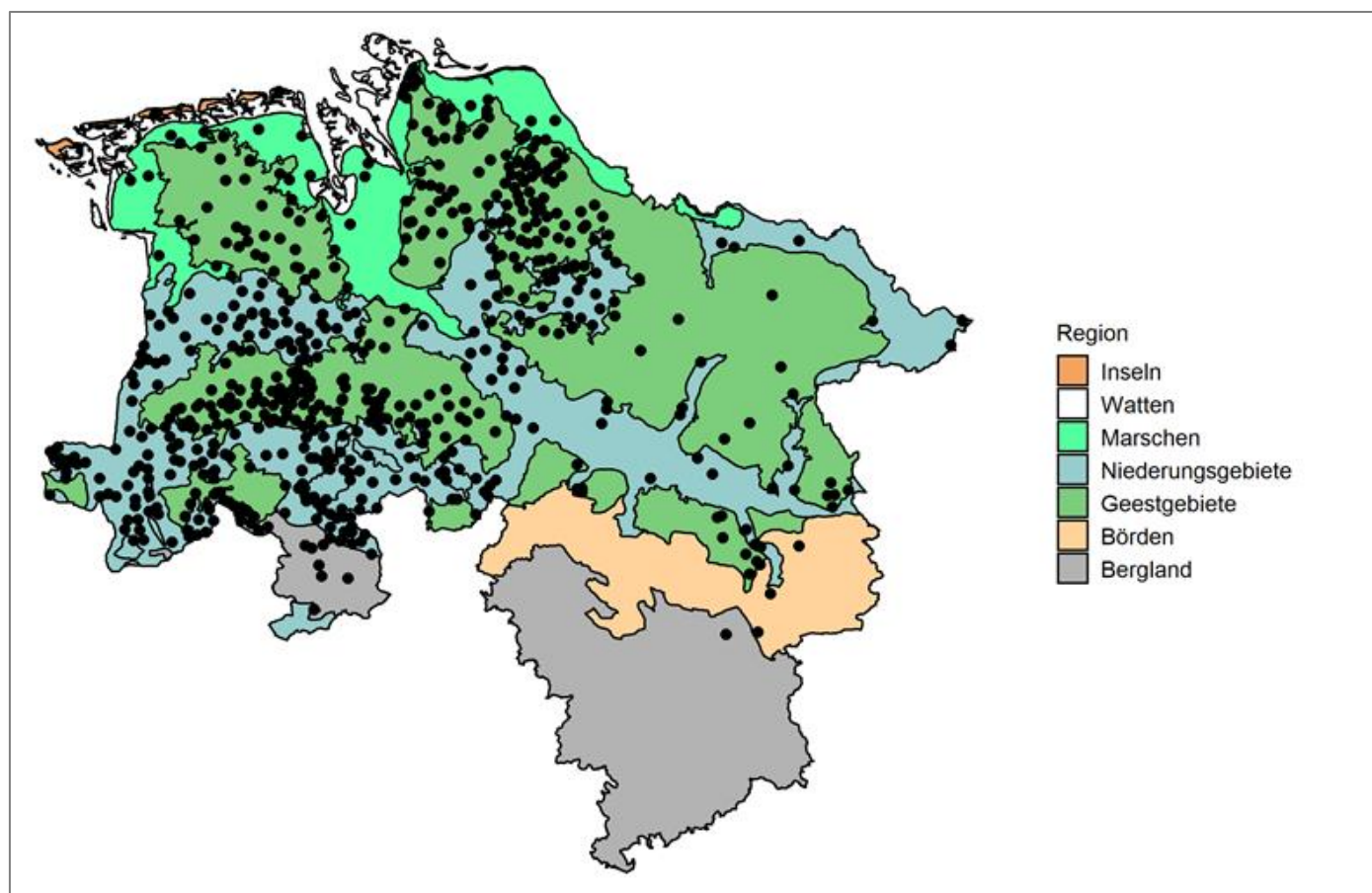


Abbildung 7.12: Finale Messstellenauswahl im Teilprojekt A und Regionen zur räumlich differenzierten Auswertung

### 7.1.6 Berechnung der zukünftigen Grundwasserstände auf Basis von Klimaprojektionen

Der finale Parametersatz für die Projektionsrechnung wurde aus dem Kalibrierungslauf PAROPTv1 abgeleitet. Damit erfolgte die Projektionsrechnung auf einem Parametersatz, der auf der Optimierung für einen 25-jährigen Kalibrierungszeitraum beruht.

Mit dem finalen Parametersatz wurde für jede Messstelle und für jede Klimaprojektion ein Langzeitlauf durchgeführt. Im Ergebnis lag pro Messstelle für jede der 8 Klimaprojektionen eine simulierte Zeitreihe der Grundwasserstandsentwicklung von 1971 bis 2100 vor.

### 7.1.7 Ergebnisse für die Simulation ausgewählter Kenngrößen

#### 7.1.7.1 Überblick

In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt die Darstellung der im Teilprojekt A ermittelten Änderungssignale für die einzelnen Kernindikatoren. Das Änderungssignal wird für die nahe Zukunft und die ferne Zukunft zum einen kartografisch dargestellt sowie über ein Balkendiagramm beschrieben. Die Karten stellen die maximalen, mittleren und minimalen Änderungssignale (über alle Klimaprojektionen) für die einzelnen Messstellen dar. Das Balkendiagramm fasst die maximalen, mittleren und minimalen Änderungssignale

(über alle Klimaprojektionen) als Mittelwert (über alle Messstellen) für die Regionen zusammen. Analoge Abbildungen für die sonstigen Indikatoren finden sich im Anhang zu Teilprojekt A.

### 7.1.7.2 Mittlerer Jahrestiefstand

Der mittlere Jahrestiefstand bleibt in der nahen wie fernen Zukunft im Wesentlichen unverändert (Abbildung 7.13):

Die mittlere Veränderung liegt in der nahen Zukunft zwischen -0,03 m und 0,00 m und damit auf dem Niveau des Referenzzustands, die Extreme zeigen geringe Veränderungen zwischen -0,19 m und +0,18 m.

In der fernen Zukunft liegt die mittlere Veränderung zwischen -0,02 m und +0,04 m und damit ebenfalls dem

Niveau des Referenzzustands, die Extremwerte liegen zwischen -0,19 m und +0,18 m.

Der mittlere Jahrestiefstand unterscheidet sich zwischen naher und ferner Zukunft praktisch nicht, lediglich in den Geestgebieten besteht eine Tendenz zu einer geringen Zunahme von der nahen zur fernen Zukunft.

In den Inseln, Marschen und Niederungsgebieten fallen die Veränderungen und auch die Spannweiten der Extrema deutlich geringer als in den Geestgebieten, den Börden und dem Bergland.

In der Kartendarstellung (Abbildung 7.14) wird insbesondere der Gegensatz zwischen den Niederungen und den Geestgebieten deutlich. Auch die Tendenz zu einem weiteren Anstieg des mittleren Jahrestiefstands in den Geestgebieten in der fernen Zukunft lässt sich gut ablesen.

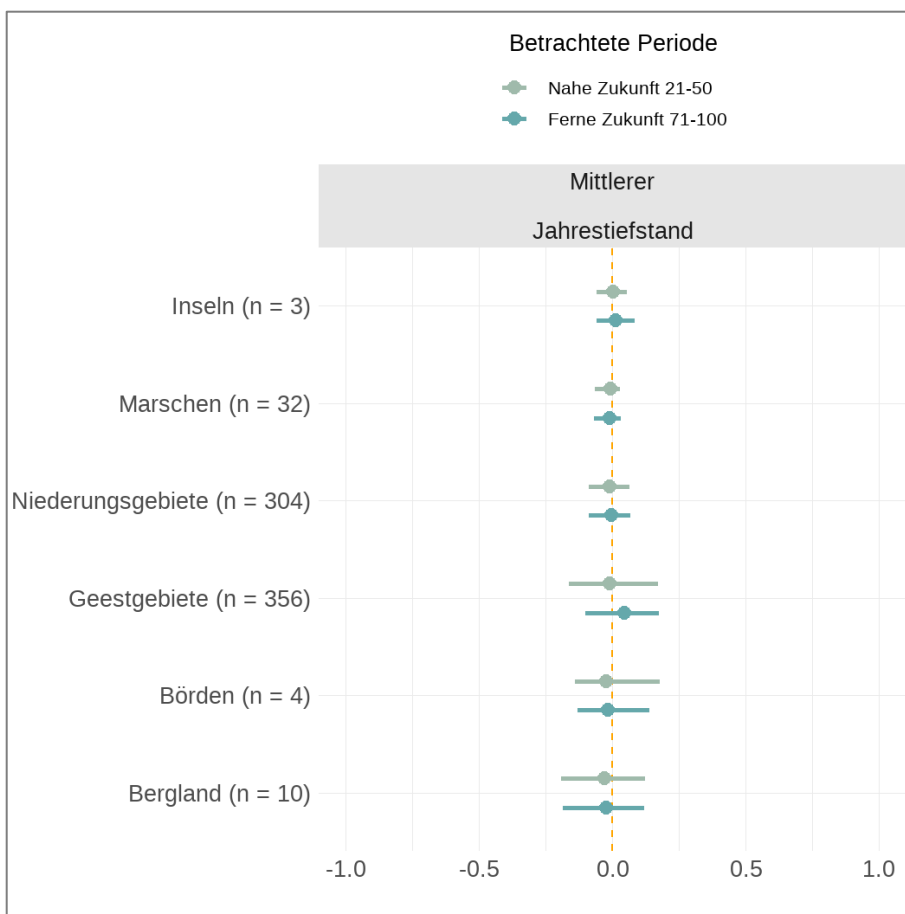


Abbildung 7.13: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung des mittleren Jahrestiefstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (in Metern).



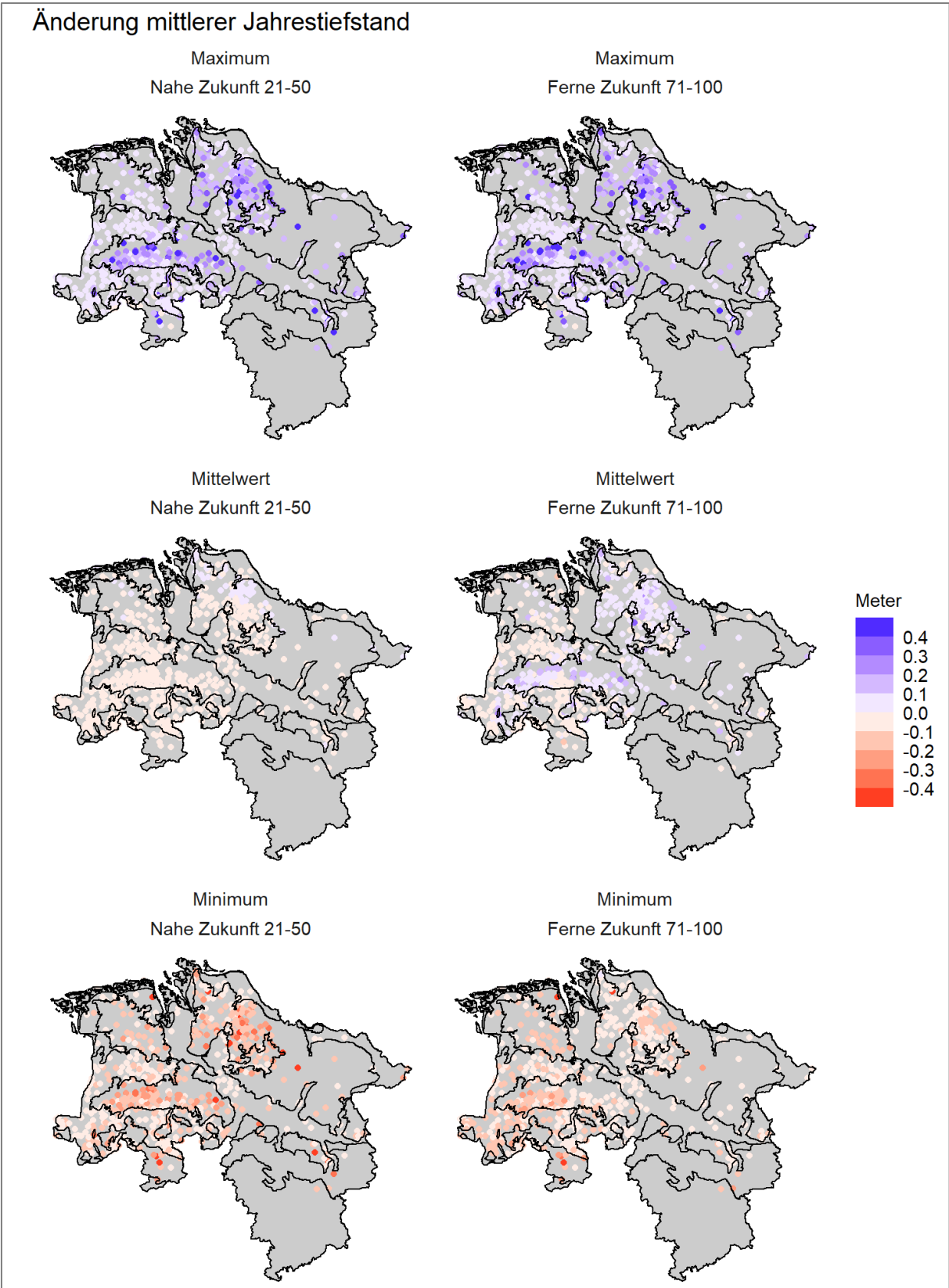


Abbildung 7.14: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des mittleren Jahrestiefstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010.

### 7.1.7.3 Mittleres Jahreshochstand

Der mittlere Jahreshochstand verändert sich geringfügig bis deutlich in der nahen wie in der fernen Zukunft (Abbildung 7.15).

Die mittlere Veränderung in der nahen Zukunft liegt im Bereich von 0,00 bis +0,02 m, der mittlere Jahreshochstand bleibt damit auf dem Referenzniveau. Die Extremwerte liegen zwischen -0,19 m und +0,31 m.

In der fernen Zukunft liegt die Änderung des mittleren Jahreshochstands zwischen +0,05 und +0,18 m, die Extreme zeigen Änderungen zwischen -0,13 bis +0,38 m an. Von der

nahen zur fernen Zukunft zeichnet sich damit ein geringer Anstieg des mittleren Jahreshochstands ab.

Im Mittel der Projektionen ergeben sich damit auch in Bezug auf den mittleren Jahreshochstand nur geringe Veränderungen. Die maximale Veränderung kann jedoch in den Geestgebieten, Börden und dem Bergland mit Werten größer als +0,25 m auch deutlich ausfallen.

Auch in der Kartendarstellung (Abbildung 7.16) wird der Gegensatz zwischen den Niederungen und den Geestgebieten deutlich. Auch die Tendenz zu einem weiteren Anstieg des mittleren Jahreshochstands in den Geestgebieten in der fernen Zukunft lässt sich gut ablesen.

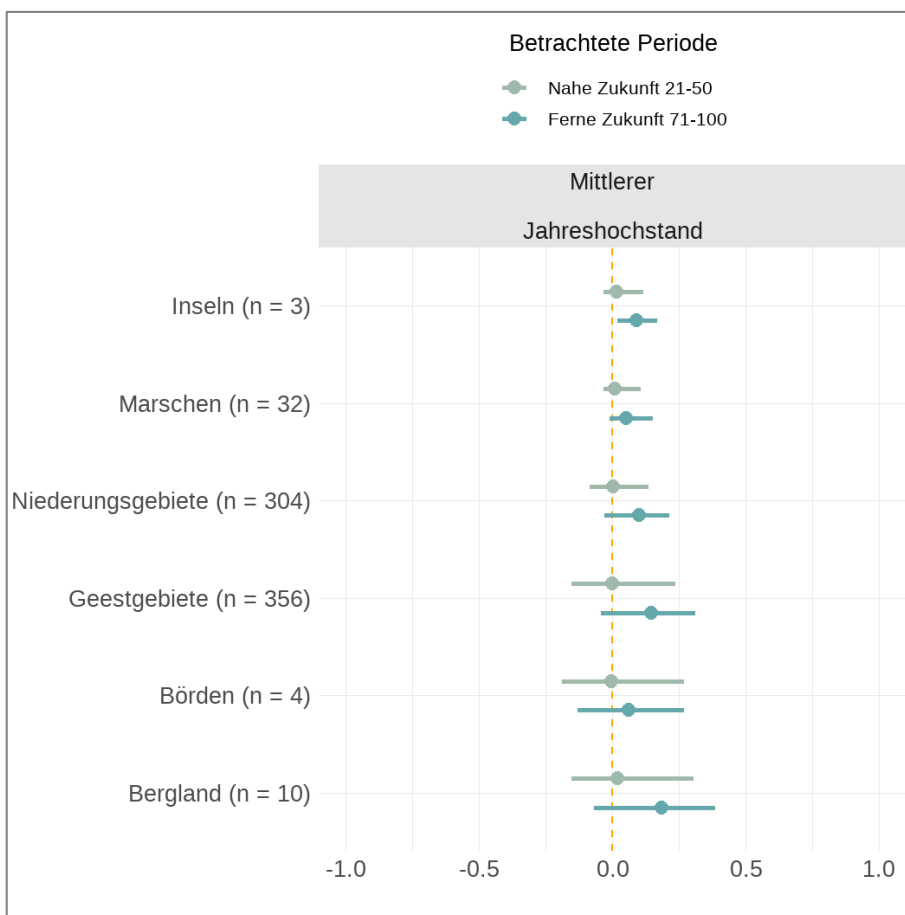


Abbildung 7.15: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung des mittleren Jahreshochstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (in Metern).

# Änderung mittlerer Jahreshochstand

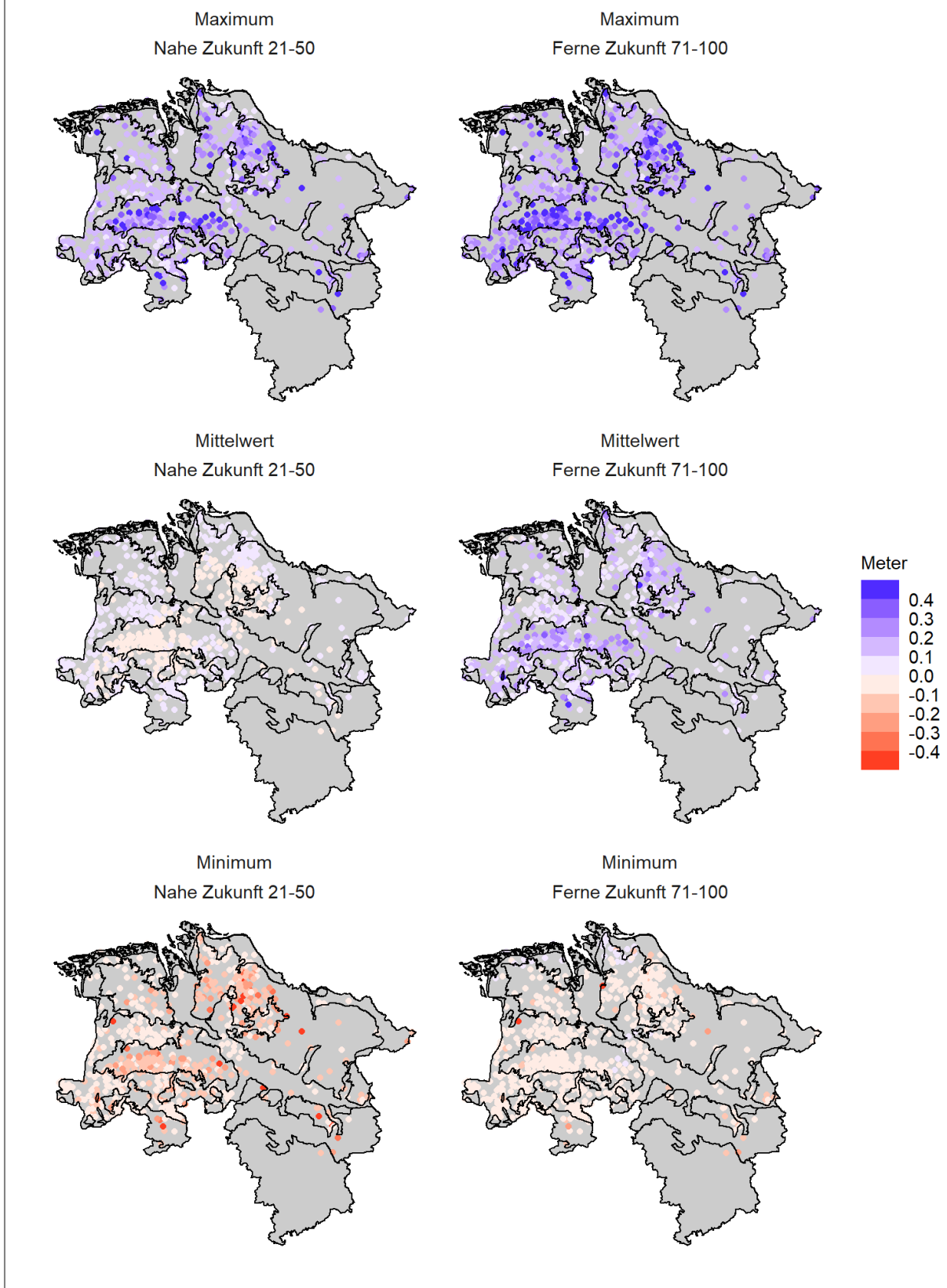


Abbildung 7.16: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des mittleren Jahreshochstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010.

#### 7.1.7.4 Mittlere Jahresamplitude

Die mittlere Jahresamplitude erfährt voraussichtlich nur geringe Veränderungen in der nahen und fernen Zukunft, lediglich im Bergland zeigen sich deutliche Veränderungen ab (Abbildung 7.17):

Die mittleren Veränderungen liegen in der nahen Zukunft zwischen +0,01 und +0,05 m, in den Extremen treten überwiegend Veränderungen zwischen - 0,15 m und + 0,15 m auf. Lediglich im Bergland ist eine Veränderung zwischen - 0,15 m und +0,23 m möglich.

In der fernen Zukunft zeichnet sich eine weitere Zunahme der mittleren Jahresamplitude ab, die mittleren Veränderungen liegen zwischen +0,06 m und +0,24 m. Die

Extremwerte liegen im Bergland zwischen +0,02 m und +0,44 m, in den übrigen Regionen zwischen -0,09 m und +0,26 m.

In der Kartendarstellung (Abbildung 7.18) zeichnen sich insbesondere die Geest- und Niederungsgebiete im westlichen Niedersachsen durch starke Veränderungen insbesondere in den Maxima aus, die Stader Geest scheint weniger starke Veränderungen zu verzeichnen.

Die Änderungen fallen in der fernen Zukunft stärker aus als in der nahen Zukunft. Hier wirken die tendenziell gleichbleibenden mittleren Jahresminima und die zunehmenden mittleren Jahresmaxima zusammen und führen zu einem entsprechenden Anstieg auch der mittleren Jahresamplitude.

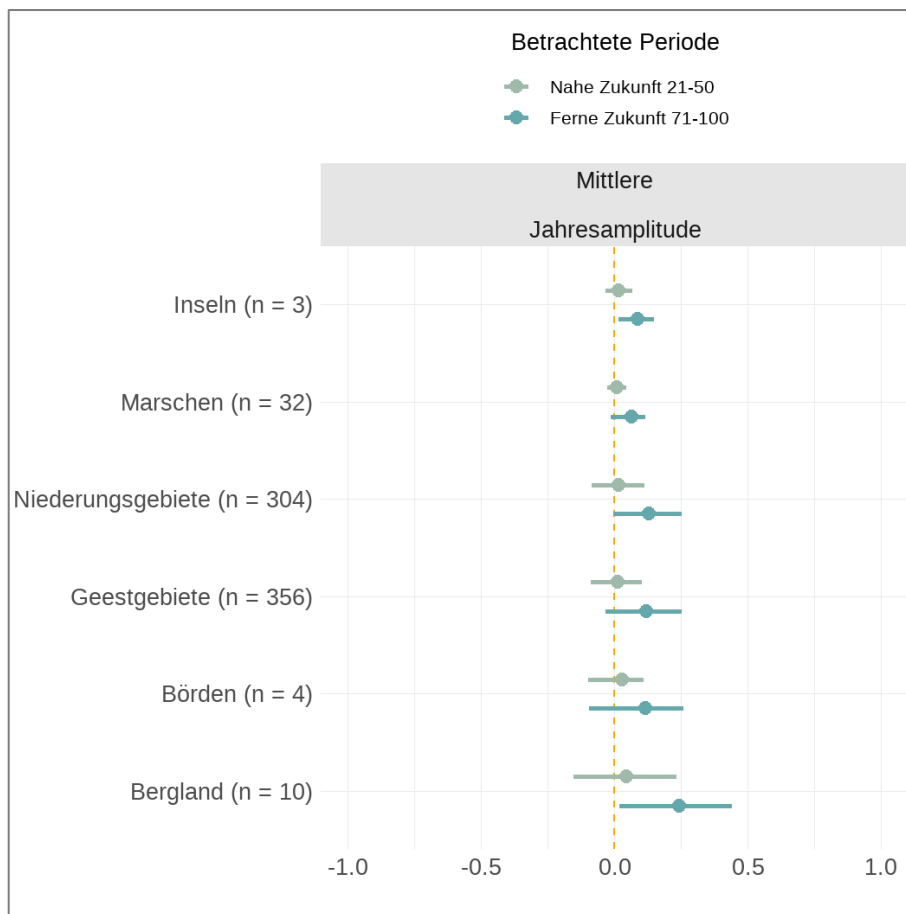


Abbildung 7.17: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung der mittleren Jahresamplitude gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (in Metern).

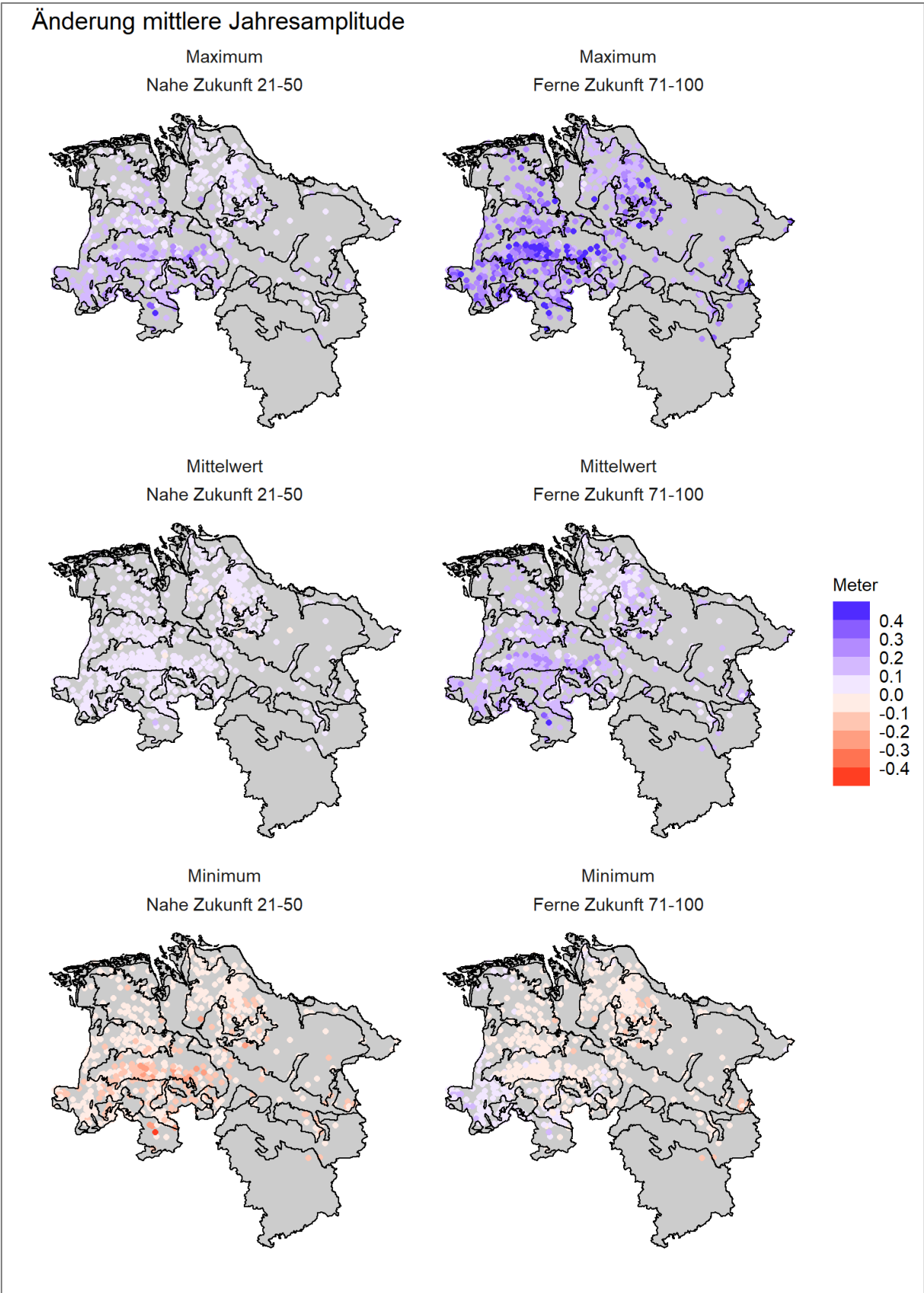


Abbildung 7.18: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der mittleren Jahresamplitude gegenüber der Referenzperiode 1981-2010.

### 7.1.7.5 Anzahl der Monate mit Grundwassertiefstand

Die Anzahl der Niedrigstandsmonate nimmt zur nahen Zukunft geringfügig zu und ändert sich bis zur fernen Zukunft nur unwesentlich (Abbildung 7.19).

Die mittleren Änderungen weisen in der nahen Zukunft auf eine Zunahme der Niedrigstandsmonate um 3-21 Monate hin (d.h. im Durchschnitt über 30 Jahre maximal 0,67 Monate länger pro Jahr). Die maximalen Änderungen liegen zwischen 29 – 100 Monaten (im Durchschnitt 1-3,3 Monate mehr Niedrigstandsmonate pro Jahr), die minimalen Veränderungen zeigen eine Abnahme der Niedrigstandsmonate zwischen -16 und -51 Monaten (im Durchschnitt 0,67 -1,67 Monate weniger im Jahr).

In der fernen Zukunft liegen die mittleren Veränderungen zwischen -9 und +19 Monaten (d.h. im Durchschnitt über 30 Jahre maximal +0,63 Monate pro Jahr), die minimalen Änderungen liegen zwischen -12 und -45 Monaten, die maximalen Änderungen zwischen +40 und +91 Monaten.

Außer in den Marschen und im Bergland zeigt sich eine Tendenz zu einer Verringerung der Niedrigstandsmonate in der fernen Zukunft gegenüber der nahen Zukunft. Die Unterschiede zwischen naher und ferner Zukunft bleiben jedoch vernachlässigbar gering. Auffällig sind jedoch die Geestgebiete, für die im Mittel der Projektionen nicht nur eine deutliche Verringerung von 24 Monaten (von +15 auf -9 Monate) gegenüber dem Niveau der nahen Zukunft angezeigt wird, sondern auch eine Verringerung von -9 Monaten gegenüber dem Niveau des Referenzzeitraums. (Im Maximum erfolgt von der nahen zur fernen Zukunft ein deutlicher Rückgang von ca. 75 Monaten auf ca. 40 Monate gegenüber dem Referenzzeitraum.

In der Kartendarstellung (Abbildung 7.20) fallen erneut die Geestgebiete als die Regionen mit den deutlichsten Veränderungen auf. Ein deutlicher Kontrast zu den übrigen Gebieten ergibt sich durch die Abnahme der Anzahl der Niedrigstandsmonate in der fernen Zukunft.

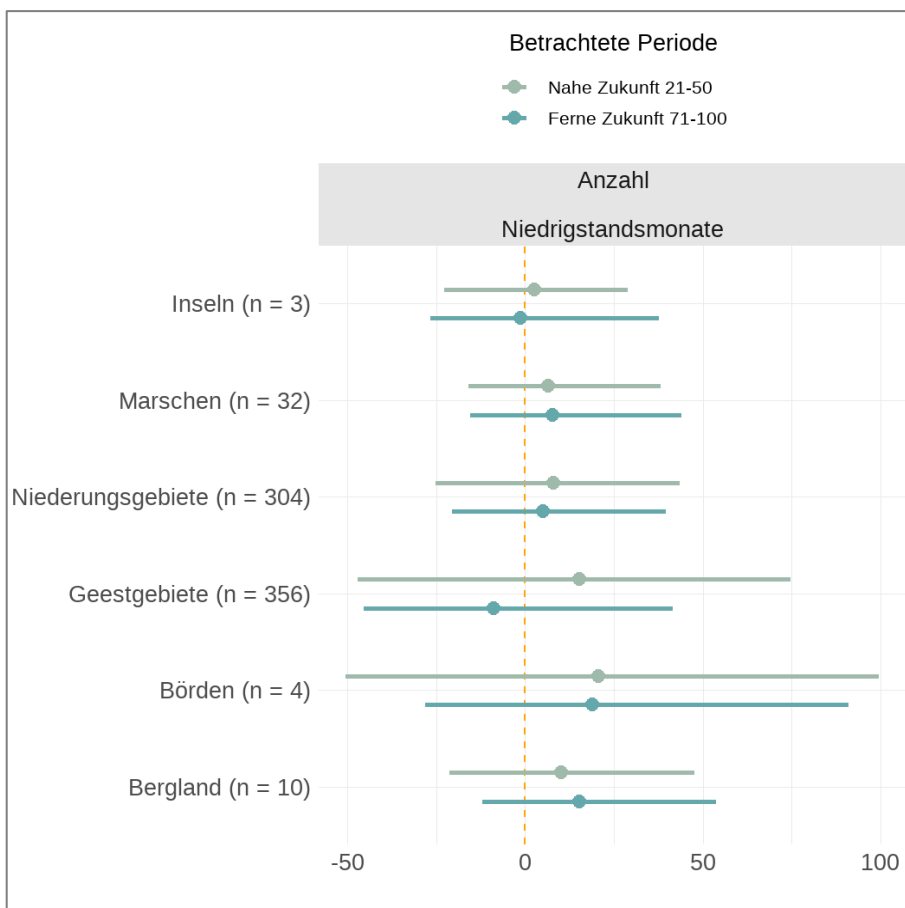


Abbildung 7.19: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung der Anzahl der Monate mit Grundwasserniedrigstand gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (im gesamten 30-Jahres-Zeitraum).

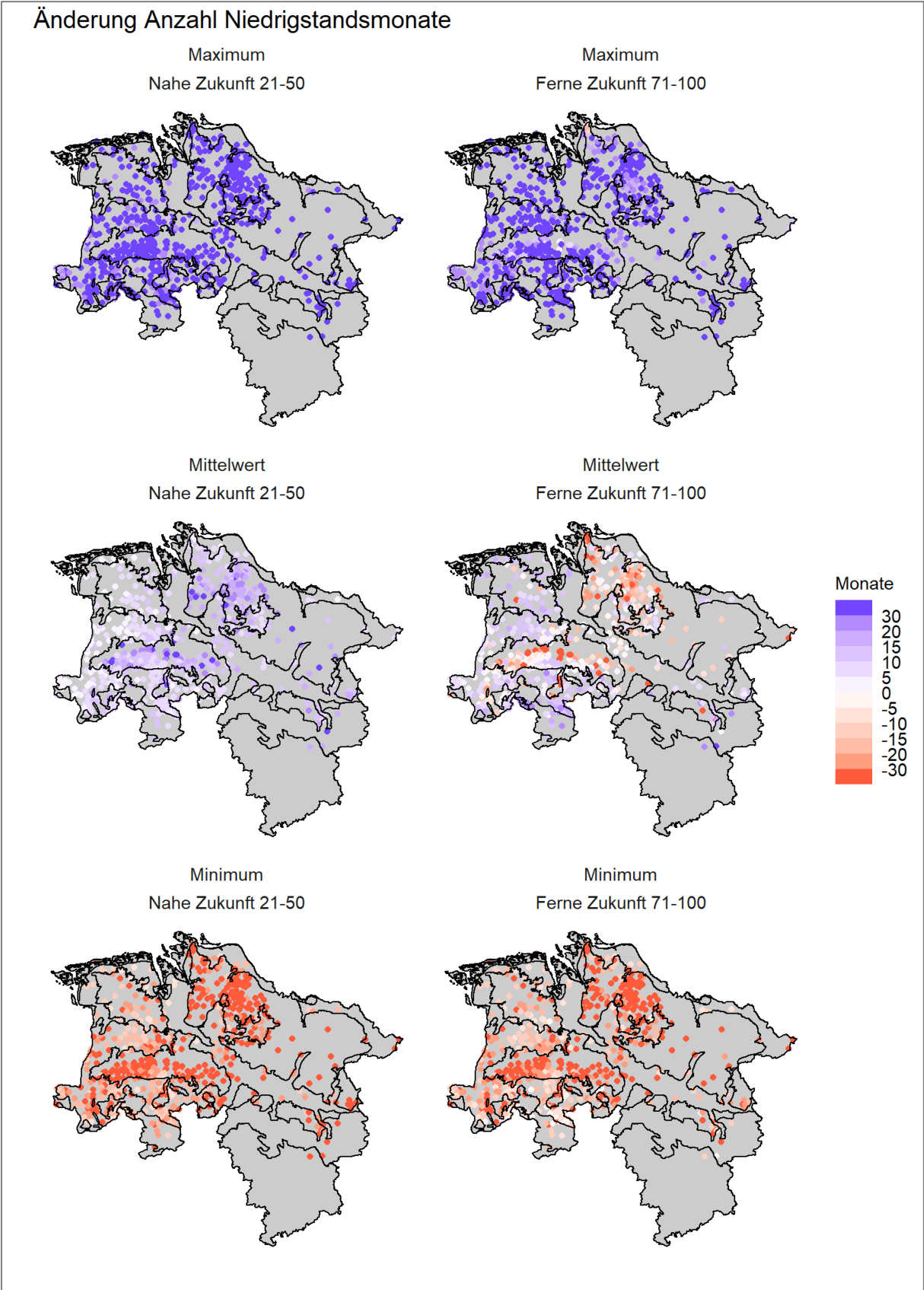


Abbildung 7.20: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der Anzahl der Monate mit Grundwasserniedrigstand gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (im gesamten 30-Jahres-Zeitraum).

### 7.1.7.6 Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand

Die Anzahl der Grundwasserhochstandsmonate bleibt für die nahe Zukunft nahezu unverändert, nimmt jedoch in der fernen Zukunft zu (Abbildung 7.21).

Die Veränderung der Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand zeigt für die nahe Zukunft im Mittel eine Zunahme von 1 - 7 Monaten (+7 Monate in 30 Jahren: ca. 0,2 Monate länger pro Jahr). Die Extreme bewegen sich zwischen einer Abnahme von -43 Monaten und einer Zunahme von +62 Monaten. Die größte Spannweite verzeichnen die Geestgebiete und Börden mit einer maximalen Änderung von ca. 55 bzw. 62 Monaten und einer minimalen Änderung von ca. -39 bis -43 Monaten.

In der fernen Zukunft wird im Mittel eine Zunahme von 20 bis 41 Monaten erreicht (40 Monate über 30 Jahre: ca. 1,3

Monate länger pro Jahr). Die Extreme bewegen sich zwischen einer Abnahme von -23 Monaten und einer Zunahme von +107 Monaten. Die größten Spannweiten liegen hier ebenfalls in den Geestgebieten und Börden mit einer maximalen Änderung von +98 bzw. +81 Monaten und einer minimalen Änderung von ca. -12 bis -23 Monaten. Auch auf den Inseln ergibt sich eine extreme Spannweite möglicher Änderungen von -2 bis + 107 Monaten.

In der Kartendarstellung (Abbildung 7.22) fallen die Geestgebiete und die Küstenregionen als Gebiete mit den stärksten Veränderungen auf. Für die nahe Zukunft und die mittlere Veränderung erfolgt die Zunahme der Anzahl der Niedrigstandsmonate dabei vor allem in den Geestgebieten Nordost-Niedersachsens (Stader Geest, nördl. Lüneburger Geest), während in den übrigen Gebieten keine Änderungen sichtbar werden.

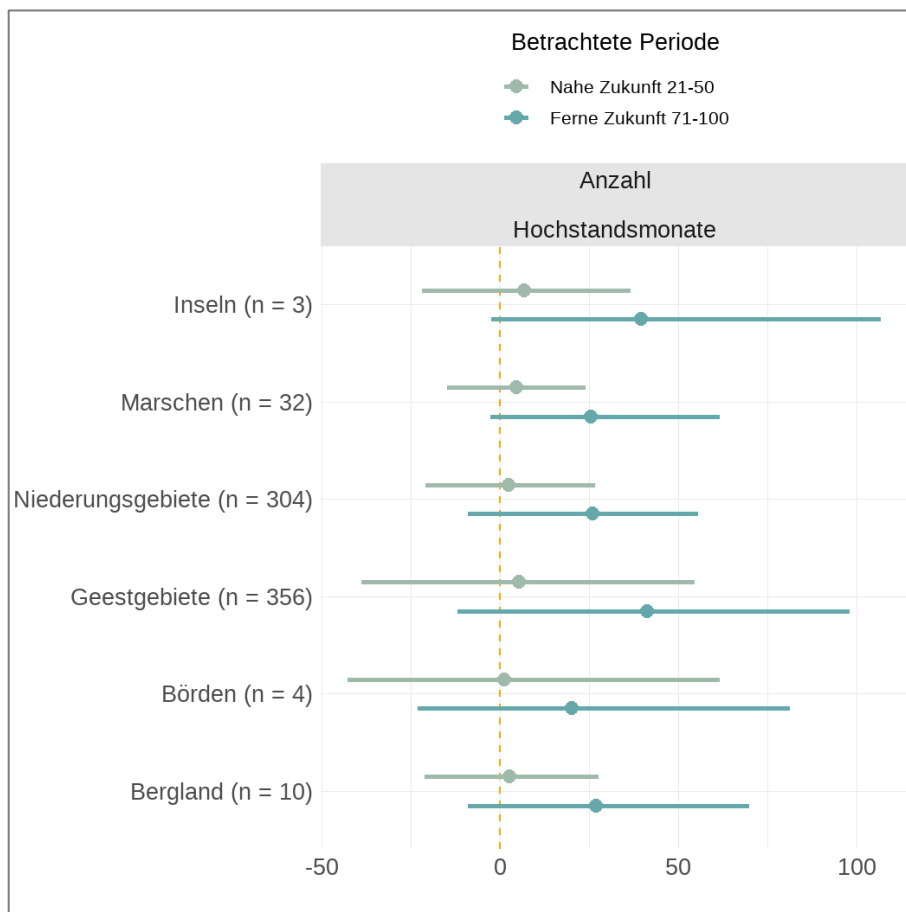


Abbildung 7.21: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung der Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (im gesamten 30-Jahres-Zeitraum).



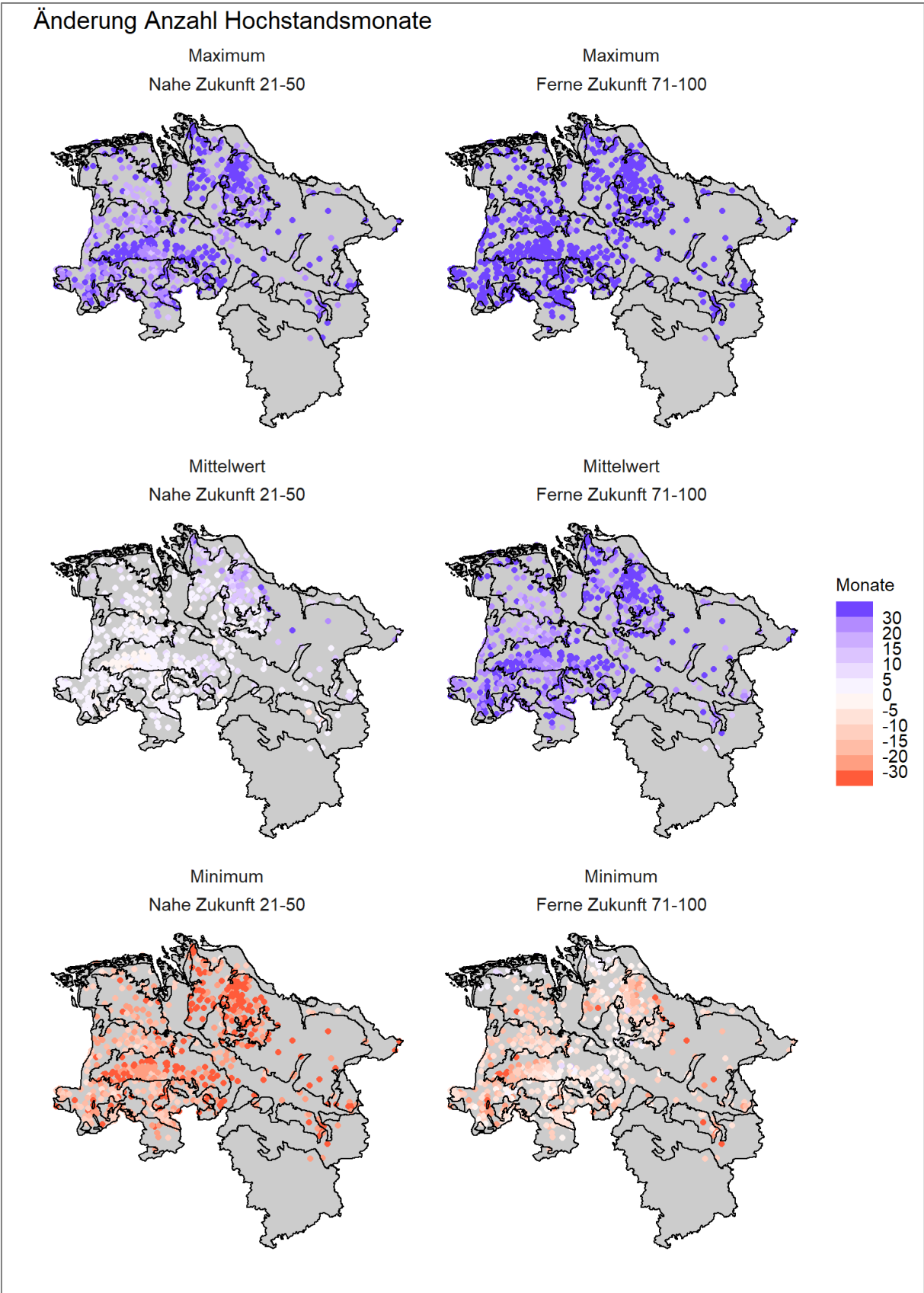


Abbildung 7.22: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (im gesamten 30-Jahres-Zeitraum).

### 7.1.7.7 Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums

Im Mittel zeichnet sich eine geringfügige Verspätung des Jahresminimums ab. Diese Verspätung beträgt ein paar Tage in der nahen Zukunft und nimmt in der fernen Zukunft auf etwa eine Woche zu (Abbildung 7.23).

Der Eintritt des Jahresminimums erfolgt für die mittlere Änderung in der nahen Zukunft ca. 0,1-0,2 Monate (ca. 3-6 Tage) später als im Referenzzeitraum, in der fernen Zukunft etwa 0,25 Monate (ca. 1 Woche) später.

Die Extreme reichen dabei in der nahen Zukunft von einem früheren Eintreten um ca. 0,25-0,5 Monate (ca. 1-2 Wochen, minimale Änderung) bis zu einem späteren

Eintreten um 0,5-0,7 Monate (2-3 Wochen, maximale Änderung). In der fernen Zukunft liegt die Spanne zwischen 0,1 bis 0,5 (ca. <1 bis 2 Wochen) Monate früher und 0,6 bis 0,75 Monate (ca. 3 Wochen) später. Auffällige Unterschiede zwischen den Regionen können nicht abgeleitet werden.

Auch in der Kartendarstellung (Abbildung 7.24) zeigen sich keine regional erkennbaren Unterschiede, Messstellen mit unterschiedlichen Verschiebungen der Eintrittszeitpunkte treten landesweit gleichermaßen auf.

In Kombination mit der geringfügigen Zunahme der Anzahl der Grundwassertiefstandsmonate zeichnet sich hier eine im statistischen Mittel geringfügige Verlängerung der sommerlichen Absinkphase ab.

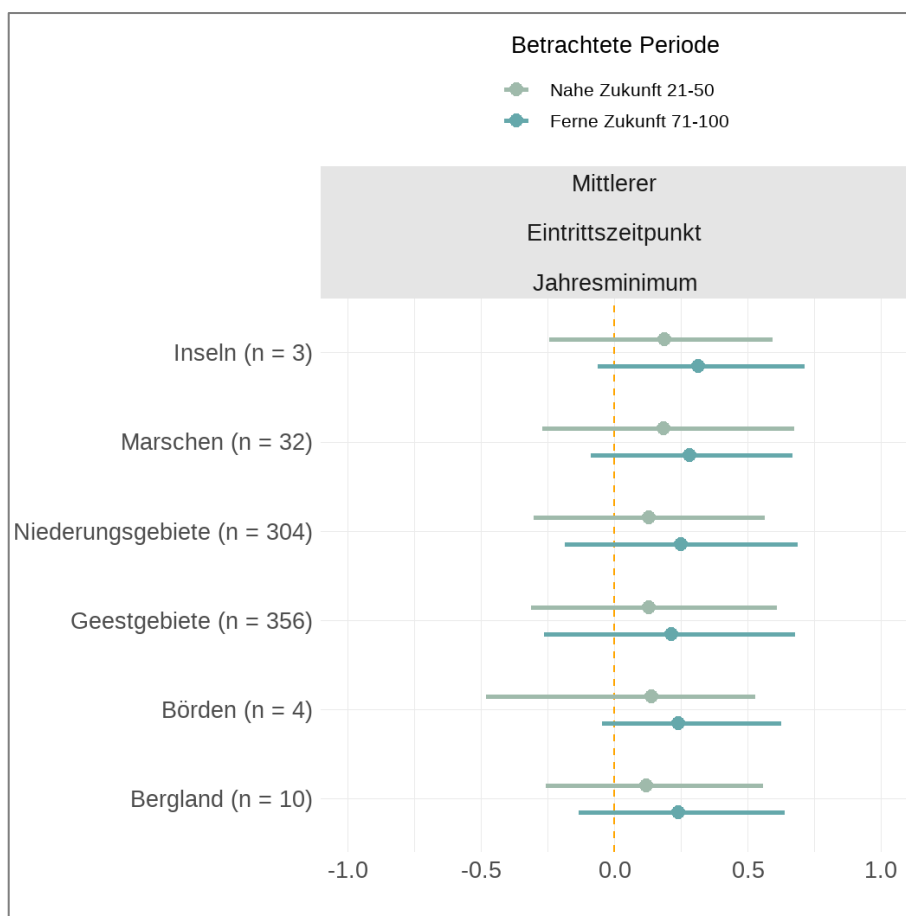


Abbildung 7.23: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung des Eintrittszeitpunktes des Jahresminimums gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (in Monaten; Werte < 0 bedeuten einen früheren Eintrittszeitpunkt, Werte > 0 einen späteren Eintrittszeitpunkt).

## Änderung Eintrittszeitpunkt Jahresminimum

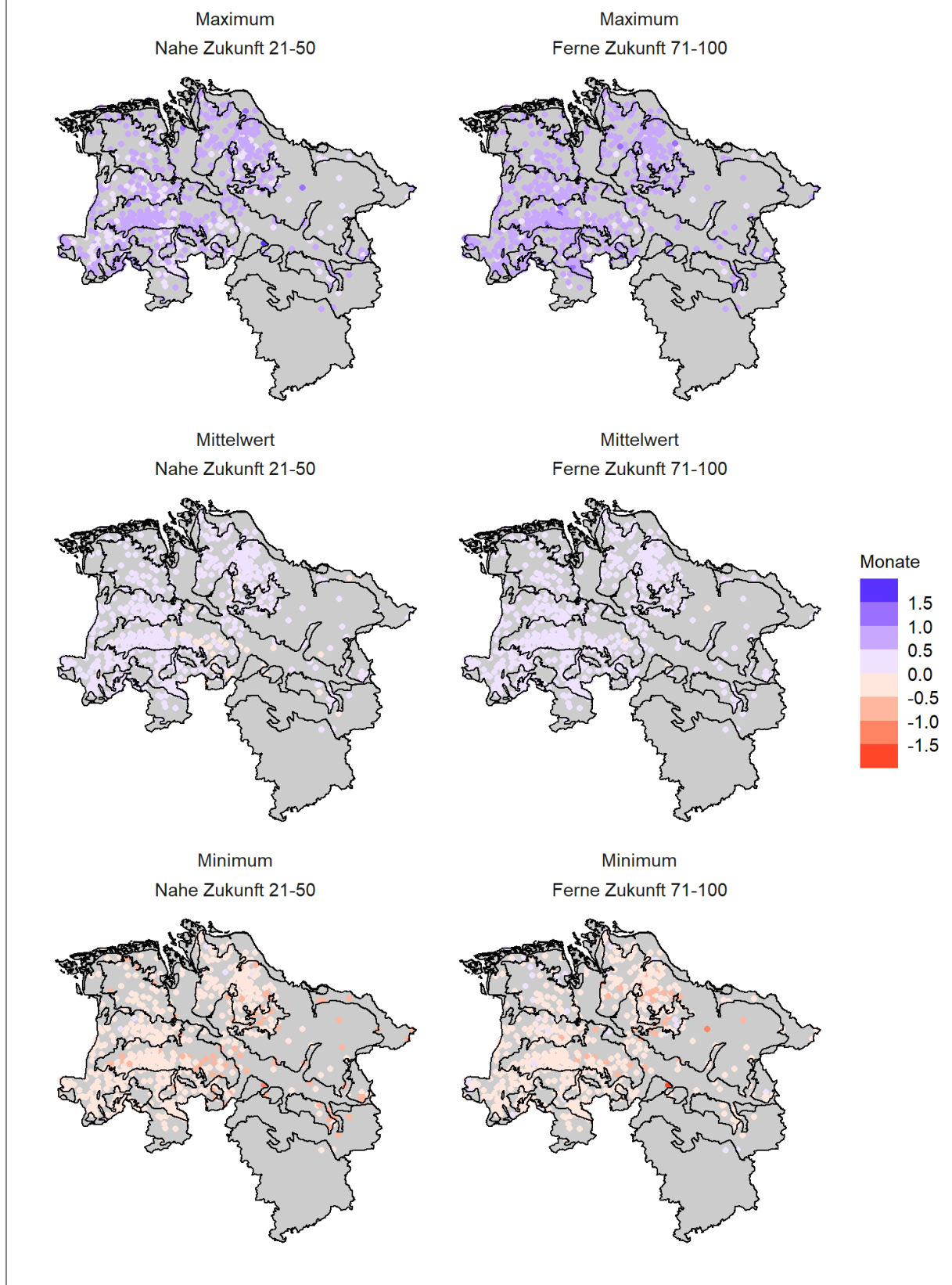


Abbildung 7.24: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des Eintrittszeitpunktes des Jahresminimums gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (Werte < 0 bedeuten einen früheren Eintrittszeitpunkt, Werte > 0 einen späteren Eintrittszeitpunkt).

### 7.1.7.8 Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums

Der Eintritt des Jahresmaximums erfolgt für die mittlere Änderung in der nahen wie auch in der fernen Zukunft 0,1 Monate (ca. < 1 Woche) später als im Referenzzeitraum (Abbildung 7.25).

Die mittleren Änderungen unterscheiden sich für die nahe und ferne Zukunft nur unwesentlich, lediglich in den Börden erfolgt der Eintritt des Jahresmaximums in der fernen Zukunft etwas früher als in der nahen Zukunft und 0,1 Monate (< 1 Woche) früher als im Referenzzeitraum. Angesichts der geringen Messstellenzahl ist das Ergebnis für die Börden jedoch möglicherweise nicht repräsentativ.

Die Spannweite reicht dabei in der nahen Zukunft von 0,2-0,5 Monate früher (ca. 1-2 Wochen, minimale Änderung) bis 0,4-0,5 Monate später (ca. 2 Wochen, maximale Änderung). In der fernen Zukunft liegt die Spanne etwas höher zwischen 0,2 bis 0,9 Monate früher (ca. 1-4 Wochen) und 0,5 bis 0,8 Monate später (ca. 2-4 Wochen).

Die Spannweiten und die Eintrittszeitpunkte zeigen dabei eine regionale Tendenz. Von den Inseln bis zu den Börden/Bergregionen zeigt die minimale Veränderung insgesamt eine Tendenz zu einem früheren Eintritt des

Jahresmaximums, der Eintritt erfolgt dabei in der fernen Zukunft im Bergland und den Börden ca. 0,75 Monate (ca. 4 Wochen) früher, in den Marschen und Inseln nur ca. 0,2 Monate (ca. < 1 Woche) früher. Die maximale Veränderung weist insgesamt auf einen späteren Eintritt des Jahresmaximums hin, dieser erfolgt aber in den Marschen und Inseln 0,8 Monate (ca. 3-4 Wochen) später, in den Börden und im Bergland ca. 0,5- 0,6 Monate (ca. 2-3 Wochen) später. In der nahen Zukunft zeigt sich für die minimale Änderung eine ähnliche, aber schwächer ausgeprägte Tendenz. Für die maximale Änderung sind in der nahen Zukunft keine auffälligen regionalen Unterschiede erkennbar.

In der Kartendarstellung (Abbildung 7.26) lassen sich diese regionalen Unterschiede näherungsweise ebenfalls nachvollziehen. In der nahen Zukunft finden die größten Verzögerungen (maximale Änderung) in den zentralen und nordöstlichen Geestgebieten statt, in der fernen Zukunft kommen auch die nordwestlichen Geestbereiche und Küstenregionen hinzu. Für ein früheres Eintreten (minimale Änderung) lassen sich in der nahen Zukunft keine klaren Schwerpunkte benennen. In der fernen Zukunft fällt das frühere Eintreten im zentralen und südöstlichen Niedersachsen stärker aus als in den nordwestlichen bis nördlichen Landesteilen.

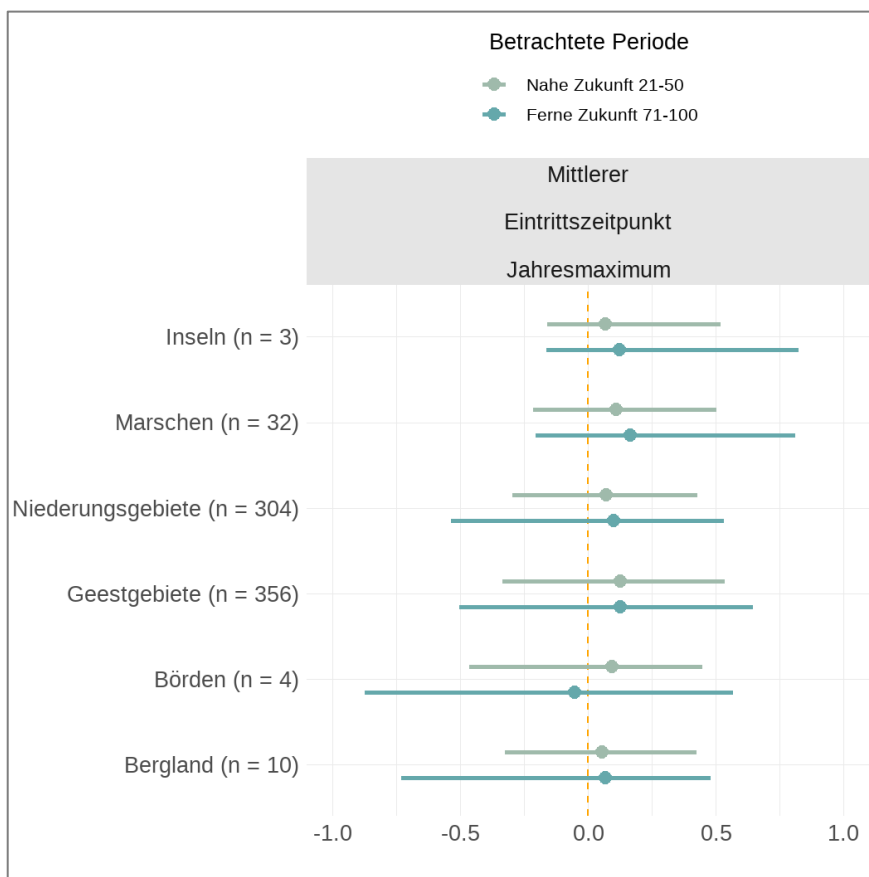


Abbildung 7.25: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Naturregion - Änderung des Eintrittszeitpunktes des Jahresmaximums gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (in Monaten; Werte < 0 bedeuten einen früheren Eintrittszeitpunkt, Werte > 0 einen späteren Eintrittszeitpunkt).

## Änderung Eintrittszeitpunkt Jahresmaximum

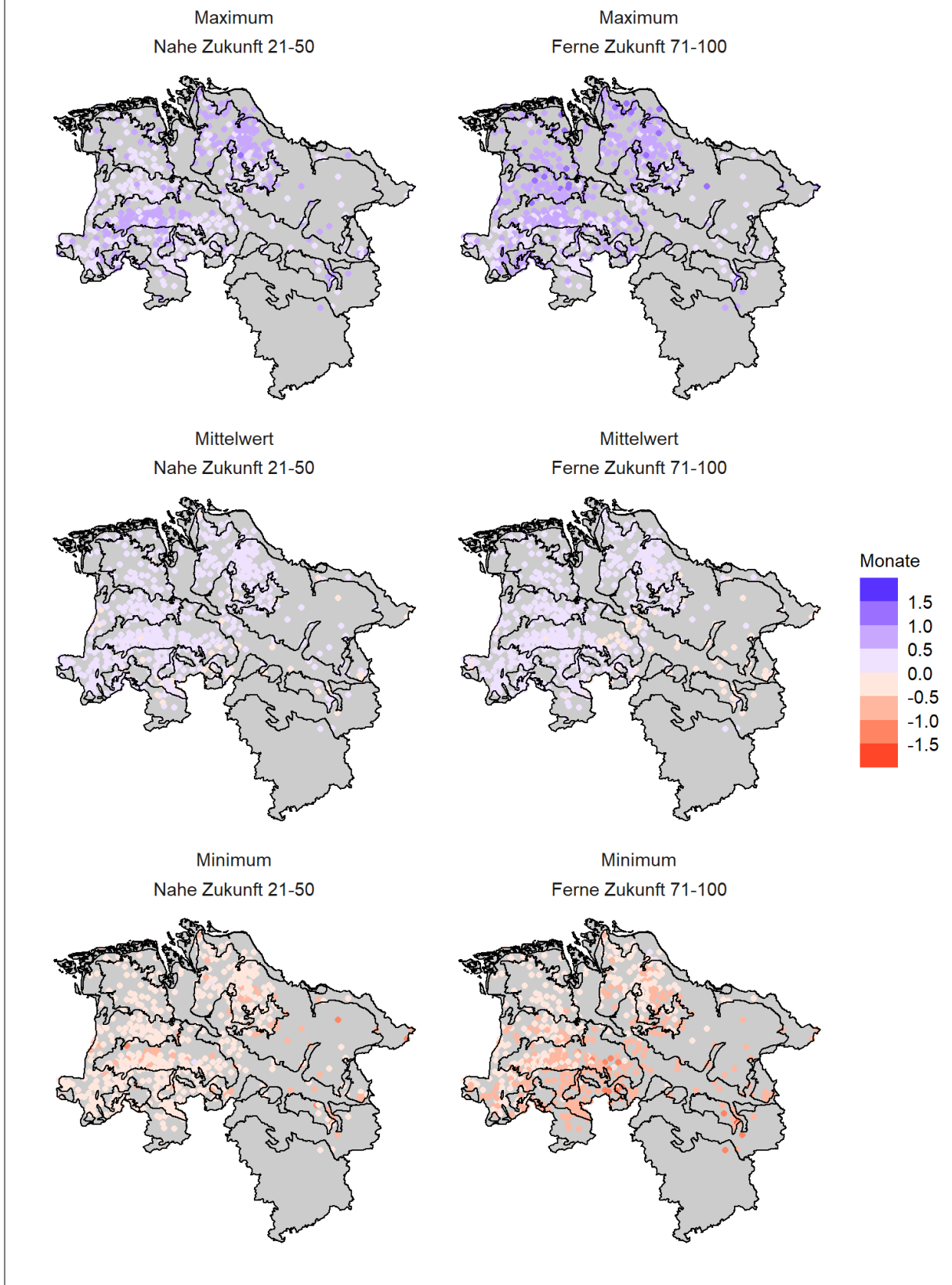


Abbildung 7.26: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des Eintrittszeitpunktes des Jahresmaximums gegenüber der Referenzperiode 1981-2010 (Werte < 0 bedeuten einen früheren Eintrittszeitpunkt, Werte > 0 einen späteren Eintrittszeitpunkt).

#### 7.1.7.9 Jahresganglinienvergleich

Aus den mittleren Monatswerten der einzelnen Messstellen ergibt sich für jede Region eine regionale durchschnittliche Jahresganglinie. Analog zu den vorigen Auswertungen wurde für jede Messstelle eine mittlere, minimale und maximale Ganglinie aus den einzelnen Klimaprojektionen abgeleitet und dann für jede Region über alle Messstellen gemittelt (Abbildung 7.27).

Der regionale Jahresgang (als der Mittelwert über alle Messstellen) zeigt im Mittel über die Klimaprojektionen einen Anstieg der Grundwasserstände gegenüber dem Referenzzeitraum, der mit Größenordnungen unter 0,2 Metern als geringfügig einzustufen ist. Diese Abweichung betrifft vor allem die Winterstände, während die Sommerstände weitgehend unverändert bleiben. Im Bergland finden sich die höchsten Amplituden der Grundwasserstände und auch die höchsten Zunahmen. In den übrigen Regionen fallen die Veränderungen deutlich kleiner aus.

In der nahen Zukunft ergeben sich für den mittleren Jahresgang keine erkennbaren Unterschiede zum mittleren Jahresgang des Referenzzeitraumes. Größere Abweichungen werden erst in der fernen Zukunft deutlich. Hier kommt es zu einer Erhöhung der Grundwasserstände im Winter und insbesondere des Jahreshochstands. Die Jahrestiefstände bleiben dagegen unverändert oder

unterliegen nur geringen Änderungen. Die maximale Abweichung des mittleren Jahreshochstands liegt bei ca. < 0,2 m in den Geestgebieten.

Der maximale Jahresgang aus den einzelnen Projektionen zeigt einen deutlichen Anstieg der Grundwasserstände gegenüber dem Referenzzeitraum, der minimale Jahresgang eine geringfügige Absenkung. Die Spannweiten der Änderungen (Max-Min) nehmen in der Reihenfolge Bergland-Geestgebiete-Börden-Niederungsgebiete-Inseln-Marschen von ca. 0,75 m auf 0,2 m ab. In dieser Reihenfolge nimmt auch die durchschnittliche Amplitude der Ganglinien von ca. 2 m (Bergland) auf <0,1 m (Marschen) ab. Bereits in den Börden und Marschen beträgt die Amplitude nur noch ca. 0,5 m. Die absoluten Veränderungen stehen damit auch in Relation zur regionalen Schwankungsdynamik der Grundwasserstände. Vor dem Hintergrund der Schwankungsdynamik im Referenzzeitraum sind die Änderungen auch hier als geringfügig einzustufen.

Die in den regionalen Jahresganglinien erkennbaren Veränderungen entsprechen inhaltlich den oben dargestellten Änderungen der Kernindikatoren. Lediglich die zeitlichen Verschiebungen werden hier nicht deutlich, allerdings kann bei der Darstellung von durchschnittlichen (über 30 Jahre gemittelten) Monatswerten eine Verschiebung von weniger als einem Monat auch nicht mehr aufgelöst werden.

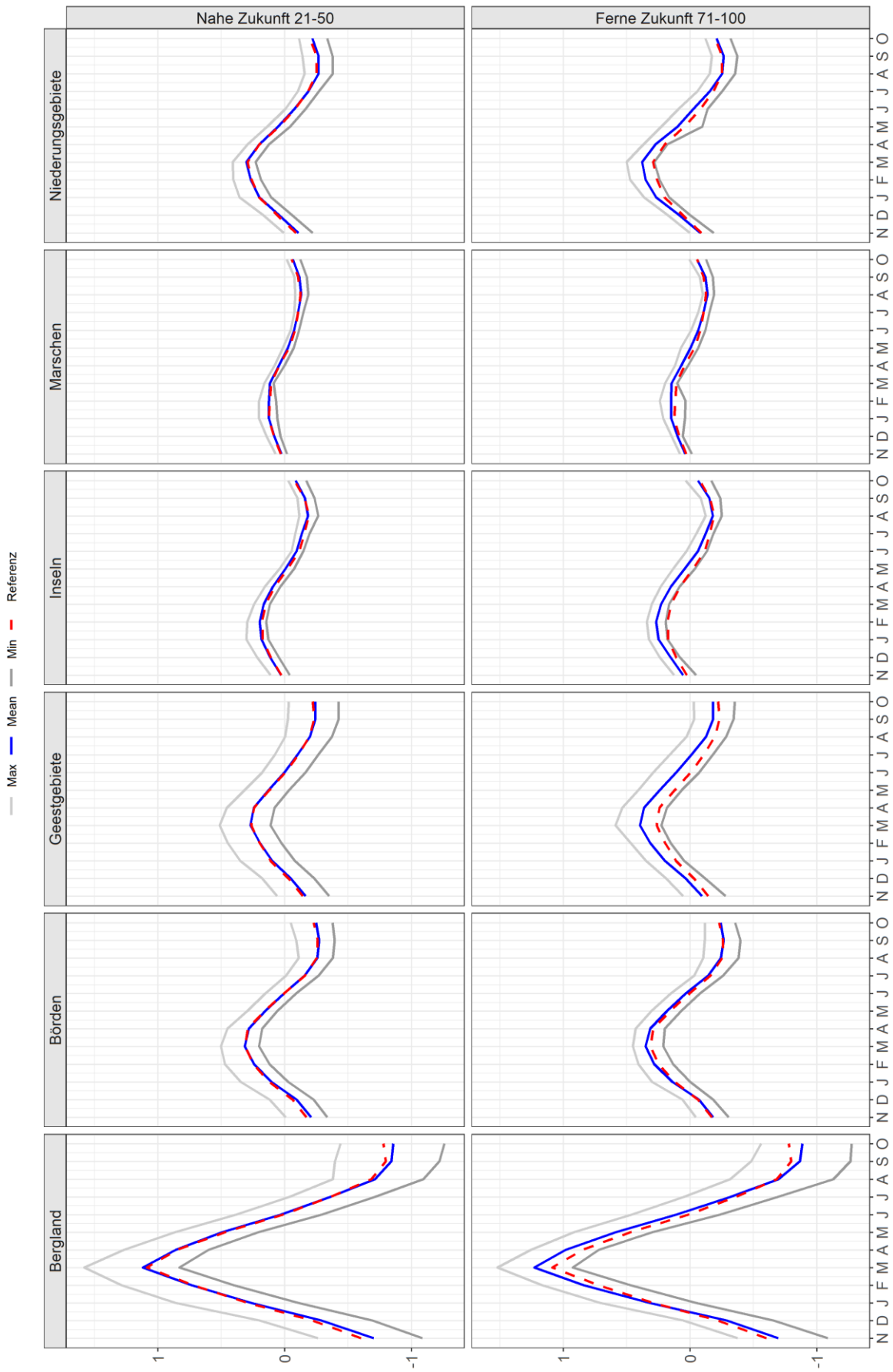


Abbildung 7.27: Durchschnittlicher Jahresgang der Grundwasserstände für die ausgewerteten Zeithorizonte und Regionen (Referenzperiode 1981-2010).

### 7.1.8 Zusammenfassung und Fazit Teilprojekt A

Zusammenfassend sind nach den Ergebnissen im Teilprojekt A Veränderungen der Grundwasserstände als direkte Folge der Änderung klimatischer Eingangsdaten nach den Ergebnissen der Modellauswertungen zwar zu erwarten, diese bleiben aber in Bezug auf die mittleren Veränderungen gering.

Betrachtet man die mittleren Änderungsraten, so bleiben die mittleren Jahrestiefstände in Niedersachsen weitgehend unverändert, während die mittleren Jahreshochstände und damit auch die mittleren Jahresamplituden ansteigen. Dabei nehmen die Änderungen von der nahen zur fernen Zukunft zu. Die Änderungsbeträge sind aber mit  $< 0,25$  m als gering einzustufen.

Die Anzahl der Monate mit einem Grundwasserniedrigstand zeigt mit Ausnahme der Geestgebiete keine nennenswerten Unterschiede zwischen naher und ferner Zukunft, aber eine leichte Zunahme gegenüber dem Referenzzeitraum. Regional liegen die Änderungen zwischen 8 Monaten weniger (Geest, ferne Zukunft) und 19 Monaten mehr (Börden) über den jeweiligen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren.

Die Anzahl der Monate mit einem Grundwasserhochstand bleibt in der nahen Zukunft annähernd gleich und nimmt für den 30-jährigen Betrachtungszeitraum im Landesmittel lediglich um 4 Monate zu. In der fernen Zukunft erfolgt eine Zunahme um 33 Monate.

Der Eintritt des Jahresmaximums verschiebt sich geringfügig nach hinten, die Änderung ist aber mit 0,1 Monaten (ca. 3 Tage) im Landesdurchschnitt als unbedeutend einzustufen.

Der Eintritt des Jahresminimums verspätet sich im Durchschnitt zwischen 0,1 und 0,2 Monaten (um wenige Tage bis ca. eine Woche).

In ihrer Gesamtheit spiegeln die mittleren Entwicklungstendenzen einen Anstieg der Winterniederschläge und damit verbundene höhere Grundwassermaxima wieder, die Änderungsbeträge fallen jedoch gering aus.

Die nachstehende Abbildung 7.28 fasst die im vorigen Abschnitt einzeln dargestellten Ergebnisse der Kernindikatoren im Überblick zusammen. Analog gibt Abbildung 7.29 eine Zusammenfassung der sonstigen Indikatoren, die grundsätzlich die Aussagen der Kernindikatoren weiter untermauern.

Die Entwicklung der Grundwasserstände schreibt die in den Klimaprojektionen ausgedrückte Entwicklung der Niederschläge konsequent und folgerichtig fort. Widersprüche zu der Niederschlagsentwicklung bestehen nicht. Auch die Spanne zwischen den einzelnen Projektionen

von steigenden bis sinkenden Grundwasserständen entspricht grundsätzlich der in den Klimadaten ausgedrückten Unterschiede der Projektionen.

Unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität der Witterungsverhältnisse und damit auch der Grundwasserstandsdynamik, den Messunsicherheiten bei der Erfassung von Standsdaten und den Unsicherheiten in den verwendeten Impaktmodellen ist nicht sicher, ob die hier projizierten Änderungen groß genug ausfallen, um in den empirischen Grundwasserstandsmessungen als Änderung bzw. als statistisch signifikante Änderung erkannt zu werden. Auch geht aus den über 30-Jahres-Zeiträume gemittelten Zuständen nicht hervor, ob die im Mittel festgestellten Änderungsbeträge das Resultat allgemeiner Verschiebungen sind oder lediglich auf wenige Extremjahre mit besonders trockenen bzw. feuchten Verhältnissen zurückzuführen sind. Hier sind weitergehende Analysen erforderlich.

Für die maximalen Änderungen der Grundwasserstände (obere bzw. untere Bandbreite der Klimaprojektionen) zeichnet sich dagegen ab, dass durchaus bedeutende Änderungsbeträge erreicht werden, die möglicherweise auch signifikante Auswirkungen auf die Umwelt haben können. Dabei können die Änderungen in der oberen Bandbreite im positiven Wertebereich liegen (steigende Grundwasserstände), während die der unteren Bandbreite im negativen Bereich angesiedelt sind (fallende Grundwasserstände). Insofern kann für die Zukunft für bestimmte Kenngrößen bzw. Regionen nicht immer eine eindeutige Entwicklungstendenz abgeleitet werden.

Regional zeichnen sich nur teilweise deutliche Entwicklungstendenzen ab. Geestgebiete, Börden und Bergregionen zeigen stärkere Änderungen und auch größere Spannweiten als die Niederungsgebiete, Inseln und Marschen. Lediglich die Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand sowie der Eintrittszeitpunkte des Jahresminimums weisen keine klaren regionalen Unterschiede auf.

Neben geologischen Unterschieden in den einzelnen Regionen (z.B. geringe Flurabstände in Inseln, Marschen, Niederungsgebieten vs. hohe Flurabstände in Geestgebieten, Börden) kann auch der klimatische Gradient innerhalb Niedersachsens von Nordwest nach Südost mit dem Übergang vom maritim zum kontinental geprägten Klima Einfluss auf die Veränderungen nehmen.

Die Aussagen basieren auf einer sehr unterschiedlichen Messstellenanzahl. Die Geestgebiete und die Niederungsgebiete sind mit 356 bzw. 304 Messstellen sehr gut abgedeckt, wobei die östlichen und südöstlichen Landesteile deutlich unterrepräsentiert sind. Die Marschen weisen immerhin noch 32 Messstellen auf, die übrigen Regionen jedoch nur 10 oder weniger Messstellen. Insofern werden die Ergebnisse auf den Inseln, in den Börden und im



Bergland durch wenige Messstellen bestimmt, eine Verallgemeinerung der Aussagen ist daher nicht möglich. Denkbar wäre hier, unter Einbeziehung der Messstellen mit kurzen Messreihen (< 20 Jahre) repräsentative Messstellen für einzelne Regionen zu definieren und die zukünftige Entwicklung an repräsentativen Messstellen abzuschätzen. Dabei wäre jedoch auch eine Berücksichtigung unterschiedlicher Ganglinientypen erforderlich.

Jede Klimaprojektion entspricht eine Zeitreihe einer möglichen zukünftigen Witterungsdynamik, die im langjährigen Mittel die prognostizierte Klimaänderung abbildet. Grundsätzlich kann in jeder Projektion die gleiche klimatische Entwicklung (als langjähriges Mittel) mit einer unterschiedlichen Witterungsdynamik beschrieben werden. Die Grundwasserstandsentwicklung kann auch durch die Abfolge trockener und feuchter Witterungsverhältnisse mit beeinflusst werden. In weiteren Untersuchungen wären auch der Einfluss unterschiedlicher Witterungsdynamiken (bei gleichem Klimaänderungssignal) auf die Grundwasserstandsdynamik zu untersuchen. Auch die Einflüsse von Extremereignissen wurden hier nicht berücksichtigt. So haben die Dürrejahre 2018 und 2019 in Niedersachsen zu einer markanten Grundwasserstandsabsenkung geführt. In der Folge konnten sich die Grundwasserstände bei weiterhin angespannten Witterungsverhältnissen an vielen Standorten bislang nicht wieder erholen (NLWKN, 2022). Auch in der Zukunft können Extremjahre (Dürrejahre und Feuchtjahre) längerfristige Auswirkungen auf die Grundwasserstandsdynamik haben. Auch hier ist ein weiterer Erkenntnisgewinn erforderlich.

# Änderung der Kernindikatoren - Teilprojekt A

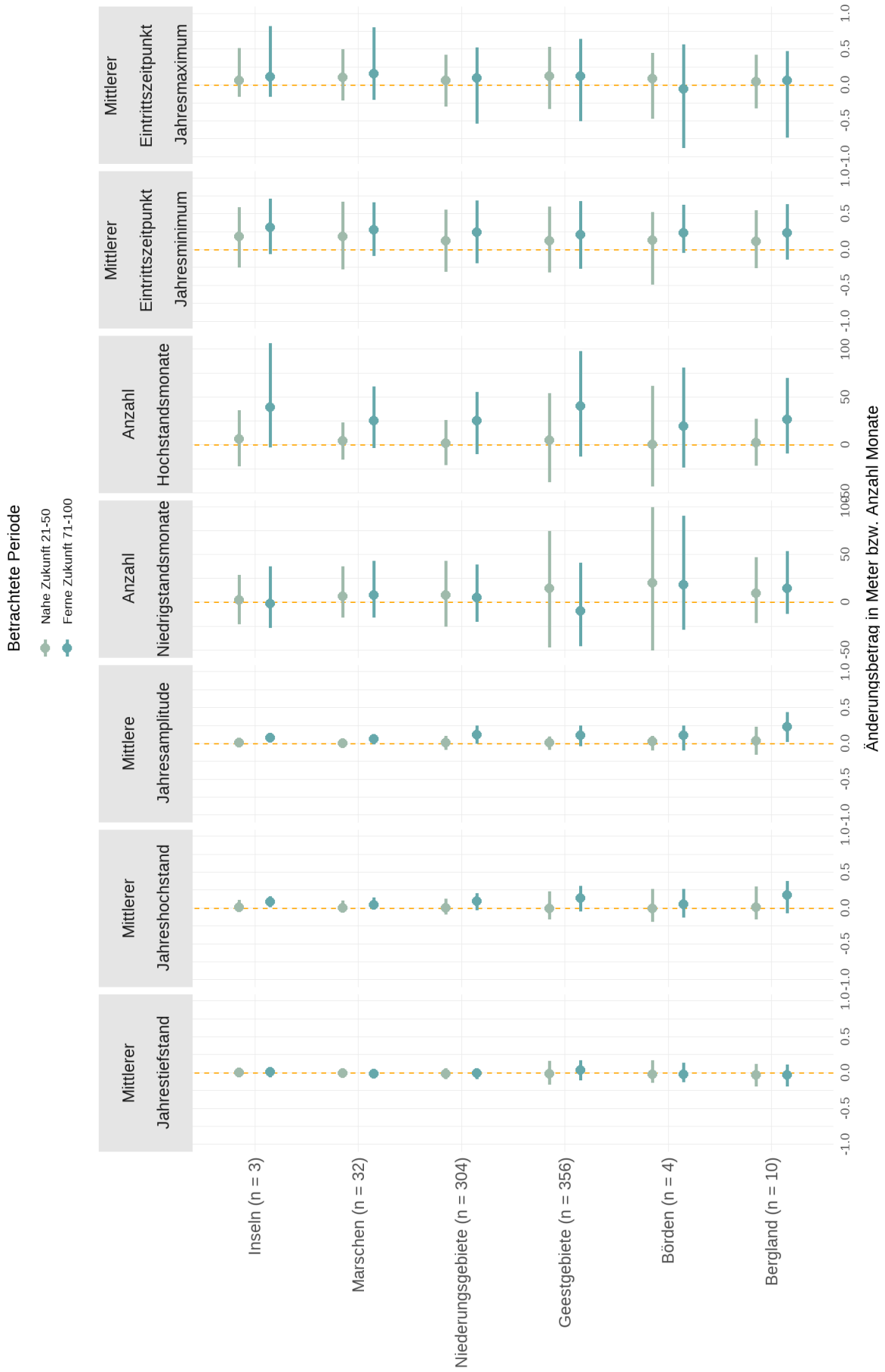


Abbildung 7.28: Änderung der Grundwasserstandsdynamik (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) im Teilprojekt A - Kernindikatoren.

### Änderung der sonstigen Indikatoren - Teilprojekt A

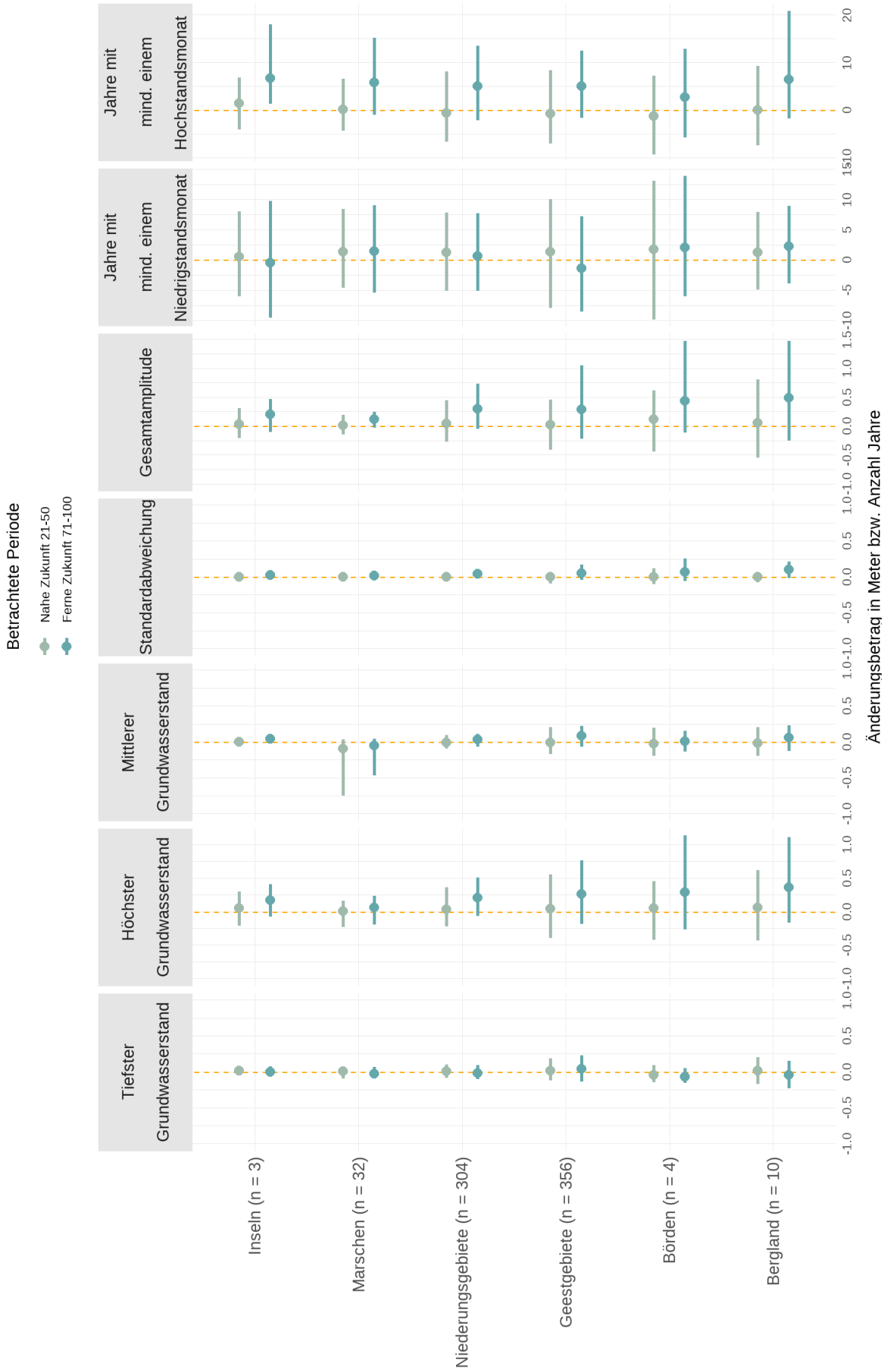


Abbildung 7.29: Änderung der Grundwasserstandsdynamik (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) im Teilprojekt A - Sonstige Indikatoren.

## 7.2 Modellierung veränderter zukünftiger Grundwasserstandsveränderungen auf Basis statistischer Ansätze (Teilprojekt B)

Für die Einschätzung zukünftiger Grundwasserstände unter Einfluss des Klimawandels wird eine direkte Verbindung zwischen klimatischen Einflüssen und Grundwasserständen angenommen. Voraussetzung sind dabei anthropogen unbeeinflusste Zustände. Mit Hilfe multipler linearer Regression können monatliche Grundwasserstände auf Basis meteorologischer Indizes geschätzt werden, sodass Richtung und Stärke möglicher Änderungen abgeleitet werden können. Dazu wurden zeitliche Stationsmodelle für Messstellen mit langjähriger Beobachtung angepasst. Zukünftige Grundwasserstände wurden mittels meteorologischer Indizes geschätzt, welche aus Klimamodelldaten abgeleitet wurden.

### 7.2.1 Modellbeschreibung

Für den Modellaufbau liegen Beobachtungsdaten der Grundwasserstände für 962 Stationen in Niedersachsen als Monatsmittelwerte vor. Die Zeitreihen der verfügbaren Stationen umfassen unterschiedlich lange Zeiträume (maximal 1950 bis 2021) und sind teilweise durch Fehlwerte unterbrochen. Für die Kalibrierung wurden interpolierte Klimabeobachtungsdaten (Haberlandt et. al. 2015) genutzt, welche für die jeweiligen Grundwassermessstellen extrahiert und zu monatlichen Mittelwerten aggregiert wurden. Zusätzlich wurde die Grundwasserneubildung (Ertl et. al. 2019) als Parameter mit aufgenommen. Für die Schätzung zukünftiger Verhältnisse wurde ein Ensemble von acht Klimamodellprojektionen auf Basis eines ausgewählten Klimaszenarios herangezogen (siehe Kapitel 5.2).

Für die Modellanpassung werden zeitgleiche Zeitreihen von Grundwasserständen und Klimadaten benötigt. Für die Bewertung der Modellleistung werden zusätzlich lange Zeitreihen zur Aufteilung für eine Split-Validierung ausgewählt. Dazu wurde eine Auswahl langer Zeitreihen getroffen, die den Zeitraum 1960 bis 2010 mit einem Fehlwertanteil von  $\leq 5\%$  abdecken (Fehlwertanteil maximal 30 Monate). 114 Grundwasserstationen weisen eine ausreichende Zeitreihenlänge für die Kalibrierung und Validierung der statistischen Modelle auf. Simuliert wurden 734 Stationen mit ausreichender Zeitreihenlänge im Kalibrierungszeitraum (siehe Kapitel 7.2.3). Die Lage aller Stationen sowie der ausgewählten Stationen ist in Abbildung 7.30 dargestellt. Bei der Betrachtung der Auswahl wird die räumlich ungleichmäßige Verteilung der Grundwasserstationen mit großen Lücken im Süden durch zusätzliche Lücken im Norden noch verstärkt.

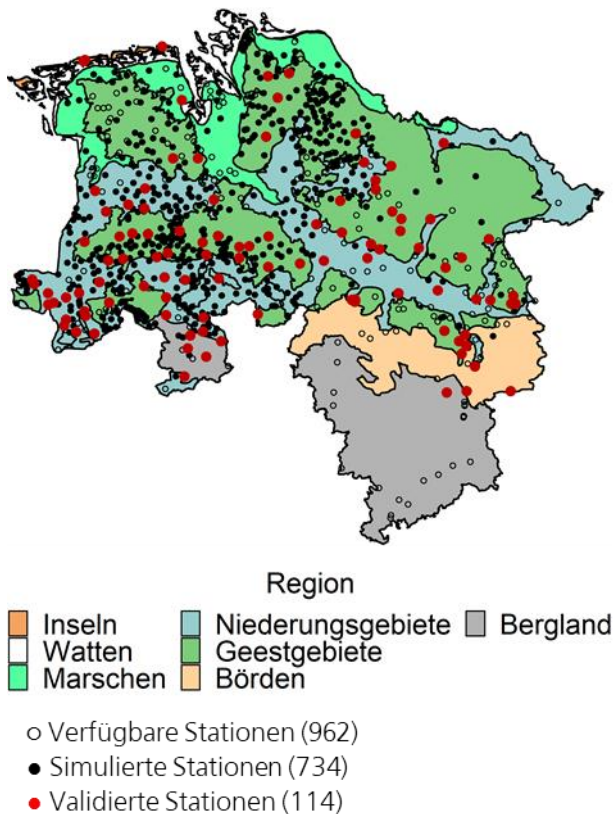


Abbildung 7.30: Übersicht über verfügbare Stationen

Aus den Beobachtungs- und Klimamodelldaten der Tageszeitreihen des Niederschlags, der mittleren, minimalen und maximalen Lufttemperatur, Globalstrahlung sowie der relativen Feuchtigkeit wurden monatliche meteorologische Indizes berechnet, welche in Tabelle 7.4 näher beschrieben werden. Zur Berücksichtigung der Persistenz der meteorologischen Indizes wurden zusätzlich gleitende Mittelwerte (über 1, 6 und 12 Monate) sowie Zeitverzögerungen (um 1, 13, 25, 37 Monate) mit einbezogen. Eine Übersicht zur Berechnung ist in Abbildung 7.31 dargestellt.

Tabelle 7.4: Liste der verwendeten Indizes

Index	Einheit	Beschreibung
ETP	mm/d	Durchschnittliche potentielle Evapotranspiration (nach Turc-Wendling)
Glo	W/m <sup>2</sup>	Globalstrahlung
GWN	mm/d	Grundwasserneubildung
Hum	%	Relative Luftfeuchtigkeit
HWD	d	Dauer der Hitzewelle: Anzahl der Tage, an denen das 90-Prozent-Quantil der Höchsttemperatur nicht überschritten wurde
Pav	mm/d	Durchschnittlicher Niederschlag
P-ETP	mm/d	Mittlere klimatische Wasserbilanz
SPEI	-	Standardisierter Niederschlags-Verdunstungs-Index: standardisierte Abweichung der aggregierten klimatischen Wasserbilanz vom langjährigen Normalwert (Vicente-Serrano et al., 2010)
SPI	-	Standardisierter Niederschlagsindex: standardisierte Abweichung der aggregierten Niederschlagssummen vom langjährigen Normalwert (McKee et al., 1993)
Tmin,av,max	°C	Minimale, mittlere und maximale Tagestemperatur

Index	Jahr-4	Jahr-3	Jahr-2	Jahr-1	Jahr
<b>GWL</b>	7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7
MI 1.0	7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7
MI 6.0	7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7
MI 6.1	7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7
MI 6.13	7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7
MI 6.25	7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7
MI 6.37	7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7
MI 12.0	7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7
MI 12.1	7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7
MI 12.13	7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7
MI 12.25	7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7
MI 12.37	7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7

Abbildung 7.31: Schema zur Berechnung monatlicher Grundwasserstands- (GWL) und Indexzeitreihen (MI) unter Berücksichtigung gleitender Mittelwerte (Periodenbreite x Monate) und Zeitverzögerung (y Monate). Eine Verschiebung um null Monate bedeutet, dass der Zeitraum gleichzeitig mit dem Monat der betrachteten Variablen endet.

Für die stationsweise Modellanpassung wurde die Zeitreihe der jeweiligen Station in einen Kalibrierungszeitraum (1991 bis 2020) und einen Validierungszeitraum (1960 bis 1990) unterteilt. Der Kalibrierungszeitraum wurde für einen Zeitraum nach der Validierung gewählt, da der Fehlwertanteil für die nahe Vergangenheit geringer ist und daher eine bessere Modellanpassung erwartet wird.

Auf der Grundlage des Kalibrierungszeitraums wurden multiple lineare Regressionsmodelle erstellt. Der Validierungszeitraum wurde nur für die Bewertung der Modellleistung verwendet (Split-Validierung).

Die multiple lineare Regression ist ein statistisches Modell zur Erklärung einer beobachteten abhängigen Variablen als lineare Kombination mehrerer unabhängiger Variablen. Die allgemeine Form eines multiplen linearen Regressionsmodells lautet:

$$y = x_1\beta_1 + \dots + x_k\beta_k + \varepsilon$$

Dabei ist y die abhängige Variable, x die unabhängigen Variablen,  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$  sind Regressionsparameter und  $\varepsilon$  ein Fehlerterm.

Die bekannteste Methode zur Schätzung der Regressionsparameter ist die Ordinary Least Squares (OLS), bei der die Summe der quadrierten Abweichung zwischen der Schätzung und der Beobachtung minimiert wird.

Als unabhängige Variablen werden die zuvor genannten Indizes in das Regressionsmodell aufgenommen. Um die Zahl der ausgewählten Regressoren zu begrenzen, werden geeignete Indizes nach dem zweiseitigen BIC-Minimierungsverfahren (Bayessches Informations-Kriterium) ausgewählt (Schwarz 1978). Dazu werden alle Variablen einzeln in das Modell aufgenommen. Die Variable mit der stärksten BIC-Minimierung (= dem größten Informationsgewinn) wird dem Modell als Regressor hinzugefügt. Vor Bestimmung

eines weiteren Regressors werden zusätzlich bereits vorhandene Regressoren entfernt, wenn somit das BIC weiter reduziert werden kann.

Um Multikollinearität (Korrelation der Regressoren untereinander) zu vermeiden, wird in jedem Iterationsschritt der Regressor mit dem höchsten Varianzinflationsfaktor (VIF) mit einem Toleranzwert von 5 entfernt. Der VIF ist ein Maß dafür, wie viel der Varianz eines Regressors durch die anderen Regressoren erklärt werden kann.

Um die Leistung der Regressionsmodelle einzuordnen, wurden zwei Referenzmodelle als Maßstab für die Prognose der zukünftigen Grundwasserstände verwendet. Das erste Referenzmodell wird unter der Annahme eines stationären Mittelwerts erstellt. Dazu wird der Mittelwert des Kalibrierungszeitraums für den Validierungszeitraum konstant angenommen. Für das zweite Referenzmodell wird ein linearer Trend nach Theil-Sen (Theil 1950 a-c, Sen 1968) für den Kalibrierungszeitraum in den Validierungszeitraum (Vergangenheit) extrapoliert. Dabei handelt es sich um eine nicht-parametrische Schätzung eines linearen Trends mit der Steigung  $b$  als Median der Steigungen aller Linien durch alle möglichen Punktpaare:

$$b = \text{median} \left( \frac{y_i - y_j}{t_i - t_j} \right) \text{ mit } t_i < t_j$$

Um die Modellleistungen aller Prognosemodelle zu bewerten, werden die beobachteten Werte mit den geschätzten Werten verglichen. Dazu werden die Fehler, d. h. die Abweichung der geschätzten Werte von beobachteten Werten, berechnet. Um die unterschiedlichen Größenordnungen der Grundwasserstände zu

berücksichtigen wurden Bias und RMSE zusätzlich mittels Standardabweichung normalisiert (NBias und NRMSE).

### 7.2.2 Kalibrierung und Validierung

Die Modellleistungen der Multiplen linearen Regressionen der 114 Stationen werden mit denen der zwei Referenzmodelle verglichen. Die Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse sind in Abbildung 7.32 dargestellt.

Die Regressionsmodelle erzielen für die Kalibrierung einen RMSE von 0,14 m und einen NRMSE von 33,51 % im Vergleich zu 0,4 m bzw. 99 % für die Referenzmodelle (Werte als Median). Es wird deutlich, dass die Einbeziehung externer Variablen zu besseren Simulationsergebnissen führt.

Für die Validierung der Regressionsmodelle werden für den NBias und den NRMSE Werte von - 16,52 % und 59,57 % erzielt (Median). Für alle Modelle sind die Gütekriterien im Kalibrierungszeitraum wesentlich besser als im Validierungszeitraum. Es kommt scheinbar zur Überanpassung der Modelle in der Kalibrierung. Dazu tragen unter Umständen (anthropogen bedingte) veränderte Randbedingungen in den 70er und 80er Jahren bei (siehe Kapitel 2.4).

Abbildung 7.33 zeigt, dass basierend auf dem NSE kein regionales Muster der Modellleistung zu erkennen ist. Somit kann ausgeschlossen werden, dass nur einzelne Regionen eine schlechtere Modellleistung aufweisen.

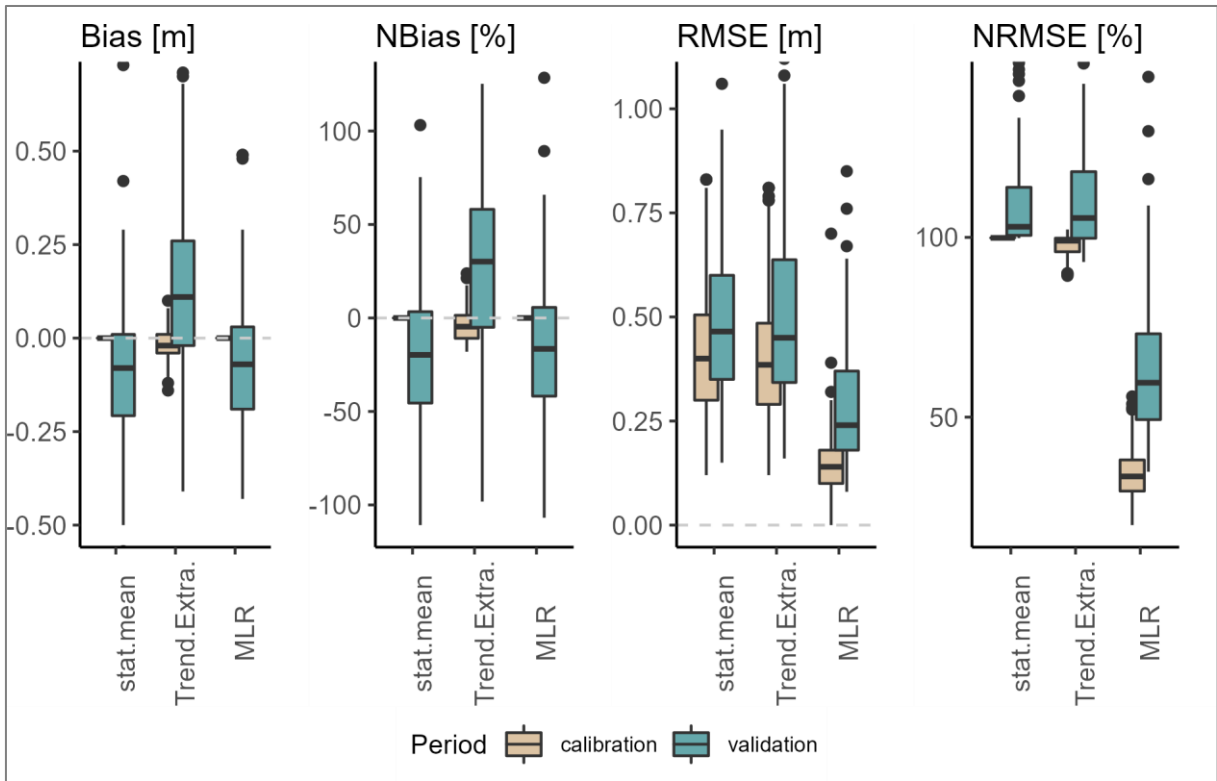


Abbildung 7.32: Kalibrierungs- (orange) und Validierungsergebnisse (blau) der Regressions- und Referenzmodelle von 114 Stationen in Form des Bias und RMSE der mittleren Grundwasserstände, sowie normalisiert mit der Standardabweichung; Zur besseren Darstellung wurden extreme Ausreißer ausgeblendet (entsprechen < 5 % der Stationen).

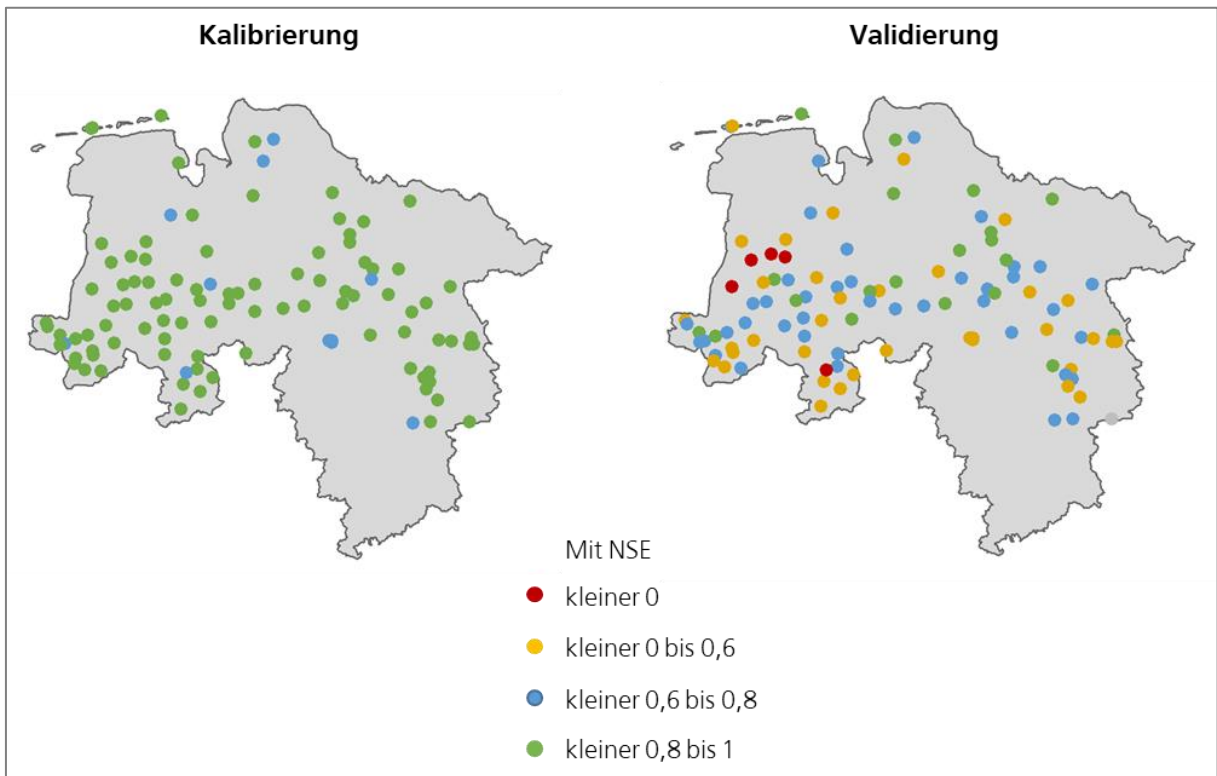


Abbildung 7.33: Kartendarstellung der Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse basierend auf dem NSE

Da stationsweise Modelle aufgestellt wurden, werden in Abbildung 7.34 nur beispielhaft die Modellgleichung und die Simulationsergebnisse für Station Räderloh II dargestellt. Am Ganglinienvergleich wird sichtbar, dass die Simulationsergebnisse im Kalibrierungszeitraum die

Beobachtungen sehr gut abdecken. Auch der Validierungszeitraum wird mit einigen Ausnahmen gut, insgesamt jedoch etwas schlechter wiedergegeben. Wie bereits in Abbildung 7.32 diskutiert, kann der Kalibrierungszeitraum insgesamt besser als der Validierungszeitraum dargestellt werden.

$$GWL = 76.28 + 0.14 * SPI_{12.1} - 0.02 * Tmax_{6.13} + 0.45 * Pav_{12.0} + 0.11 * SPI_{12.13} + 0.03 * Hum_{12.37} + 0.03 * Hum_{12.25} + 0.01 * Hum_{12.13}$$

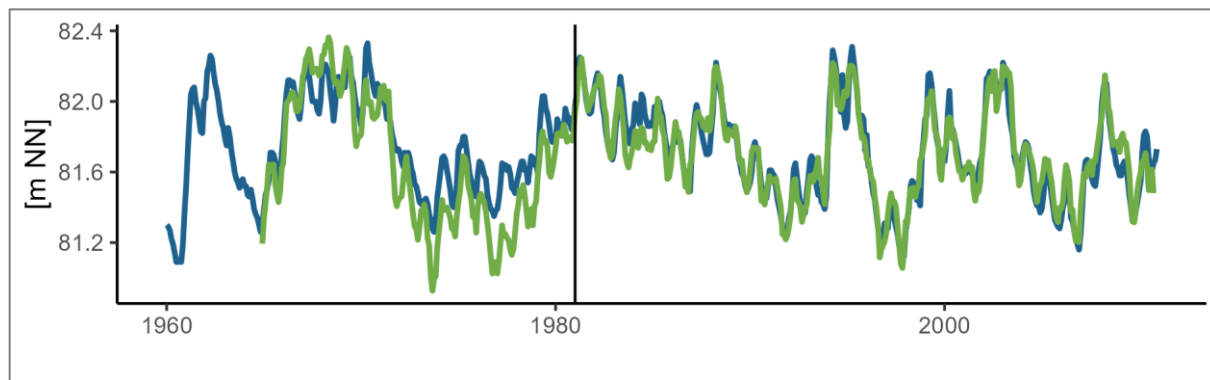


Abbildung 7.34: Modellgleichung und Ganglinienvergleich der Beobachtung (blau) und der Simulationsergebnisse (grün) beispielhaft für die Station Räderloh II; senkrechte Markierung trennt Validierungs- von Kalibrierungszeitraum.

In die Modelle gehen drei bis 19 Regressoren mit ein. Die Mehrheit der Modelle bezieht sich jedoch auf sieben Regressoren (siehe Abbildung 7.35). Dabei gehen nur die Regressoren GWN1.0 und GWN1.1 in mehr als 50 % der Modelle mit ein. Lässt man die gleitenden Mittelwerte und Zeitverzögerungen außer Acht, werden für mehr als 50 % der Modelle folgende sieben der zwölf Indizes mit einbezogen: GWN, Hum, ETP, P-ETP, SPI, Pav und Tav (siehe Abbildung 7.36).

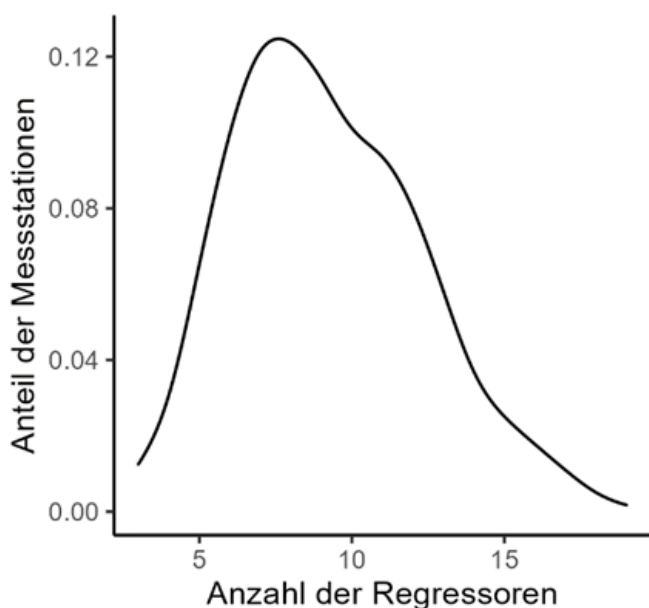


Abbildung 7.35: Anzahl der Regressoren pro Modell.



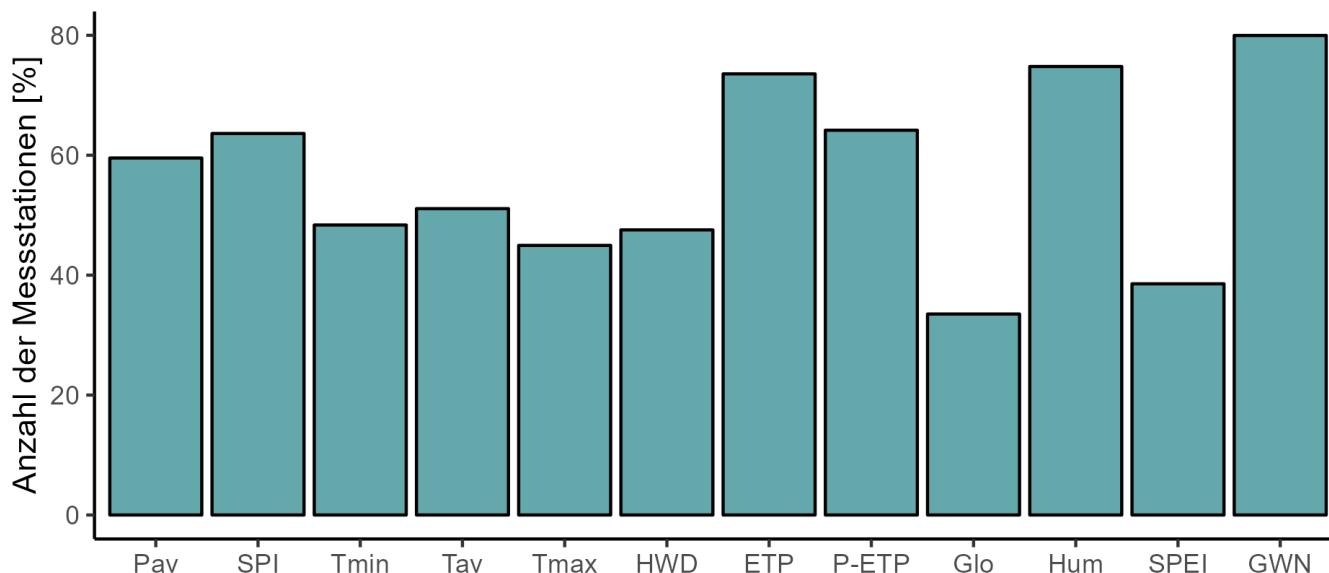


Abbildung 7.36: Häufigkeit der Einbeziehung der Indizes (unabhängig von gleitenden Mittelwerten und Zeitverzögerungen).

### 7.2.3 Simulation ausgewählter Kenngrößen

Um möglichst viele der verfügbaren Stationen für die Simulation zu betrachten, wurden auch Stationen ohne Validierung mit aufgenommen. Für möglichst zuverlässige Prognosen wurden jedoch ausschließlich Stationen mit einem NSE größer gleich 0,6 im Kalibrierungszeitraum verwendet, sodass 734 Messstationen ausgewertet werden konnten. Zukünftige Grundwasserstände wurden mit Hilfe der Modelle unter Eingang von meteorologischen Indizes (abgeleitet aus Klimamodelldaten) für drei Zeiträume simuliert: den Referenzzeitraum 1981 bis 2010, die nahe Zukunft 2021 bis 2050 und die ferne Zukunft 2071 bis 2100. Dazu werden acht Läufe des RCP8.5-Szenarios betrachtet.

Zur Validierung der Klimamodelle werden zunächst Simulationen auf Basis von Klimabeobachtungsdaten (Sim.obs) mit Beobachtungen (Obs) zur Einordnung des Modellfehlers der Regressionsmodelle im Referenzzeitraum verglichen. Der Vergleich von Simulationen auf Basis von Klimamodelldaten (Sim.sim) mit Simulationen auf Basis von Klimabeobachtungsdaten zeigt Abweichungen durch Verwendung von Klimamodelldaten auf. Der Vergleich von Simulationen auf Basis von Klimamodelldaten mit

Beobachtungen zeigt schließlich die Kombination beider Fehler (siehe Abbildung 7.37).

Durch Anwendung der Klimamodelldaten werden beobachtete Grundwasserstände an den meisten Stationen im Referenzzeitraum leicht unterschätzt. Dementsprechend werden sie als zu niedrig simuliert. Tiefstände werden um 0,05 m (Median; alle folgenden Werte ebenfalls als Median) und Hochstände um 0,16 m unterschätzt. Die Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate wird mit 3 Monaten ebenfalls leicht unterschätzt, während die Hochstandsmonate um 4 Monate überschätzt werden. Die Eintrittszeitpunkte werden minimal unterschätzt (0,06 Monate bzw. ca. 2 Tage für Jahresminimum und 0,12 Monate bzw. ca. 4 Tage für Jahresmaximum). Es sticht jedoch kein Indikator mit einem besonders großen Fehler heraus. Der Anteil des Fehlers, der auf die Klimamodelldaten zurückgeführt werden kann, variiert dabei von Indikator zu Indikator, ist jedoch gering.

Alle Ergebnisse werden als Änderungssignale berechnet und nach dem DeltaChange-Ansatz angegeben. Dazu werden die prozentualen Änderungssignale der Simulationsergebnisse mit den absoluten Beobachtungswerten verrechnet (siehe Glossar).

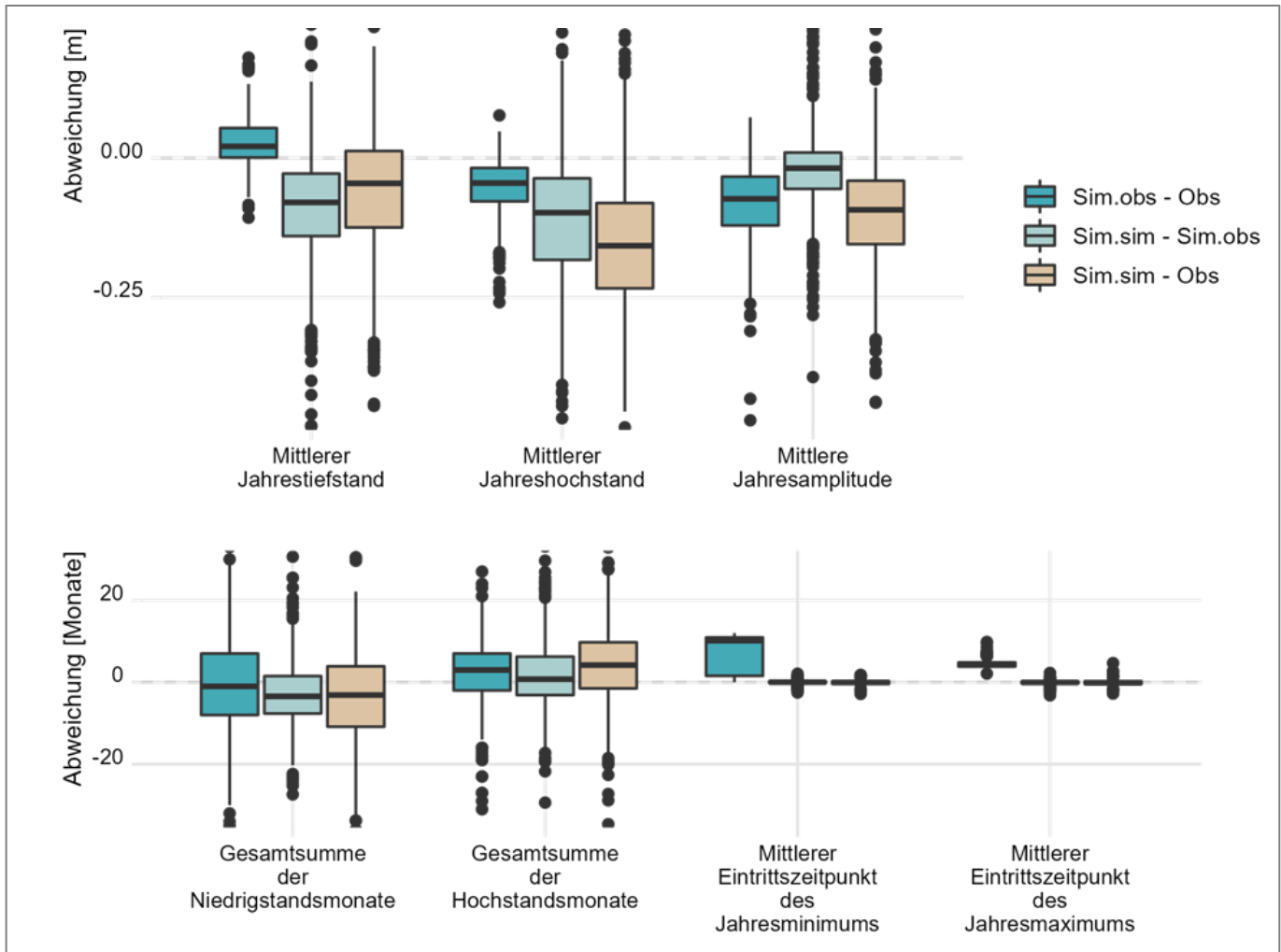


Abbildung 7.37: Mittlere Abweichung ausgewählter Indikatoren im Referenzzeitraum; Zur besseren Darstellung wurden extreme Ausreißer ausgeblendet (entsprechen < 5 % der Stationen).

#### 7.2.4 Ergebnisse

Abbildung 7.38 zeigt, gruppiert nach Regionen (siehe Kapitel 2.2), die stationsgemittelten Änderungssignale für beide Zukunftszeiträume (berechnet nach dem DeltaChange-Ansatz) als Bandbreite basierend auf dem Klimamodell-Ensemble.

Insgesamt sind sowohl für die nahe, als auch für die ferne Zukunft in allen Regionen Abnahmen für die mittleren Jahrestiefstände zu erkennen. Für die nahe Zukunft zeigen sich Änderungen von im Mittel - 0,04 m bis - 0,2 m im Mittel, für die ferne Zukunft - 0,06 m bis - 0,57 m. Die Marschen weisen dabei die geringsten Änderungen auf. Für die mittleren Jahreshochstände zeigen sich minimale Abnahmen von im Mittel - 0,04 m bis - 0,15 m für die nahe Zukunft bzw. - 0,004 m bis - 0,33 m für die ferne Zukunft. Die Marschen und Niederungsgebiete weisen dabei die geringsten Änderungen auf. Es sind steigende Amplituden von im Mittel 0,01 m bis 0,06 m für die nahe Zukunft zu vermerken, welche für die ferne Zukunft noch verstärkt werden (im Mittel 0,06 m bis 0,25 m).

Die mittleren Eintrittszeitpunkte der Jahresminima und -maxima verschieben sich zunehmend um ca. 0,2 Monate (bzw. ca. 6 Tage) nach hinten.

Für die Niedrigstandsmonate lassen sich für die nahe und ferne Zukunft sowohl Abnahmen als auch Zunahmen erkennen. So nehmen für Niederungsgebiete und Bergland ab und für Geestgebiete und Börden zu. Für die Marschen sind zunächst Zunahmen, für die ferne Zukunft Abnahmen zu erkennen.

Die Hochstandsmonate hingegen zeigen Zunahmen von im Mittel 0,9 m bis 2,84 m in der nahen Zukunft und 1,9 m bis 5,8 m in der fernen Zukunft. Dabei zeigen die Börden mit 5,8 m für die ferne Zukunft die größten Zunahmen. Lediglich das Bergland zeigt für die nahe Zukunft zunächst Abnahmen von im Mittel - 0,75 m.

Für die Dauern sind Veränderungen allerdings vor allem in Börden und Bergland erkennbar. Die anderen Regionen weisen weite Bandbreiten auf, welche auf räumliche Unterschiede oder Unsicherheiten hindeuten.

Im Folgenden wird auf jeden der genannten Indikatoren näher eingegangen, wobei die Inseln auf Grund geringer

Stationsdichte außer Betrachtung gelassen werden. Auch die Ergebnisse der Börden mit 6 Stationen und dem Bergland

mit 10 Stationen sind mit Vorsicht zu interpretieren und ggf. nicht repräsentativ (alle Werte als Mittelwert).

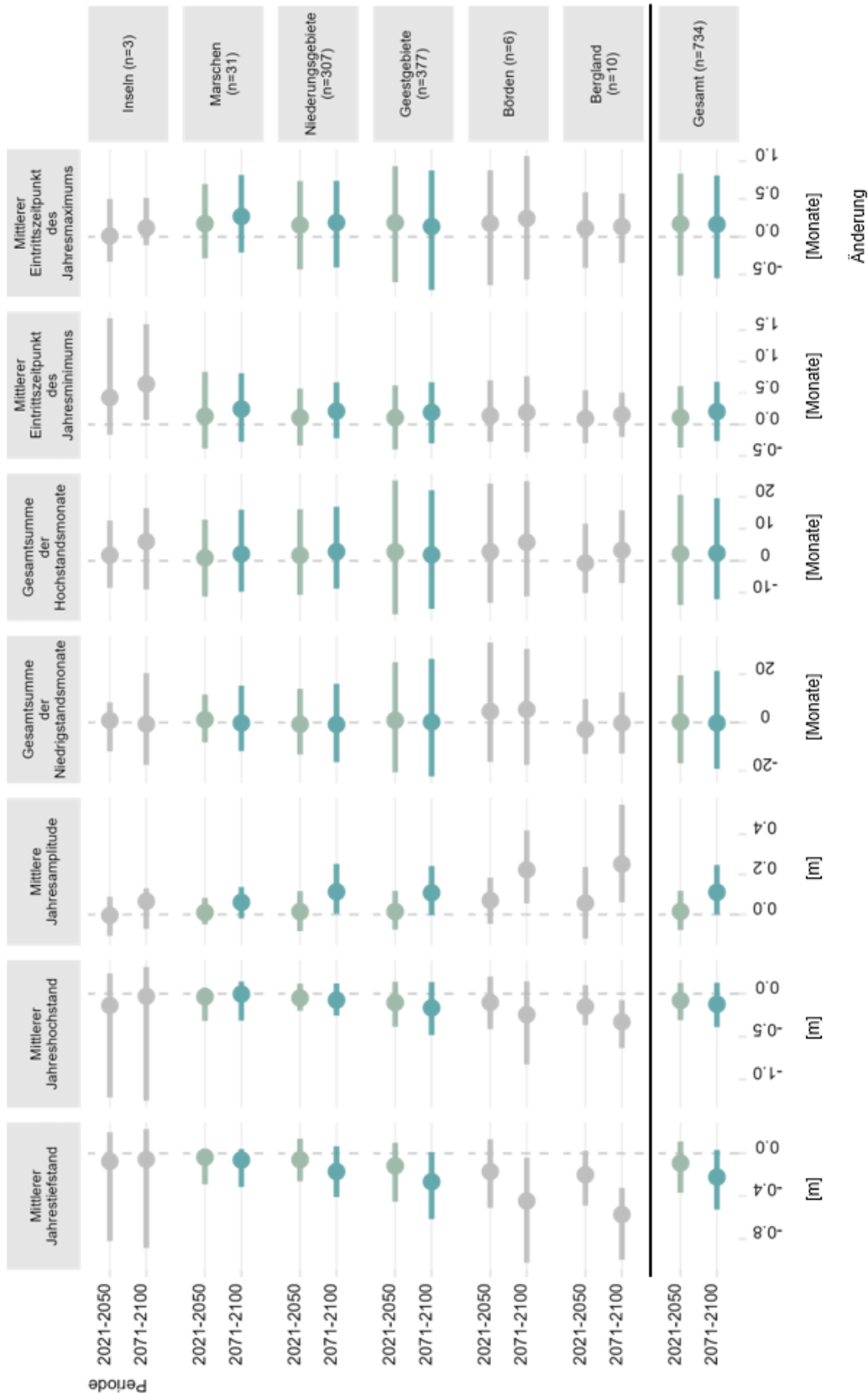


Abbildung 7.38: Mittlere Änderungssignale ausgewählter Indikatoren gruppiert nach Regionen (Kreismarkierung: Mittel aller mittleren 734 Stationswerte; Balkenenden: Mittel aller Minima/ Maxima der 734 Stationswerte). Regionen mit weniger als 20 Stationen ( $n < 20$ ) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut.

### 7.2.4.1 Mittlerer Jahrestiefstand

Für die mittleren Jahrestiefstände (Abbildung 7.39, Abbildung 7.40) sind insgesamt Abnahmen zu erkennen, welche sich in der fernen Zukunft weiter verstärken. Die Abnahmen nehmen von den Marschen zum Bergland hin zu. Während Marschen und Niederungsgebiete im Mittel nur

geringe Abnahmen in der fernen Zukunft zeigen ( $< 0,2$  m), nehmen diese im Bergland von  $0,2$  m für die nahe Zukunft auf bis zu  $0,57$  m für die ferne Zukunft zu.

Insgesamt sind für die ferne Zukunft maximale Werte von  $+0,07$  m (Niederungsgebiete) bis zu  $-0,33$  m (Bergland) zu erkennen. Minimale Werte erstrecken sich für die ferne Zukunft von  $-0,32$  m (Marschen) bis zu  $-1,03$  m (Börden).

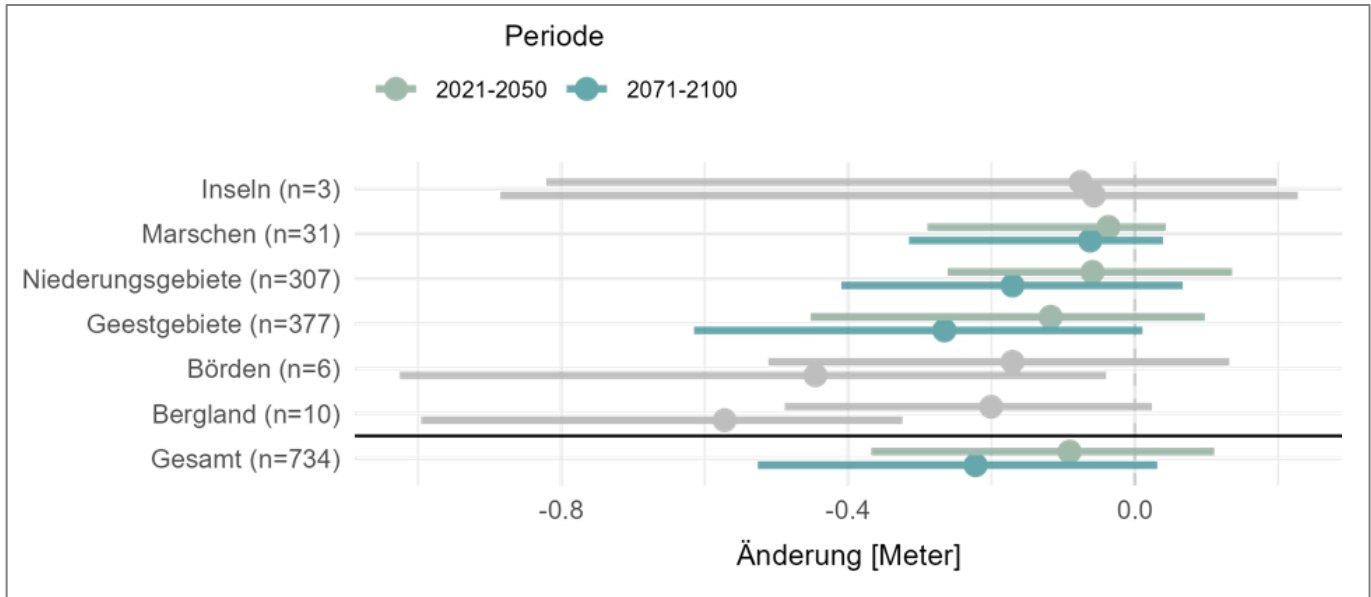


Abbildung 7.39: Bandbreiten der Änderungen der mittleren Jahrestiefstände in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen ( $n < 20$ ) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut.

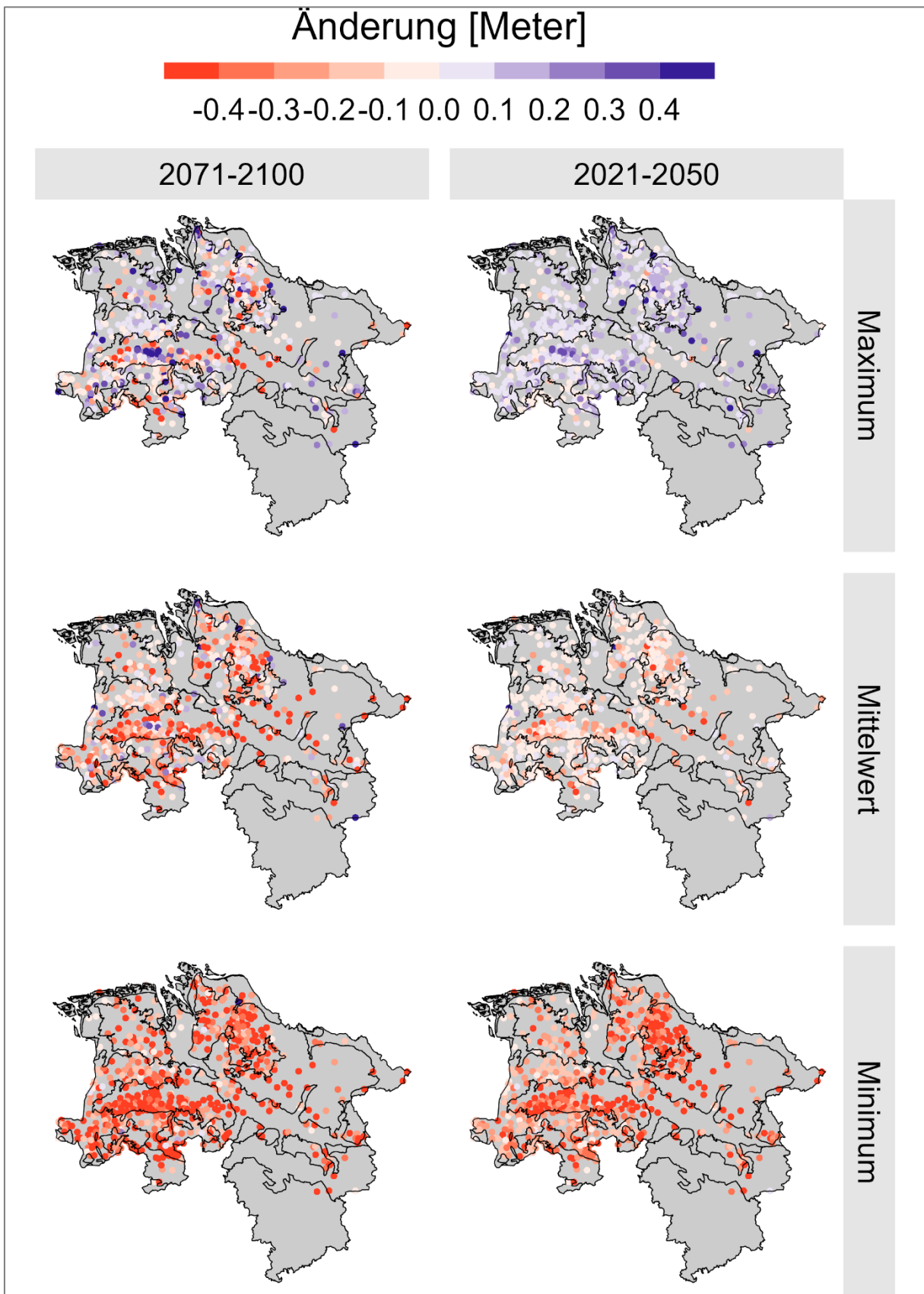


Abbildung 7.40: Räumliche Verteilung der Änderungen der mittleren Jahrestiefstände als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum.

### 7.2.4.2 Mittlerer Jahreshochstand

Für die mittleren Jahreshochstände (Abbildung 7.41, Abbildung 7.42) zeigen sich leichte Abnahmen, welche sich in der fernen Zukunft verstärken. Während Marschen und Niederungsgebiete im Mittel nur sehr geringe Abnahmen

zeigen ( $< 0,1$  m), verstärken diese sich in den Geestgebieten, Börden und Bergland.

Insgesamt liegen die größten Werte in der fernen Zukunft bei  $+ 0,14$  m (Börden) bis zu  $- 0,08$  m (Bergland). Minimale Werte erstrecken sich für die ferne Zukunft von  $- 0,25$  m (Niederungsgebiete) bis zu  $- 0,82$  m (Börden).

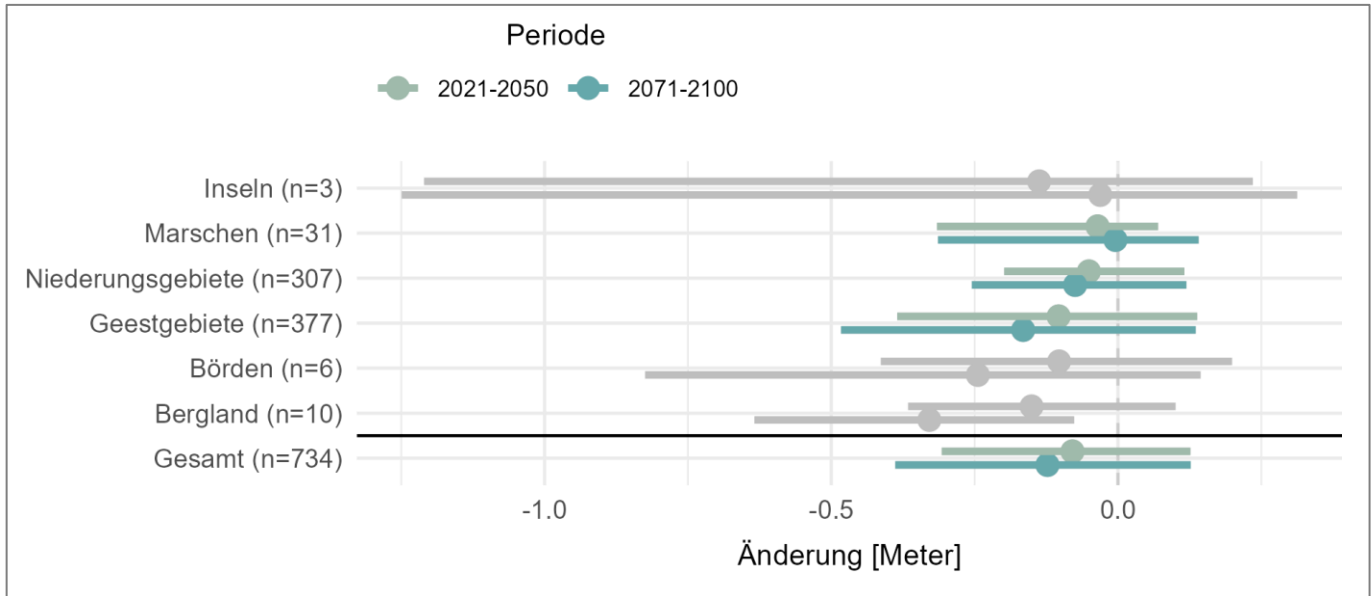


Abbildung 7.41: Bandbreiten der Änderungen der mittleren Jahreshochstände in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen ( $n < 20$ ) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut.

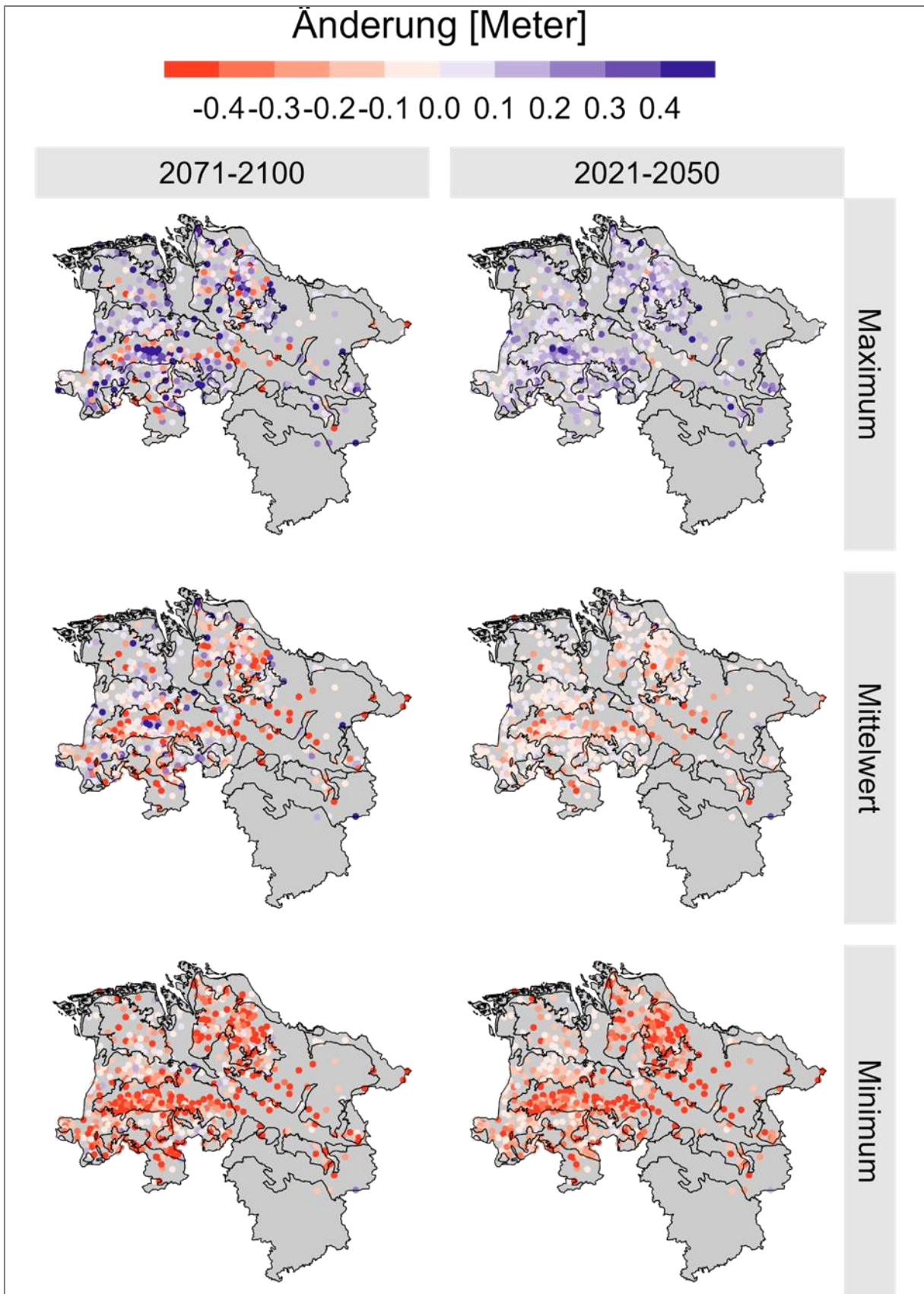


Abbildung 7.42: Räumliche Verteilung der Änderungen der mittleren Jahreshochstände als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum.

### 7.2.4.3 Mittlerer Jahresamplitude

Für die mittlere Jahresamplitude (Abbildung 7.43, Abbildung 7.44) sind entsprechend den zuvor gezeigten Veränderungen der Jahreshoch- und Jahrestiefstände leichte Zunahmen zu vermerken, welche sich für die ferne Zukunft verstärken. Für Marschen, Niederungs- und Geestgebiete sind merkliche Zunahmen erst für die ferne Zukunft zu erkennen (im Mittel ca. + 0,1 m).

Börden und Bergland zeigen bereits in der nahen Zukunft geringe Zunahmen von im Mittel ca. + 0,06 m und für die ferne Zukunft maximale Werte von + 0,55 m (Bergland) bis zu + 0,14 m (Marschen) zu erkennen. Minimale Werte erstrecken sich für die ferne Zukunft von + 0,06 m (Bergland) bis zu - 0,02 m (Marschen).

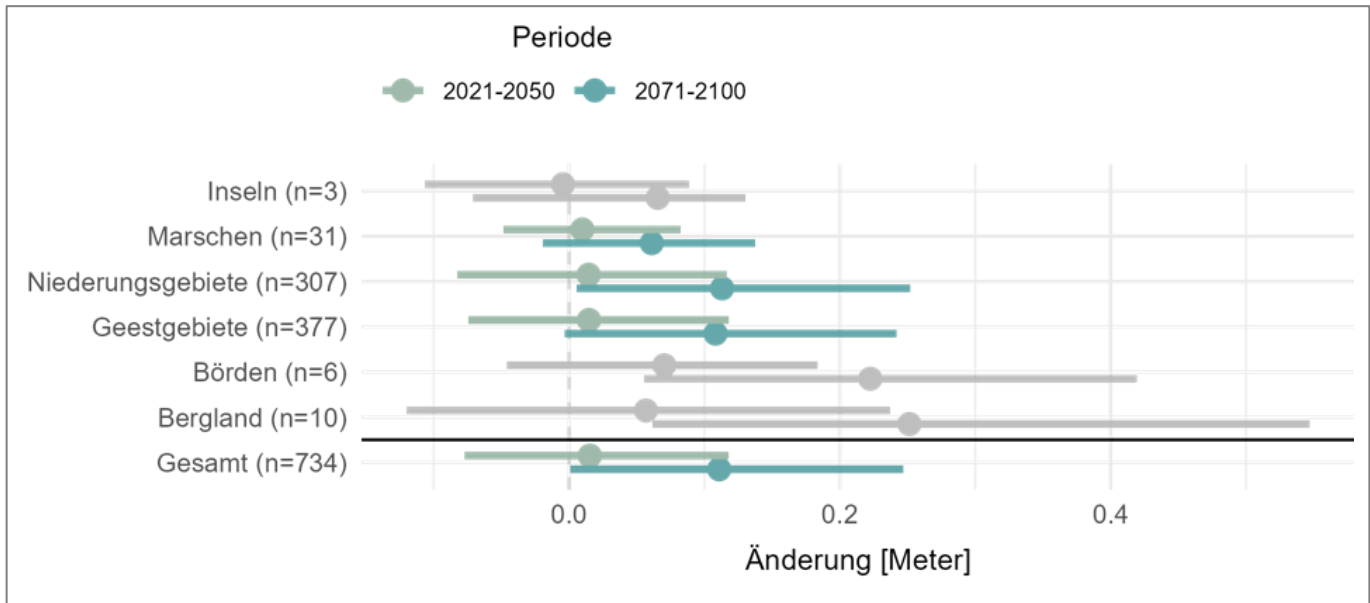


Abbildung 7.43: Bandbreiten der Änderungen der mittleren Jahresamplituden in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen ( $n < 20$ ) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut.



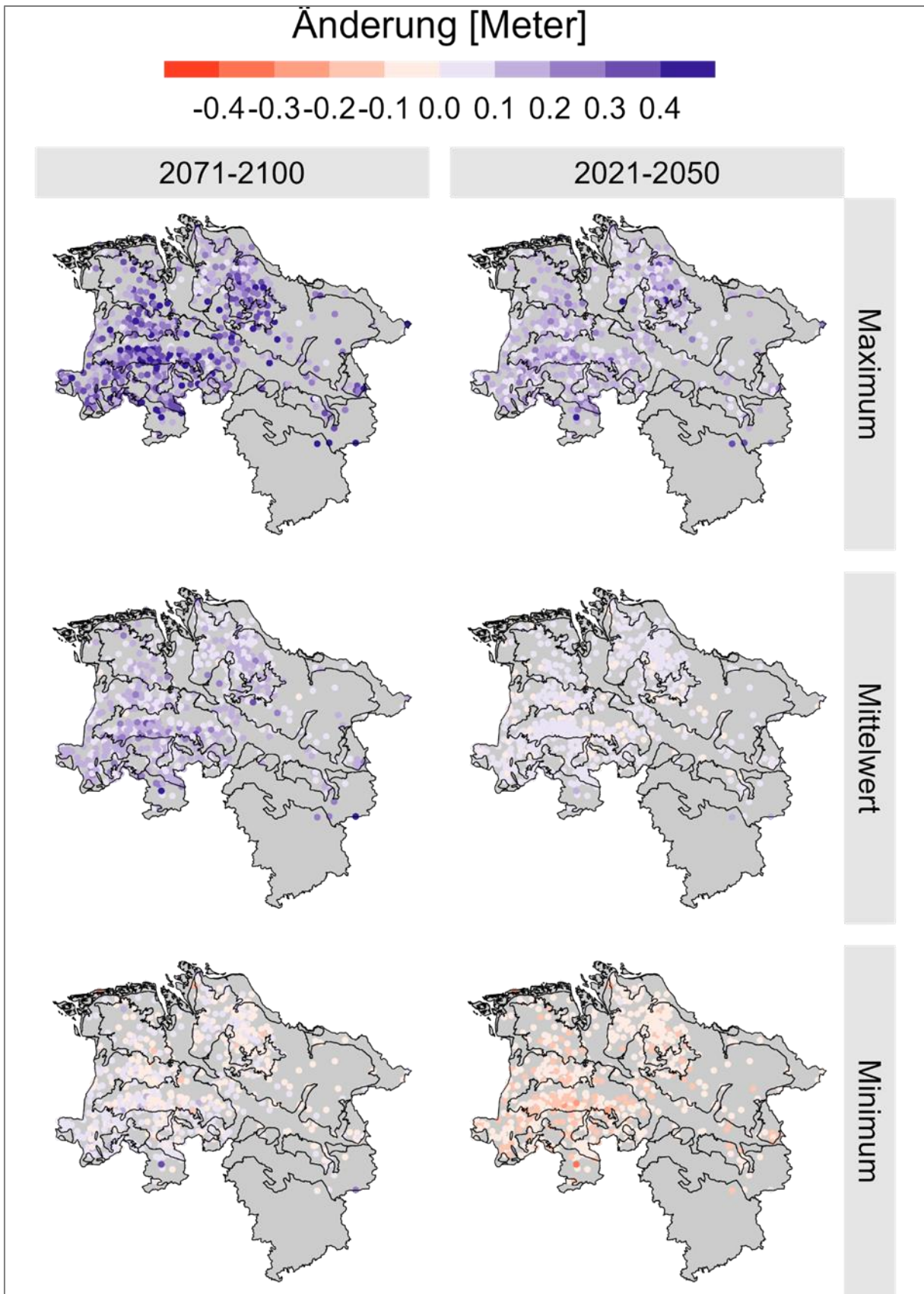


Abbildung 7.44: Räumliche Verteilung der Änderungen der mittleren Jahresamplituden als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum.

#### 7.2.4.4 Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate

Für die Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate (Abbildung 7.45, Abbildung 7.46) sind unterschiedliche Entwicklungsrichtungen zu erkennen, welche sich für alle Regionen (mit Ausnahme der Börden) in der fernen Zukunft abschwächen. Während im Bergland und den Niederungsgebieten im Mittel geringe Abnahmen zu

vermerken sind, zeigen sich Zunahmen für Börden, Geestgebiete und Marschen.

Besonders die Börden fallen mit Zunahmen von ca. + 5 Monaten auf. Insgesamt sind für die ferne Zukunft maximale Werte von + 30 Monaten (Börden) bis zu + 12 Monaten (Bergland) zu erkennen. Minimale Werte erstrecken sich für die ferne Zukunft von – 12 Monaten (Marschen) bis zu – 22 Monaten (Geestgebiete).

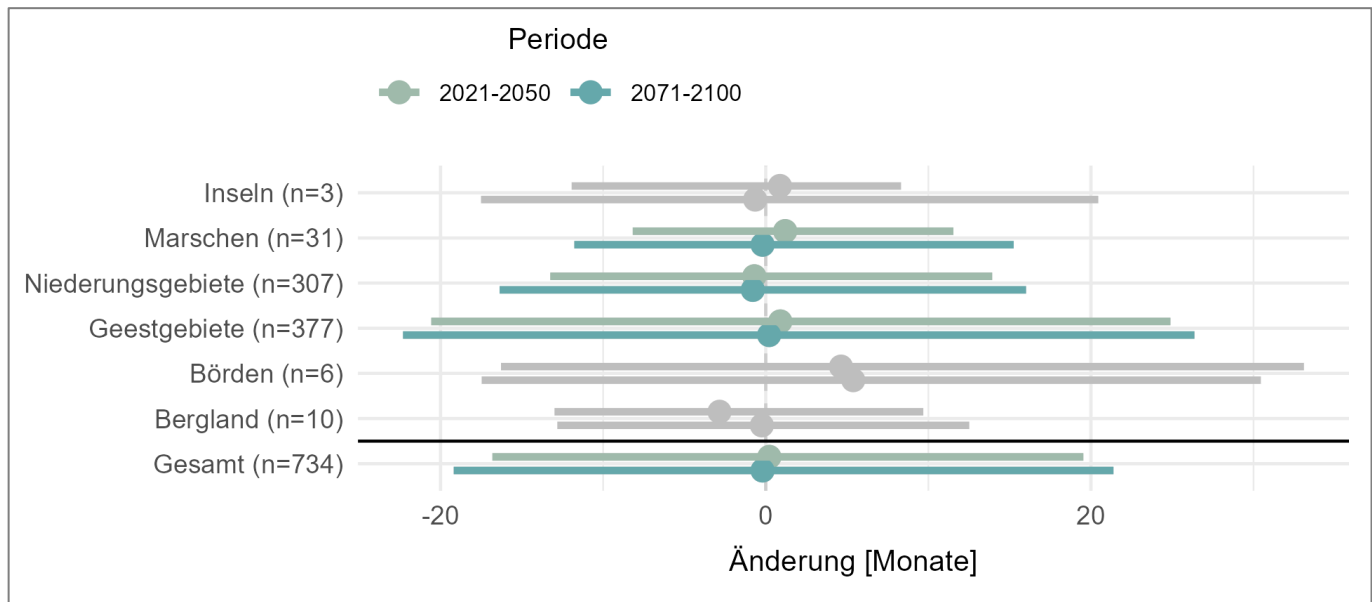


Abbildung 7.45: Bandbreiten der Änderungen der Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen ( $n < 20$ ) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut.

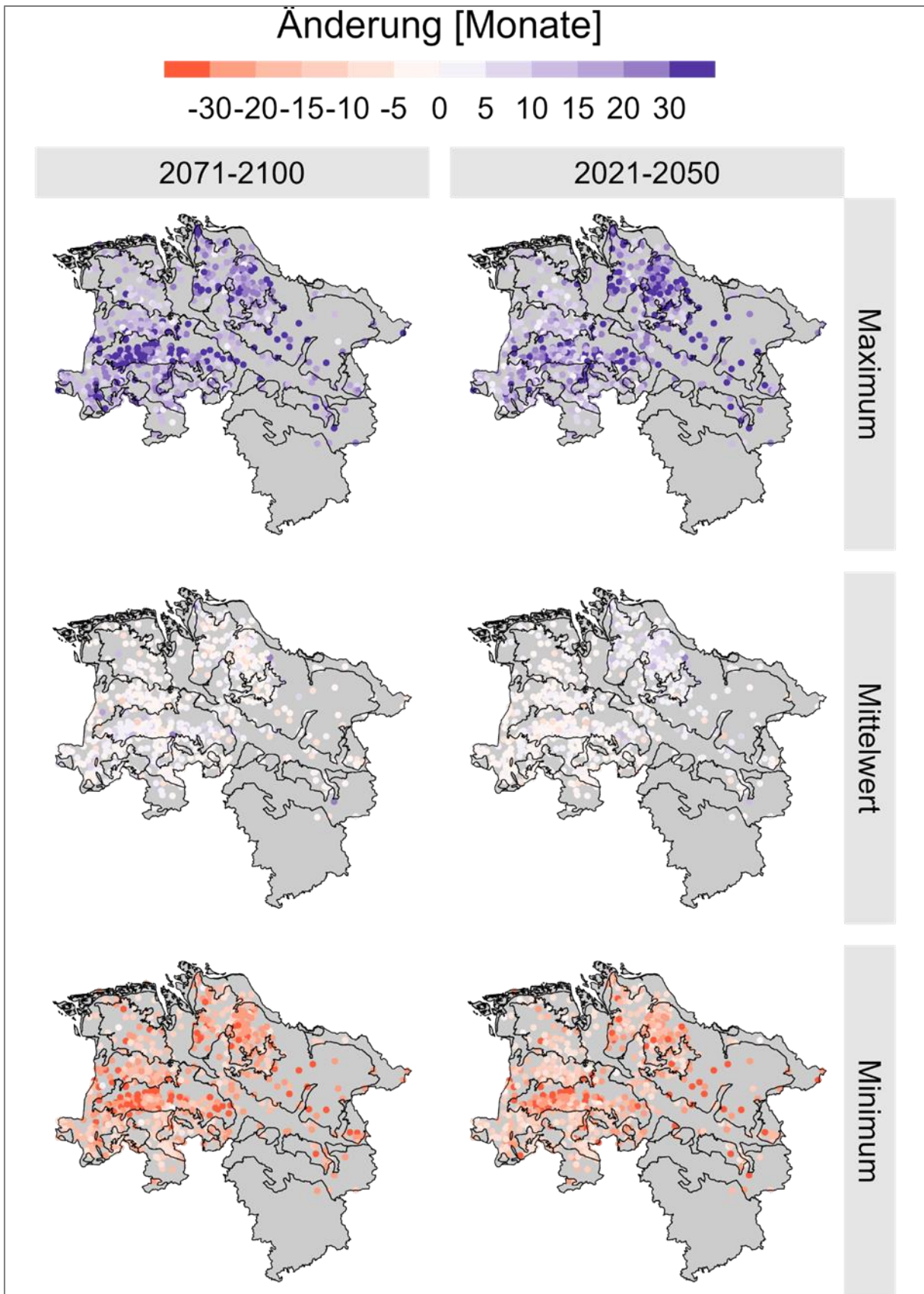


Abbildung 7.46: Räumliche Verteilung der Änderungen der Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum.

### 7.2.4.5 Gesamtsumme der Hochstandsmonate

Für die Gesamtsumme der Hochstandsmonate (Abbildung 7.47, Abbildung 7.48) sind insgesamt Zunahmen zu erkennen, welche überwiegend in der fernen Zukunft leicht verstärkt werden. Alle Naturräume zeigen in der nahen Zukunft Zunahmen von im Mittel ca. + 2 Monaten mit Ausnahme des Berglands, welches leichte Abnahmen zeigt.

Für die ferne Zukunft zeigen alle Naturräume Zunahmen von im Mittel ca. + 3 Monaten, für die Börden + 6 Monate.

Insgesamt sind für die ferne Zukunft maximale Werte von + 25 Monaten (Börden) bis zu + 16 Monaten (Bergland) zu erkennen. Minimale Werte erstrecken sich für die ferne Zukunft von - 7 Monaten (Bergland) bis zu - 15 Monaten (Geestgebiete).

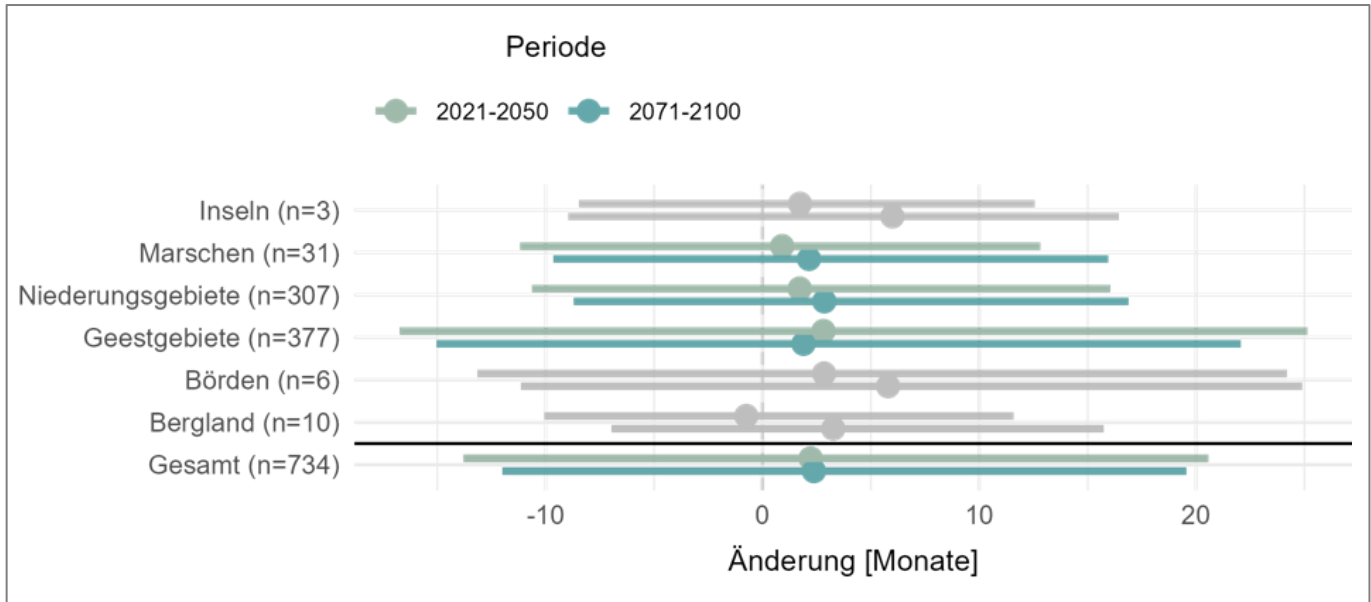


Abbildung 7.47: Bandbreiten der Änderungen der Gesamtsumme der Hochstandsmonate in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen ( $n < 20$ ) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut.

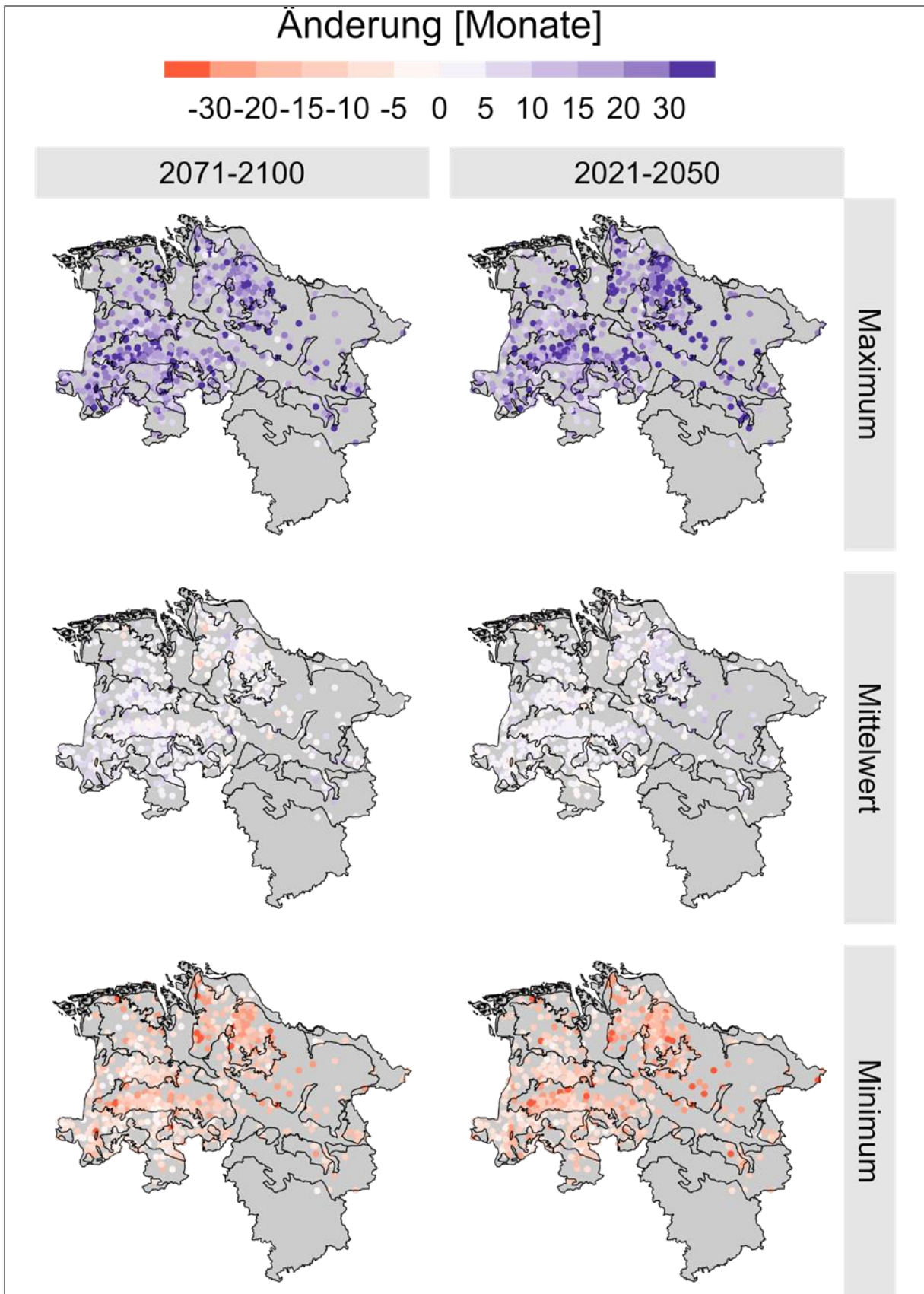


Abbildung 7.48: Räumliche Verteilung der Änderungen der Gesamtsumme der Hochstandsmonate als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum.

#### 7.2.4.6 Mittlerer Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums

Für die mittleren Eintrittszeitpunkte des Jahresminimums (Abbildung 7.49, Abbildung 7.50) sind insgesamt Zunahmen (d.h. eine Verspätung) zu erkennen, welche für die ferne Zukunft leicht verstärkt werden. Alle Naturräume zeigen Zunahmen von im Mittel ca. + 0,1 Monat bis + 0,2 Monaten (bzw. 3 - 6 Tagen) für die ferne Zukunft.

Insgesamt sind für die ferne Zukunft maximale Werte von + 0,8 Monaten bzw. + 24 Tage (Marschen) bis zu + 0,5 Monaten bzw. + 15 Tage (Bergland) zu erkennen. Minimale Werte erstrecken sich für die ferne Zukunft von - 0,2 Monaten bzw. - 6 Tage (Bergland) bis zu - 0,4 Monaten bzw. - 12 Tage (Börden).

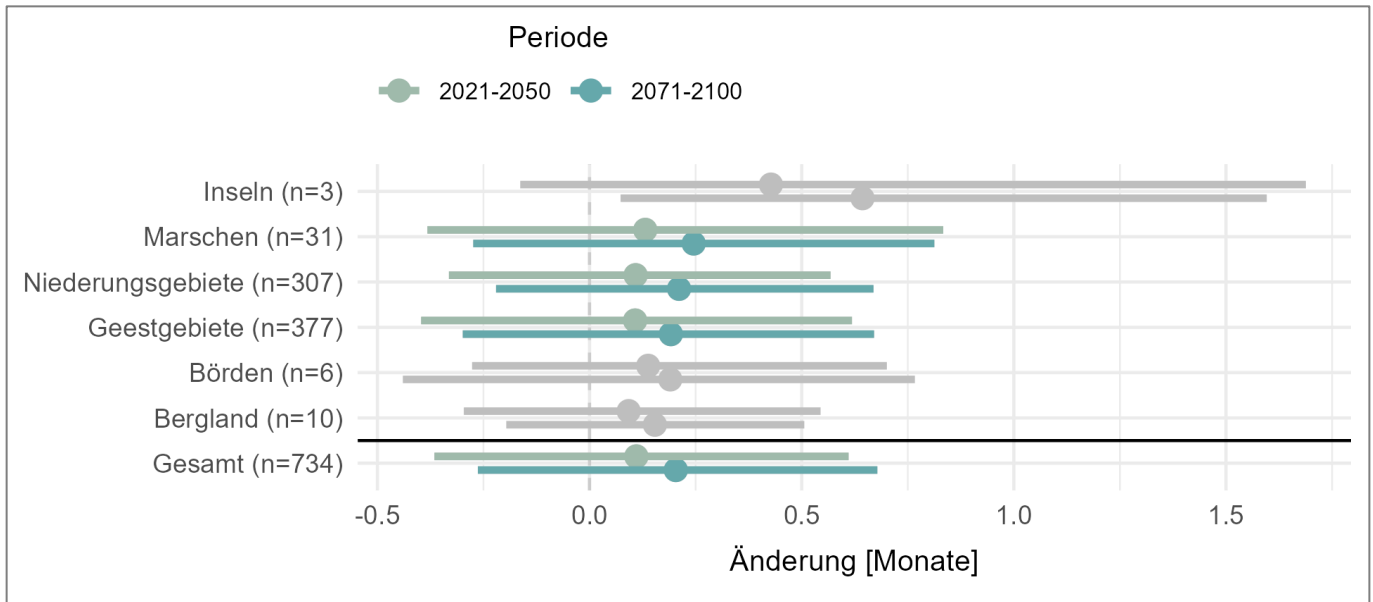


Abbildung 7.49: Bandbreiten der Änderungen des mittleren Eintrittszeitpunkts des Jahresminimums in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen ( $n < 20$ ) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut.

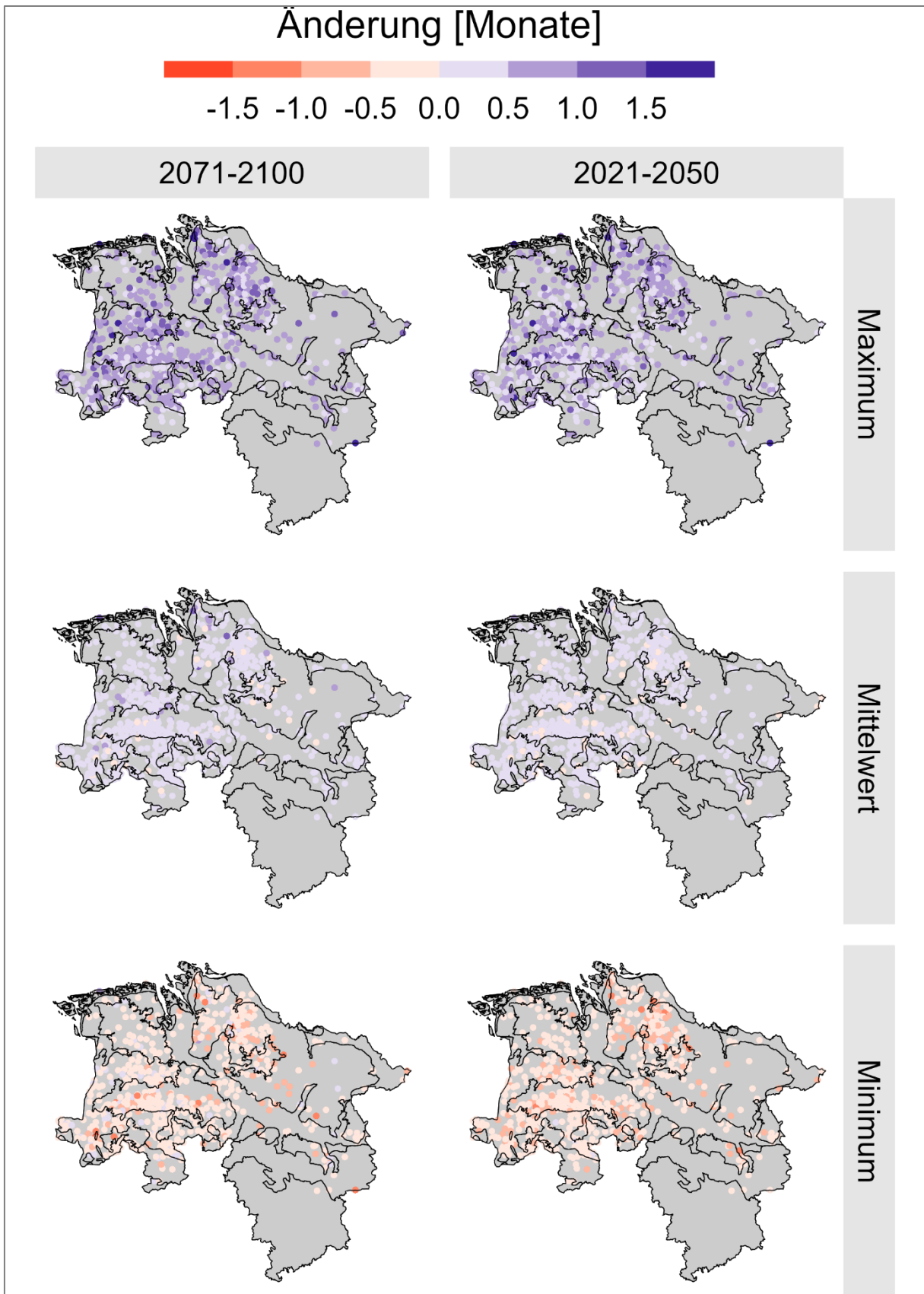


Abbildung 7.50: Räumliche Verteilung der Änderungen des mittleren Eintrittszeitpunkts des Jahresminimums als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum.

### 7.2.4.7 Mittlerer Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums

Für die mittleren Eintrittszeitpunkte des Jahresmaximums (Abbildung 7.51, Abbildung 7.52) sind insgesamt Zunahmen zu erkennen, welche überwiegend für die ferne Zukunft leicht verstärkt werden. Alle Naturräume zeigen Zunahmen von im Mittel ca. + 0,15 Monaten bzw. ca. + 4 bis 5 Tagen für die nahe Zukunft. Für die ferne Zukunft zeigen alle Naturräume Zunahmen von im Mittel ca. + 0,2 Monaten

bzw. + 6 Tagen mit Ausnahme der Geestgebiete, welche leicht verringerte Zunahmen zeigen.

Insgesamt sind für die ferne Zukunft maximale Werte von + 1 Monat bzw. + 30 Tagen (Börden) bis zu + 0,6 Monaten bzw. + 18 Tagen (Bergland) zu erkennen. Minimale Werte erstrecken sich für die ferne Zukunft von - 0,2 Monaten bzw. - 6 Tagen (Marschen) bis zu - 0,7 Monaten bzw. - 21 Tagen (Geestgebiete).

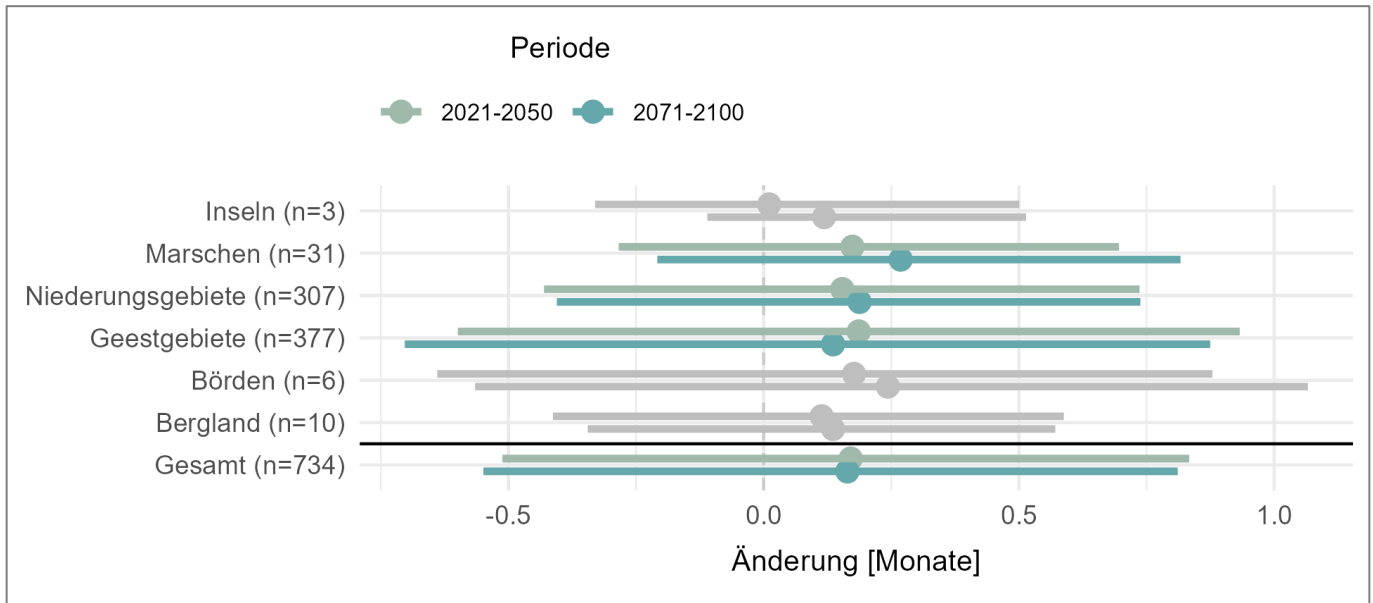


Abbildung 7.51: Bandbreiten der Veränderung des mittleren Eintrittszeitpunkts des Jahresmaximums in der nahen und fernen Zukunft als Gebietsmittel für die Regionen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010. Regionen mit weniger als 20 Stationen ( $n < 20$ ) sind wenig repräsentativ und wurden visuell ausgegraut.



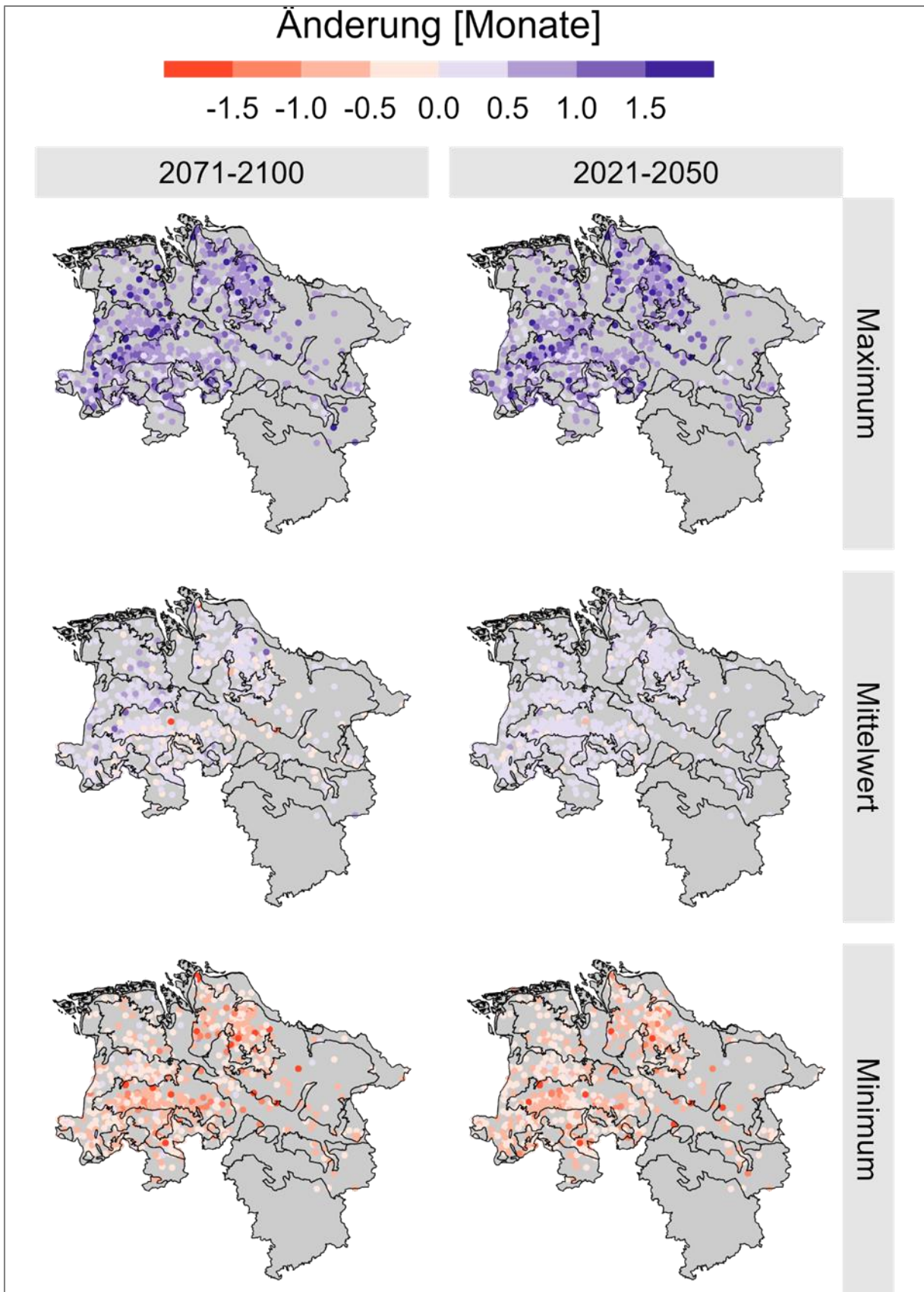


Abbildung 7.52: Räumliche Verteilung der Veränderungen des mittleren Eintrittszeitpunkts des Jahresmaximums als Maximum, Mittel und Minimum des Ensembles in der nahen und fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum.

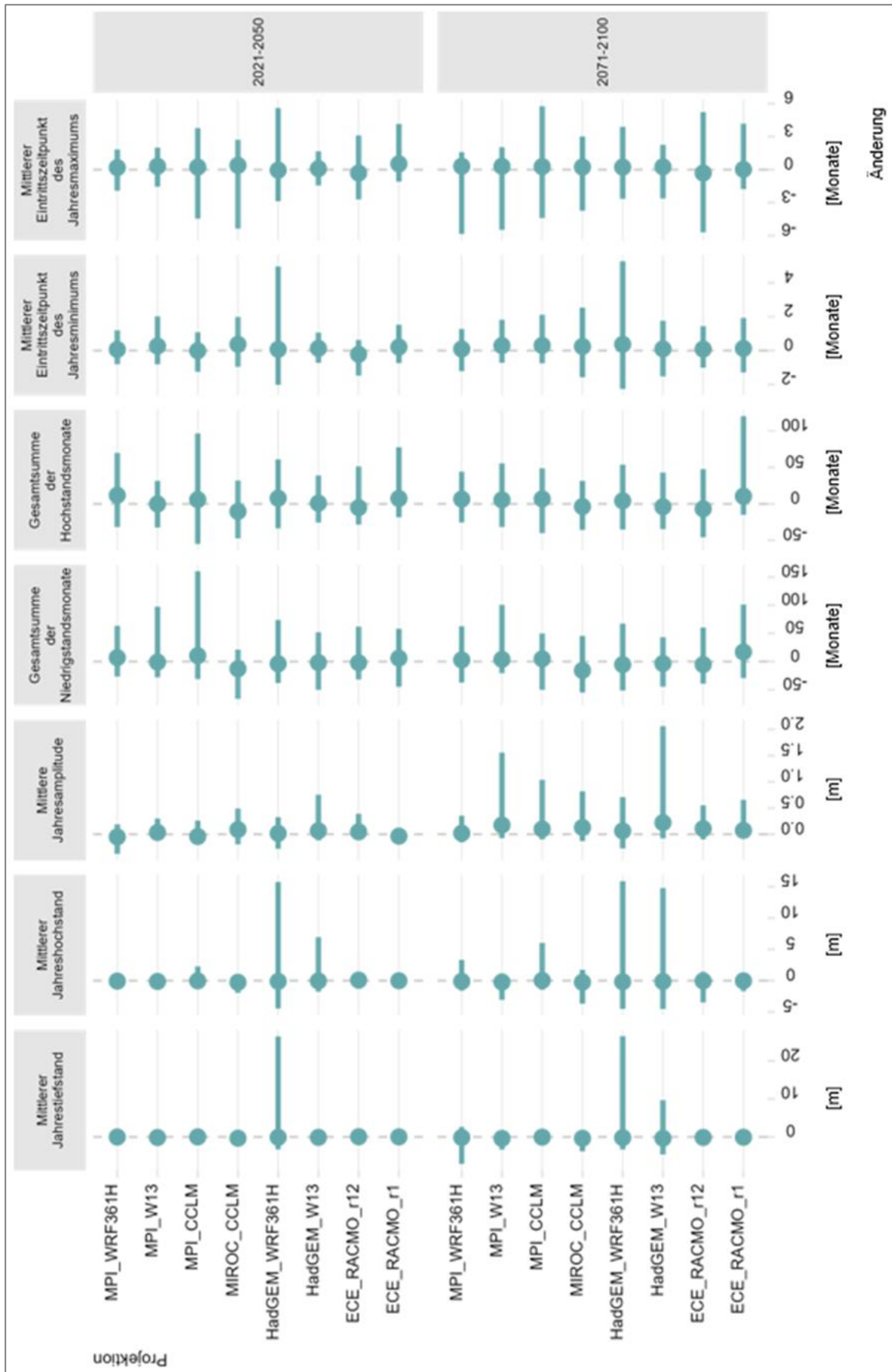


Abbildung 7.53: Änderungssignale ausgewählter Indikatoren für die einzelnen Modellketten. Die Bandbreiten ergeben sich aus den jeweils unterschiedlichen simulierten Werten der betrachteten 734 Grundwassermessstellen für ganz Niedersachsen.

Abbildung 7.53 zeigt die Änderungssignale ganz Niedersachsens vergleichsweise für die einzelnen Modellketten. Dabei stimmen die Ergebnisse der Modellketten für beide Zukunftszeiträume weitestgehend überein, was als Indiz dafür gesehen werden kann, dass die gemachten Aussagen trotz gewisser Modellunsicherheiten grundsätzlich robust sind, da sie mehrheitlich von den Klimamodellen gleichermaßen gestützt werden. Lediglich die Modellketten unter Verwendung des globalen Klimamodells HadGEM2-ES weisen weitere Bandbreiten auf.

#### 7.2.5 Zusammenfassung

Die wesentlichen Ergebnisse der statistischen Grundwasserstands-Prognose lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Die Grundwasserstände lassen sich als lineare Funktion beobachteter meteorologischer Indizes mit Hilfe eines multiplen Regressionsmodells zufriedenstellend beschreiben.

Unter Anwendung der Klimamodelldaten werden die betrachteten Indikatoren mit Ausnahme der Gesamtsumme der Hochstandsmonate unterschätzt. Die Abweichung durch Klimamodelldaten variiert dabei von Indikator zu Indikator, ist jedoch gering.

In Bezug auf die zukünftig mittleren Tendenzen lässt sich insgesamt eine leichte Abnahme der mittleren Jahrestiefstände sowie eine minimale Abnahme der mittleren Jahreshochstände erkennen. Daraus resultierend nehmen die mittleren Jahresamplituden leicht zu.

Zusätzlich treten die Eintrittszeitpunkte der Jahresextremstände verspätet ein. Die Dauer der Niedrigstandsmonate bleibt relativ unverändert, während die der Hochstandsmonate zunimmt. Dabei treten die Veränderungen in der fernen Zukunft zumeist etwas deutlicher in Erscheinung als in der nahen Zukunft.

Für die Änderungssignale stimmen die acht verwendeten Klimamodelle in ihrer grundsätzlichen Tendenz weitgehend überein. Lediglich die Modellketten unter Verwendung des globalen Klimamodells HadGEM2-ES zeigen größere Bandbreiten.

## 7.3 Modellierung veränderter zukünftiger Grundwasserstandsveränderungen mit Hilfe KNN-basierter Vorhersage (Teilprojekt C)

### 7.3.1 Modellbeschreibung

Für die langfristige Simulation der zukünftigen Grundwasserstände wurden in diesem Teilprojekt sogenannte Convolutional Neural Networks (CNN; gefaltete künstliche neuronale Netze angewendet. CNNs (LeCun et al. 2015) sind künstliche neuronale Netze, die vor allem für Bilderkennung und -klassifizierung verwendet werden. Sie sind jedoch auch gut für Signalverarbeitungsaufgaben geeignet und werden beispielsweise für die Verarbeitung natürlicher Sprache (natural language processing, NLP) eingesetzt.

Die auf der Grundlage von Wunsch et al. (2022) hier implementierte 1D-CNN-Struktur ist in Abbildung 7.54 dargestellt. Für jede Messstelle wurde ein eigenes, separates 1D-CNN-Modell berechnet. Wie in der Praxis üblich, werden die Eingabedaten, also hier z.B. der Niederschlag oder die Temperatur, zwischen -1 und 1 skaliert, um den Lernprozess zu verbessern. Die Eingabedaten werden in Sequenzen mit einer bestimmten Sequenzlänge aufgeteilt. Aus diesen

Sequenzen aus Eingabedaten werden in der 1D-Faltungsschicht (siehe 1D Convolutional layer in Abbildung 7.54) relevante Muster und Zusammenhänge zwischen verschiedenen Zeitpunkten gelernt. Im Detail werden hierzu die Gewichte innerhalb des Kernels (roter Rahmen) während der Trainingsphase optimiert oder angepasst. In der zweiten Schicht, dem Max Pooling layer, wird die Anzahl der internen Modellparameter reduziert um das Risiko einer Überanpassung (overfitting) zu verringern. Aus demselben Grund sowie zum Zweck der Abschätzung der Modellunsicherheit, wird ein Monte-Carlo-Dropout layer verwendet. In dieser Schicht werden zufällig 50% der Neuronen entfernt. Auf diese Weise wird bei mehreren Realisierungen dieses Modells eine Verteilung an Ergebnissen erzielt, worüber die Modellunsicherheit bestimmt werden kann. Es folgen eine abflachende Schicht (Flatten) um die durch die Anzahl an Features und die zeitliche Dimension definierte Struktur der verarbeiteten Daten zu reduzieren. Anschließend folgt eine vollständig verbundene dichte Schicht (Fully connected dense layer), um das Ergebnis in der gewünschten Dimension zu erhalten. Hier wird die Gleichrichter-Funktion (RELU; rectified linear unit) als Aktivierungsfunktion verwendet. Schließlich wird der Wert des Grundwasserspiegels nach Anwendung einer linearen Funktion in der Ausgabeschicht (Output layer) ermittelt.

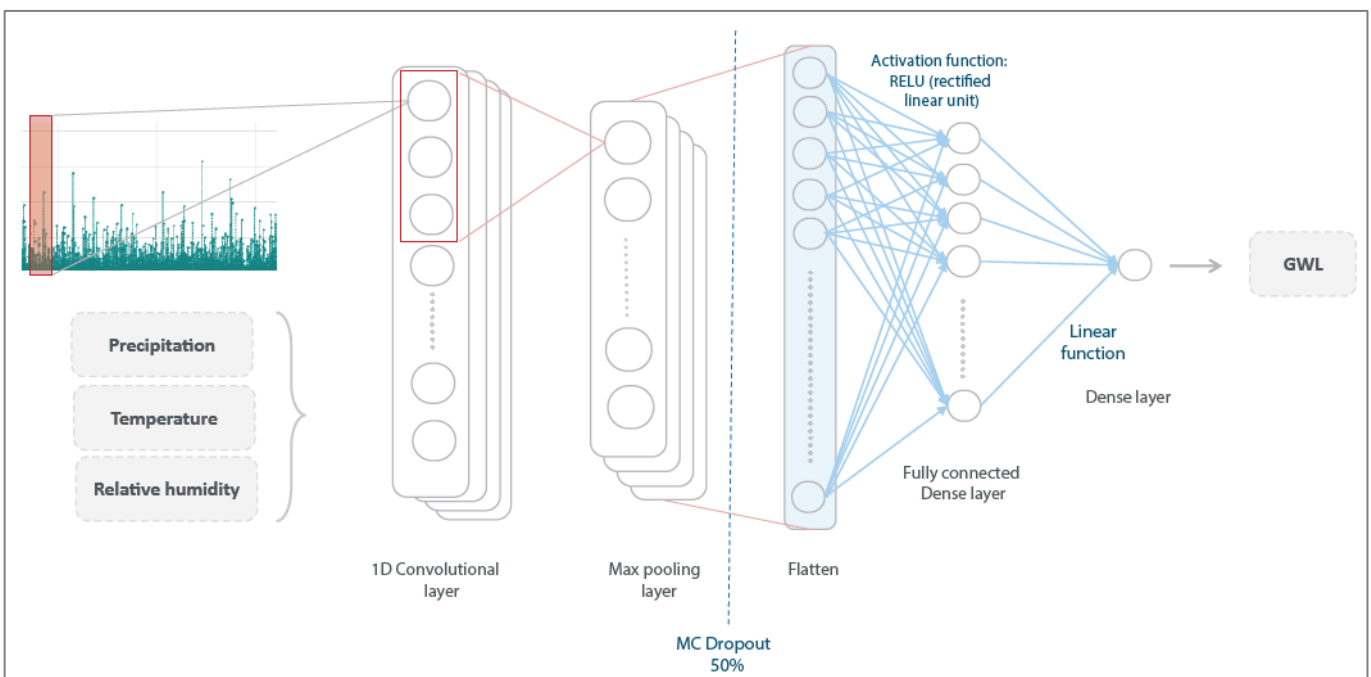


Abbildung 7.54: Struktur des angewendeten CNNs (nach Wunsch et al., 2022).

Für die einzelnen Arbeitsschritte wurden die folgenden Python-Bibliotheken verwendet: Pandas (Reback, 2020), Numpy (van der Walt et al., 2011), Scipy (Virtanen et al., 2020), Matplotlib (Hunter, 2007), Geopandas (Jordahl et al., 2020) und Tensorflow (Abadi et al., 2015).

### 7.3.2 Kalibrierung und Validierung

Abweichend von der Terminologie in der klassischen hydrologischen Modellierung wird beim maschinellen Lernen die Kalibrierung mit Training und die Validierung mit Test bezeichnet. Diese Begriffe werden im Folgenden so verwendet.

Wie bereits oben beschrieben, wird für jede Messstelle ein 1D-CNN angewendet. Somit erfolgt für jede Messstelle auch eine individuelle Trainings- und Testphase des jeweiligen Modells, sowie eine Optimierung der jeweiligen Hyperparameter, d.h. der externen Modellparameter wie der Anzahl der Filter im 1D-Conv Layer (zwischen 1 und 256), die Länge der Inputsequenz (zwischen 1 und 52 Wochen/Zeitschritten), die Batchsize (zwischen 16 und 256)

sowie die Anzahl der Neuronen im ersten Dense Layer (zwischen 1 und 256). Diese externen Modellparameter oder Hyperparameter müssen vor dem Training definiert bzw. wie hier iterativ ausprobiert. Hierfür wird die Methode der Bayes'schen Hyperparameter-Optimierung verwendet. Diese Methode unterscheidet sich von einfacheren Methoden – wie der zufälligen Auswahl an Hyperparameterkombinationen – durch das gezielte Suchen von Hyperparameterkombinationen durch die Einbeziehung von Information aus bereits ausprobierten Kombinationen. Für diese Optimierung werden die verfügbaren Grundwasserstandsdaten bis Ende 2012 in einen Trainings- (80 %), Validierungs- (10 %) und einen Datensatz zur Hyperparameter-Optimierung (10 %) aufgeteilt (siehe Abbildung 7.55). Die Daten ab Anfang 2013 bilden dann den Testdatensatz. Mit dem Testdatensatz wird die jeweilige Modellgüte an den einzelnen Messstellen bewertet. Es ist noch anzumerken, dass die Länge jedes Trainingsdatensatzes sich je nach Zeitspanne der verfügbaren Grundwasserstands-Beobachtungen an den Messstellen unterscheidet (zwischen 25 und 70 Jahren).

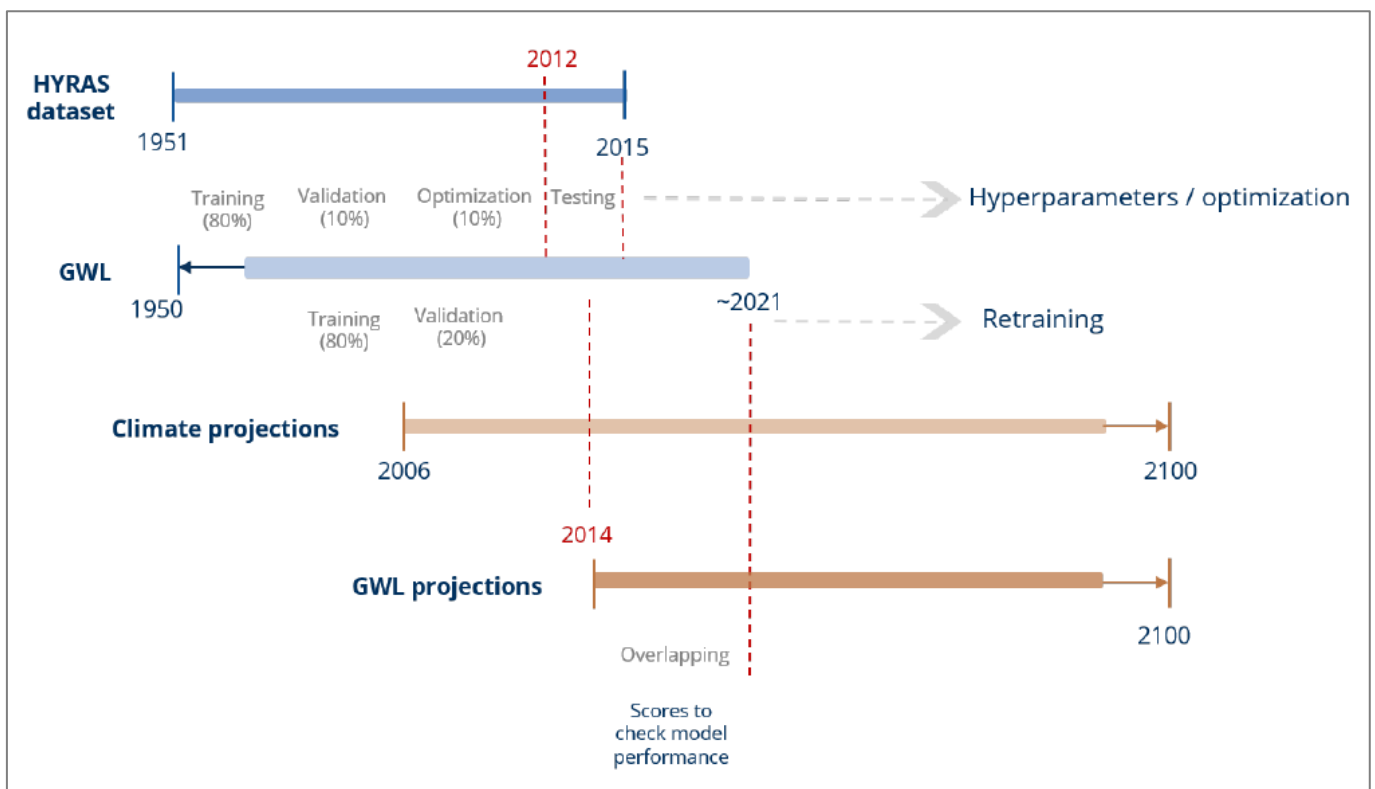


Abbildung 7.55: Aufteilung der Datensätze nach Trainings-, Validierungs- und Optimierungszeiträumen.

In der Validierungsphase wird auf der Grundlage einer Modellgüte geschätzt, wie gut das Modell aus dem Eingabedatensatz lernt. Gleichzeitig wird das Modell anhand dieser Metrik optimiert. Zur Optimierung (Kalibrierung) der internen Modellparameter wird als Gradientenabstiegsverfahren der Adam-Optimierungsalgorithmus verwendet. Dieser ist aufgrund seiner Effizienz in Bezug auf Rechenzeit, Arbeitsspeicher und Implementierung ein häufig verwendeter Algorithmus im Bereich des Maschinellen Lernens. Die Anzahl der Trainingsepochen wurde auf 100 Epochen festgelegt, um robustere Modellergebnisse zu erhalten. Eine Trainingsepoche umfasst einen Trainingsabschnitt, in dem das Modell alle Trainingsdaten einmal prozessiert um seine internen Modellparameter anzupassen. Außerdem wird das Training nach 15 Epochen ohne Verbesserung der Modellgüte abgebrochen (early stopping) um eine Überanpassung des Modells zu vermeiden. In diesem Fall wird der mittlere quadratische Fehler (mean squared error, MSE) durch jede Epoche für den Validierungsprozess minimiert.

Die Hyperparameter-Optimierung zielt auf eine weitere Maximierung der Modellgüte ab. Hier werden die Parameter, die die Modellstruktur und den Lernprozess bestimmen, optimiert. Dies erfolgt mit einer Bayes'schen Optimierung, um die Summe des Pearson-Koeffizienten ( $R^2$ ) und der Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) zu maximieren. Die Optimierung wird mit der Python-Bibliothek BayesianOptimization (Nogueira, 2014) durchgeführt, mit zufälliger Exploration in 20 Schritten, gefolgt von maximal 60 Bayes'schen Optimierungsschritten. Die optimierten Hyperparameter entsprechen: Kernelgröße (3), Sequenzlänge (1-12 Monate), Anzahl der Filter (1-256), Anzahl der Neuronen in der dichten Schicht (1-256) und Batchgröße (1-256). Aufgrund der monatlichen Auflösung des Datensatzes werden die Grenzen der Sequenzlänge zwischen 1 und 12 Monaten festgelegt, einem Zeitbereich, der somit erhebliche Schwankungen in den Teilsequenzen beinhalten kann.

Zur Beurteilung der Modellrobustheit in der Testphase werden auch hier  $R^2$  und NSE verwendet. Um sicherzustellen, dass beide Kennzahlen zwischen 0 und 1 variieren, wird der NSE Null gesetzt, wenn dieser negativ ist, was für die Interpretation relevant ist. Je näher die Werte an 1 liegt, desto höher ist die Ähnlichkeit zwischen modellierter und beobachteter Grundwasserstandszeitreihe, d.h. die Modellgüte. Die Schwellenwerte für die Einstufung eines Modells hängen von der jeweiligen Anwendung ab. Nach einer visuellen Inspektion an einigen Standorten und in Übereinstimmung mit Moriasi et al. (2015) wird ein Wert von  $R^2 > 0,7$  und  $NSE > 0,6$  als eine gute Anpassung angesehen. Für die spätere Langfristsimulation der zukünftigen Grundwasserstände wurden letztlich nur die Modelle für die

Messstellen verwendet, die in der Testphase ein  $R^2 > 0,7$  und  $NSE > 0,6$  aufweisen. Die Preprocessings- und Validierungsstrategie unterscheidet sich zwischen den einzelnen Teilprojekten teils signifikant, weshalb es in der Konsequenz zu abweichenden Anzahlen an Messstellen, die für die Projektion der Grundwasserstände verwendet wurden, in den einzelnen Teilprojekten kommt. In diesem Teilprojekt umfasst das Preprocessing im Wesentlichen Schritte zur Entfernung von Zeitreihen mit sehr langen Datenlücken und dem Auffüllen von Datenlücken aus ähnlichen Zeitreihen von nahegelegenen Messstellen oder weiteren Methoden der Interpolation von Datenlücken.

### 7.3.3 Simulation ausgewählter Kenngrößen

Von den insgesamt über 900 Stationen mit Messdaten wurde während des Preprocessings ein Teil der Zeitreihen aufgrund von Qualitätschecks bezüglich Datenlücken, Ausreißerwerten und Sprüngen im gleitenden Mittelwert aussortiert. An den verbleibenden 505 Messstellen wurden die Grundwasserstandszeitreihen modelliert. Als unterer Grenzwert für die Modellgüte wurde ein  $NSE > 0,6$  und ein  $R^2 > 0,7$  definiert. Aufgrund dieses Filters verbleiben 246 Zeitreihen für die folgende Simulation und Auswertung der Kenngrößen. Abbildung 7.56a zeigt die Lage dieser 246 Messstellen farblich nach der Raumzugehörigkeit. In Abbildung 7.56b ist die Verteilung der Messstellen auf die einzelnen Regionen dargestellt.

Diese Verteilung ist zwischen den einzelnen Regionen sehr unausgewogen. Während die Regionen der Niederungsgebiete und Geestgebiete durch jeweils über 100 Messstellen bzw. Zeitreihen repräsentiert werden, sind es bei den übrigen Regionen der Inseln, Marschen, Börden und Bergland weniger als 5 Messstellen. Für die weitere Auswertung bedeutet dies, dass für diese letztgenannten Regionen keine verallgemeinernden Aussagen getroffen werden können, da die Anzahl an Messstellen zu gering ist.

Analog zu den anderen Teilprojekten wurden alle in Tabelle X aufgelisteten Kenngrößen sowohl für den simulierten Referenzzeitraum (1981 bis 2010) als auch für die beiden größtenteils in der Zukunft liegenden Zeiträume nahe Zukunft (2021 bis 2050) und ferne Zukunft (2071 bis 2100) berechnet. Angaben zu der Änderung dieser Kenngrößen in diesen beiden Zeiträumen sind immer auf den Referenzzeitraum bezogen. Der Quellcode für die Berechnung der Kenngrößen ist auf Github verfügbar: <https://github.com/MxNI/klibiwinds/releases/tag/v0.0.1>

Für die folgende Diskussion der Ergebnisse sowie für die Abbildungen wird eine verringerte Anzahl von 7 Kenngrößen als Kernkenngrößen verwendet, um diese Auswertung darstellbar und übersichtlich zu halten.

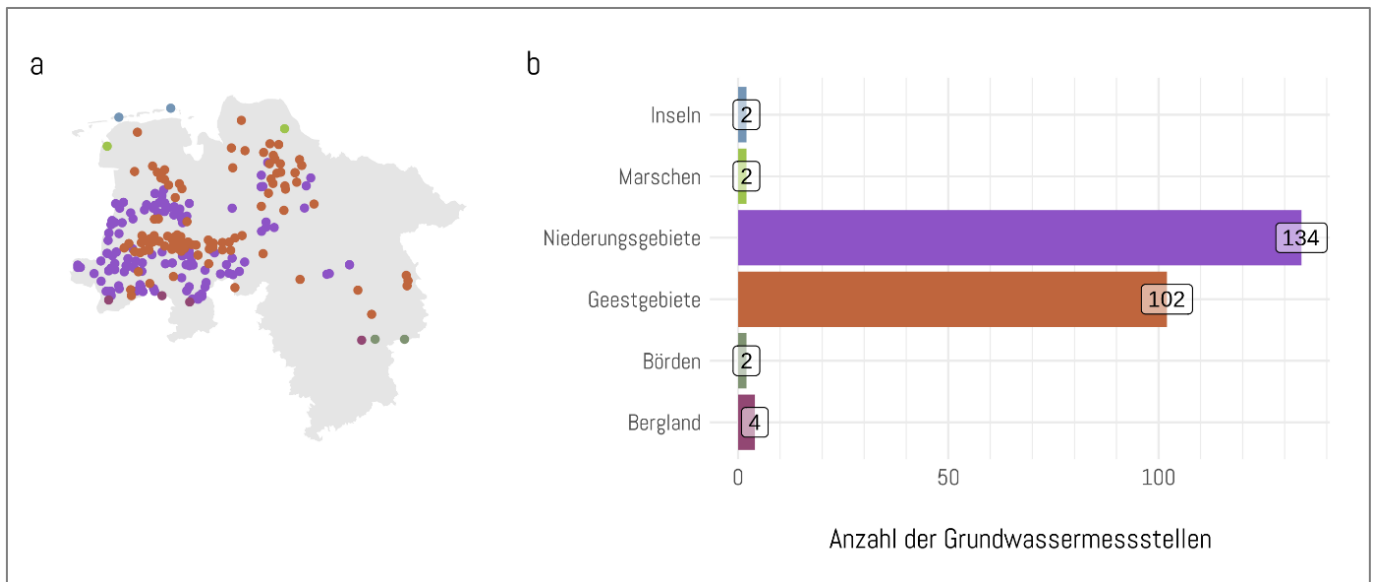


Abbildung 7.56: Lage der Messstellen an denen Grundwasserstände bis zum Jahr 2100 projiziert wurden (a). Verteilung der Messstellen auf die Regionen (b).

### Bandbreite der absoluten Kenngrößenänderung

In Abbildung 7.57 ist die Bandbreite der absoluten Änderung der Kernindikatoren dargestellt. Daraus lässt sich für die Regionen der Niederungs- und Geestgebiete eine im mathematischen (nicht im wertenden) Sinne positive mittlere Veränderung der Kernkenngößen ableiten (Punkte liegen überwiegend rechts der gestrichelten Nulllinie). Dieser Trend setzt sich über beide Zeiträume fort. Die einzige Ausnahme bildet die Kenngröße Mittelwert der jährlichen Minima. Hier kommt es zu einer negativen Veränderung, d.h. die mittleren Jahrestiefststände sinken zukünftig um wenige Zentimeter bezogen auf m ü. NHN. Die Spannbreite der Extremwerte liegt überwiegend auf der Seite der negativen (sinkenden) Veränderung. Für die mittlere Veränderung der einzelnen Kenngrößen gilt: Der Mittelwert der jährlichen Maxima über die jeweiligen 30-jährigen Zeiträume, also der mittlere Jahreshochstand, bleibt im Mittel über alle Messstellen nahezu unverändert und steigt nur um wenige Zentimeter in der fernen Zukunft in den Geestgebieten. Die Extremwerte der Veränderung liegen hier relativ symmetrisch um die Nulllinie zwischen ca. 0,4m Veränderung in beide Richtungen. Auch die mittlere Jahresamplitude weist eine mittlere Vergrößerung um bis zu 15 cm auf. Die Gesamtsumme der Hochstandmonate verändert sich in naher Zukunft kaum und erhöht sich in ferner Zukunft um ca. 15 Monate. Diese Erhöhung entspricht ca. 4% der Gesamtanzahl von Monaten in dem 30-jährigen Zeitraum. Bei der Gesamtsumme der Niedrigstandmonate zeigt sich die Veränderung etwas deutlicher. Hier kommt es zu einem Anstieg der Niedrigstandmonate um über 25 Monate in der fernen Zukunft in den Niederungsgebieten. Unter der Annahme, dass die Hoch- und Tiefstandmonate tendenziell aufeinanderfolgen, d.h. konsekutiv stattfinden, bedeutet diese Zunahme längere Trockenperioden sowie längere feuchte Perioden. Der mittlere Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums bzw. -maximums verschiebt sich um ein bis

knapp zwei Wochen nach hinten, d.h. später im Jahr. Diese Verschiebung fällt bei den Niederungsgebieten etwas stärker aus als bei den Geestgebieten.

Neben den mittleren Änderungen zeigen auch die Spannbreiten, also die auf Basis des Klimamodell-Ensembles simulierten Minima und Maxima der Kenngrößen diese generelle Tendenz hin zu größeren Extremwerten. Bei fast allen Kenngrößen sind die Spannbreiten der Geestgebiete größer als die der Niederungsgebiete.

### Räumliche Verteilung

Die Abbildung 7.58 bis Abbildung 7.64 zeigen die räumliche Verteilung der absoluten Änderung der 7 Kernindikatoren für die zwei Zeiträume, jeweils für das Minimum, den Mittelwert und das Maximum über die verschiedenen Projektionen des Grundwasserstandes auf Basis der verschiedenen Klimamodelle. In diesem Teilprojekt wurde eine Auswahl an fünf Klimamodellsimulationen aus den insgesamt acht Simulationen gewählt, um zum einen die Rechenzeit zu reduzieren als auch da die räumliche Abdeckung von den nicht gewählten Simulationen manche der Messstellen nicht beinhaltete. Diese verringerte Auswahl umfasst jeweils mindestens eine Simulation eines der fünf globalen Modelle, sodass die Varianz aufgrund der globalen Klimamodelle abgedeckt ist. Zusammenfassend ist hier zu erkennen, dass die Werte der Änderung der Kenngrößen überwiegend räumlich korrelieren, d.h. dass benachbarte Messstellen tendenziell ähnliche Werte (Punktgruppen ähnlicher Farbe) aufweisen verglichen mit weiter entfernten Messstellen bzw. dass regional ähnliche Trends zu sehen sind. Eine Ausnahme davon zeigt sich beispielsweise bei der Gesamtsumme der Hochstandsmonate, besonders beim Mittelwert für den Zeitraum der fernen Zukunft. Hier liegen Messstellen mit negativer Änderung (rote Punkte) in Nachbarschaft von Messstellen mit positiver Änderung

(blaue Punkte). Im Folgenden werden nur besonders ersichtliche Eigenschaften der räumlichen Verteilungen beschrieben. Auf der Mehrheit der in Abbildung 7.58 bis Abbildung 7.64 dargestellten Änderungen sind die betragsmäßig größten Änderungen im Bereich der Ems-Hunte-Geest und Dümmer-Geestniederung zu finden, sprich im westlichen Teil Niedersachsens. Ebenso spiegelt sich hier die im Mittel positive Änderung der meisten Kenngrößen aus Abbildung 7.57 wider (Farbton der Mittelwert- Karten und Farbton der Maxima-Karten liegt jeweils im blauen Bereich). Ausnahme hiervon bilden wie bereits zuvor erwähnt die Veränderungen beim Grundwassertiefststand, wo mittlere und minimale Veränderungen im roten Bereich liegen und eine entsprechende Abnahme der Kenngröße anzeigen.

### **Änderung des Jahresgangs**

Die Änderung des mittleren Jahresgangs über die zwei Zeiträume der nahen und fernen Zukunft ist in Abbildung 7.65 dargestellt. Für die bessere Vergleichbarkeit der Dynamik zwischen den einzelnen Regionen wurden die Grundwasserstände durch Subtraktion des Mittelwertes zentriert. Wie weiter oben begründet, beschränkt sich die folgende Beschreibung auf die Niederungsgebiete und Geestgebiete. Die Form und Amplitude des mittleren Jahresgangs dieser beiden Regionen ist für den Referenzzeitraum (gestrichelte Linie) sehr ähnlich mit einem Maximum der Grundwasserstände im Mai und einem Minimum im November, wobei die Grundwasserstände in den Niederungsgebieten im Dezember bereits wieder ansteigen, während sie in den Geestgebieten noch gleich niedrig bleiben und erst im Januar wieder zunehmen. Die Amplitude beträgt ca. 60 cm. Für beide Regionen zeigt sich, dass die Grundwasserstände in den Frühlingsmonaten im Mittel unverändert bis geringfügig höher (blau) als im Referenzzeitraum sein werden und die negative Änderung der Grundwasserstände im Herbst/Winter etwas größer ausfallen wird (rot). Dadurch nimmt die mittlere Jahresamplitude für die Geestgebiete insgesamt etwas zu auf rund 70 cm zu.



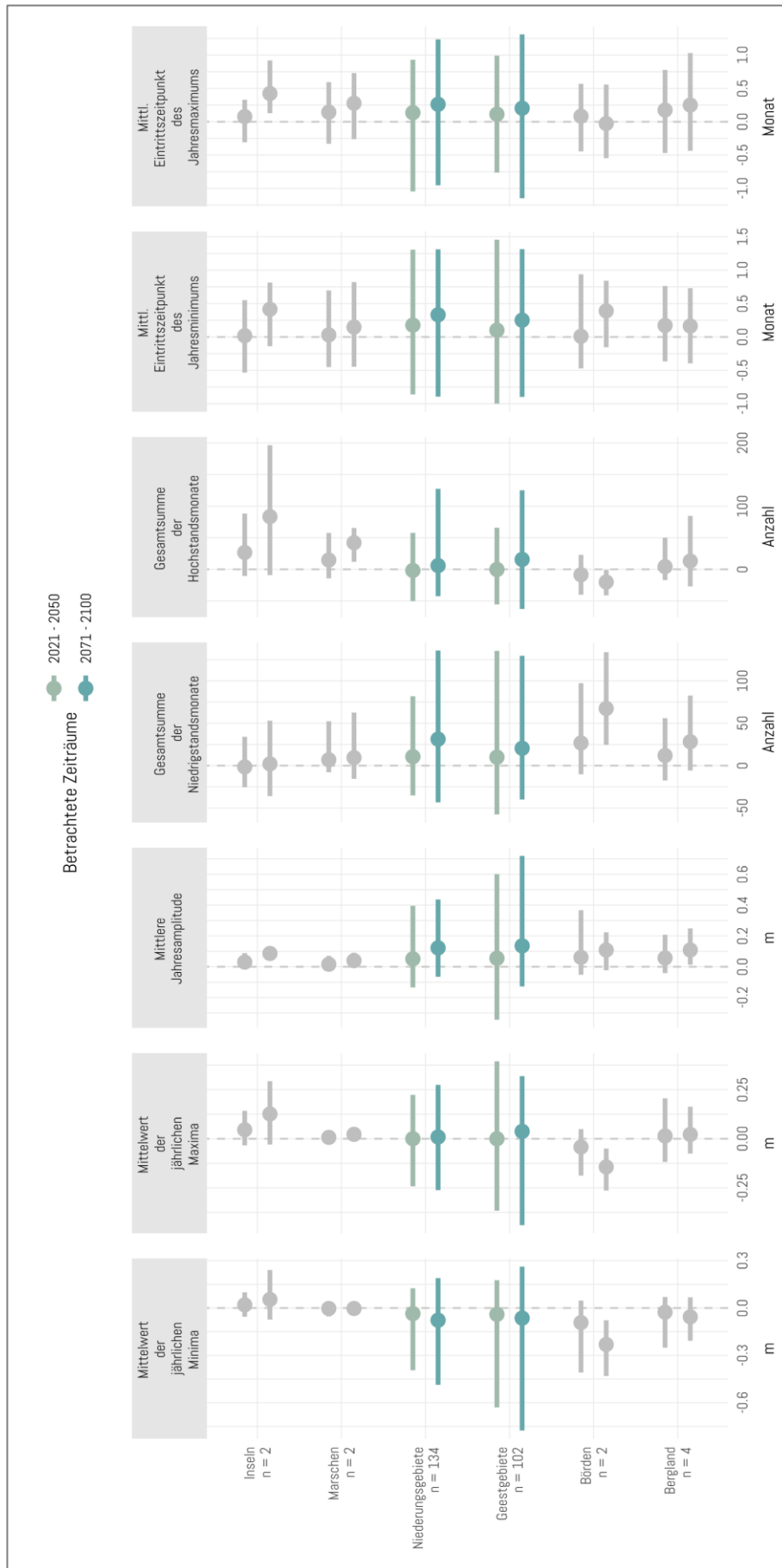


Abbildung 7.57: Spannweite der absoluten Änderung der jeweiligen Kerngröße in Bezug auf den Referenzzeitraum (1981 – 2010). Die Anzahl der Messstellen je Raum wird durch n angegeben. Beispielsweise heißt n = 134, dass die Darstellung der Bandbreite dieser Kerngrößen auf 134 Messstellen mit je 5 Klimaprojektionen basiert. Regionen mit nicht repräsentativer Anzahl an Messstellen sind in grau dargestellt.

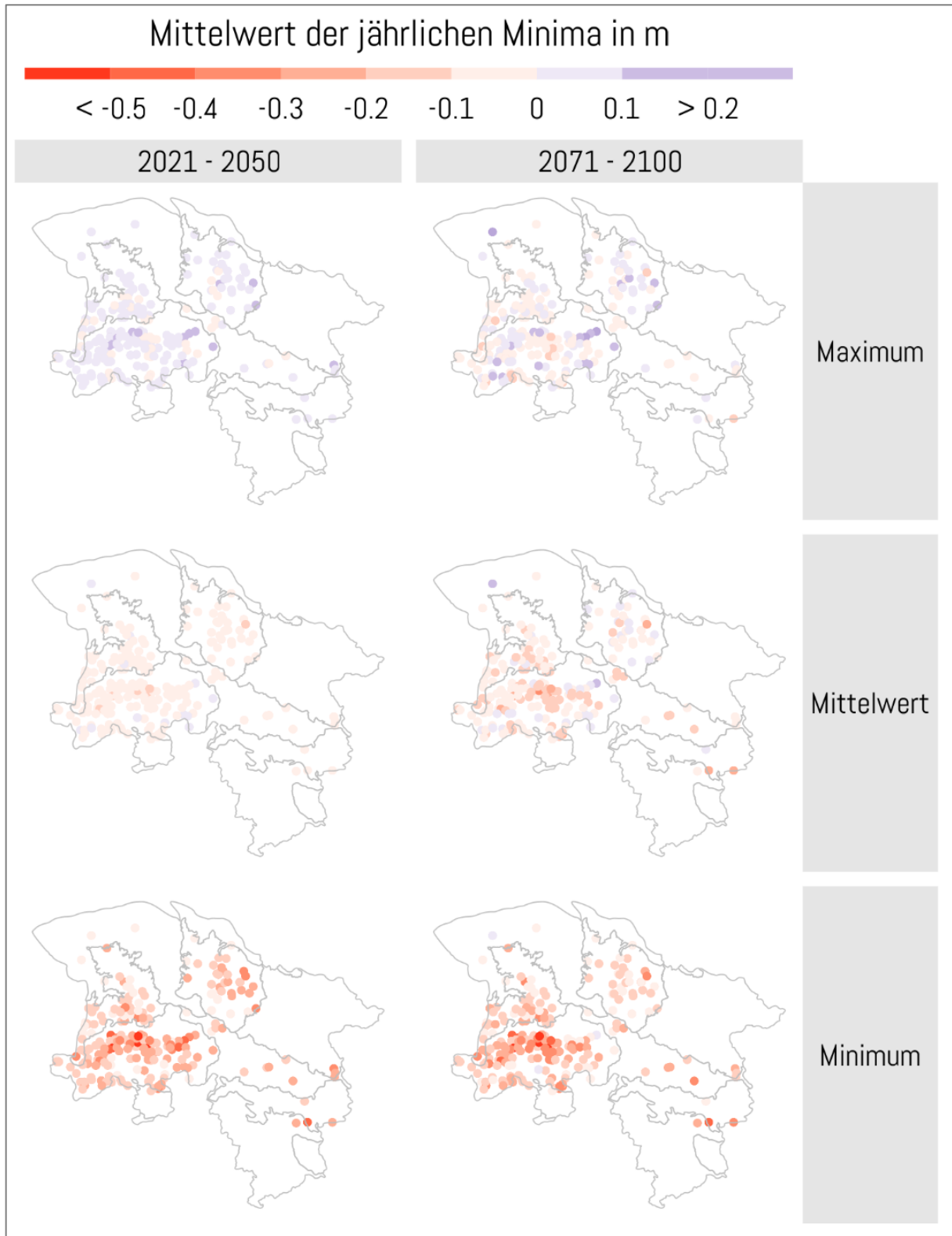


Abbildung 7.58: Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den mittleren Jahrestiefstand gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle.

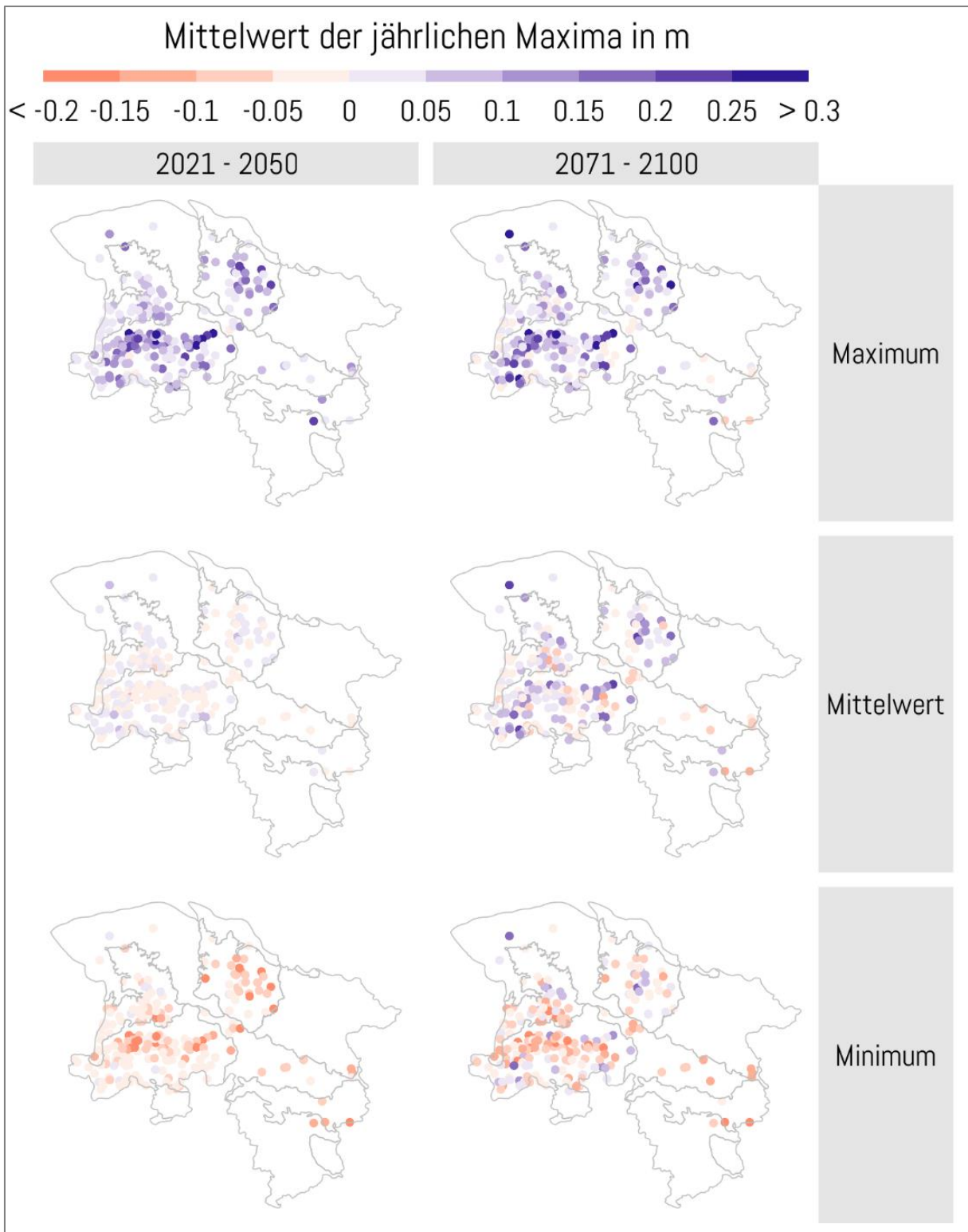


Abbildung 7.59 Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den mittleren Jahreshochstand gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle.

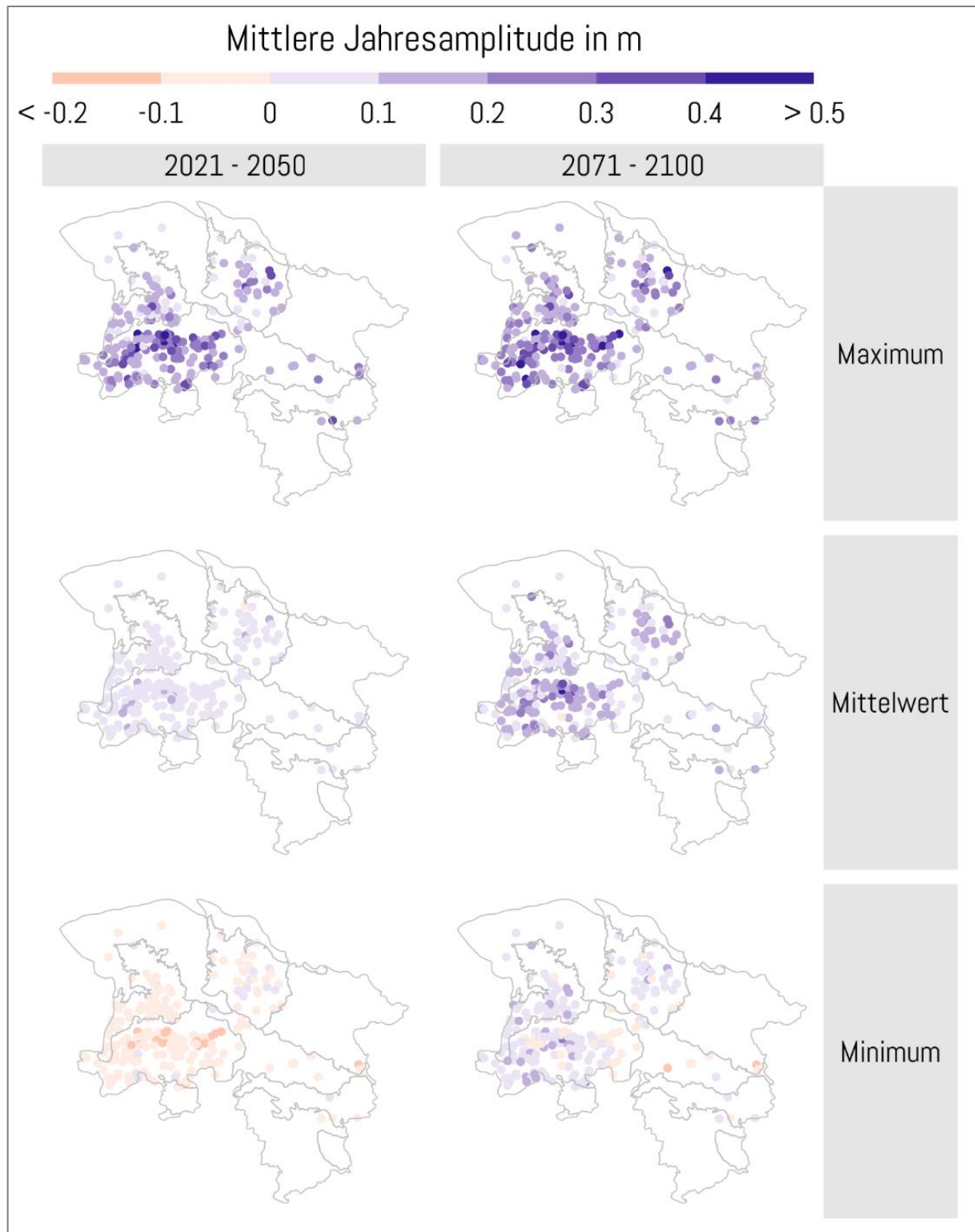


Abbildung 7.60 Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den mittleren Jahresamplitude gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle.

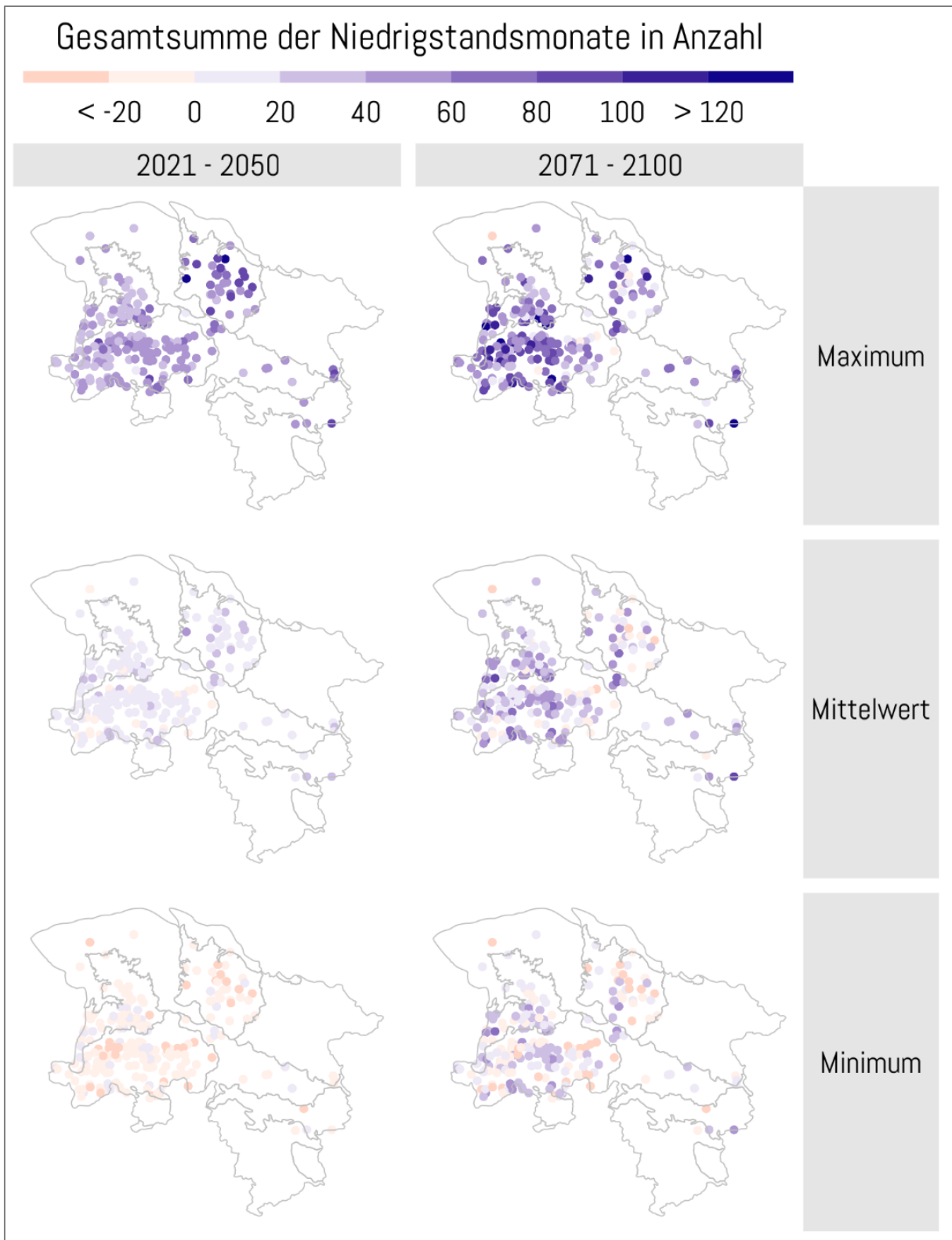


Abbildung 7.61: Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für die Anzahl der Monate mit Grundwasserniedrigstand gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle.

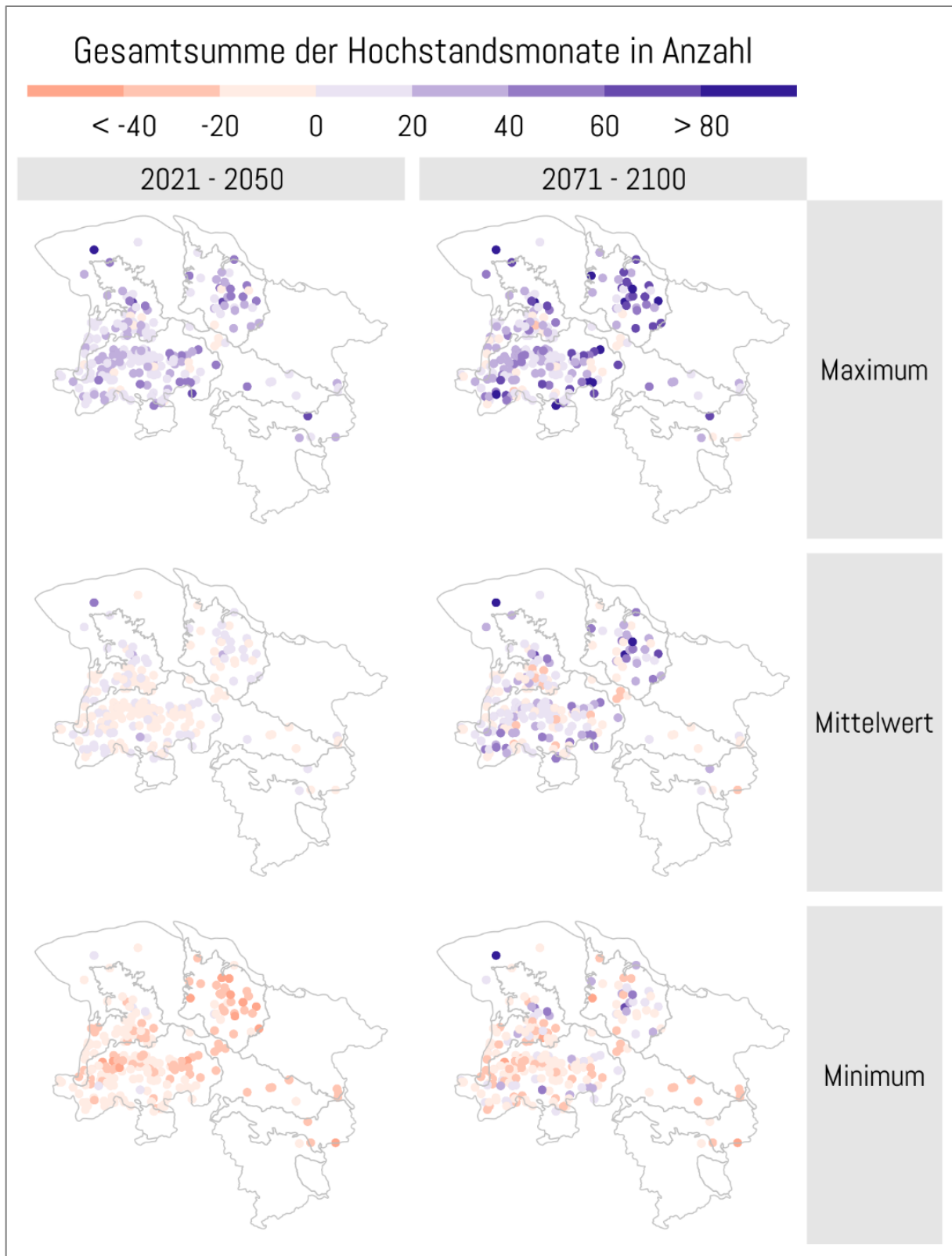


Abbildung 7.62: Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für die Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle.

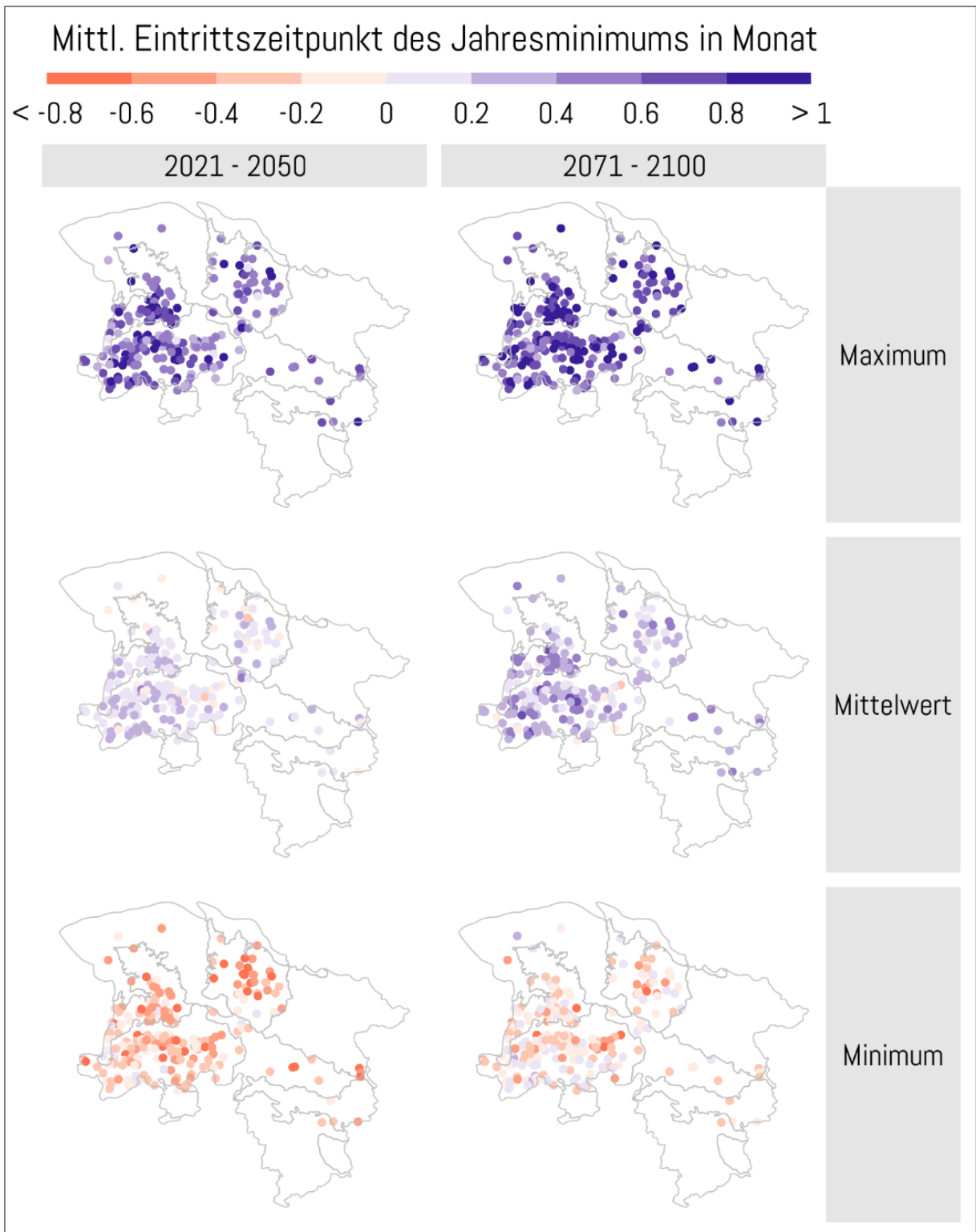


Abbildung 7.63 Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den mittleren Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle.

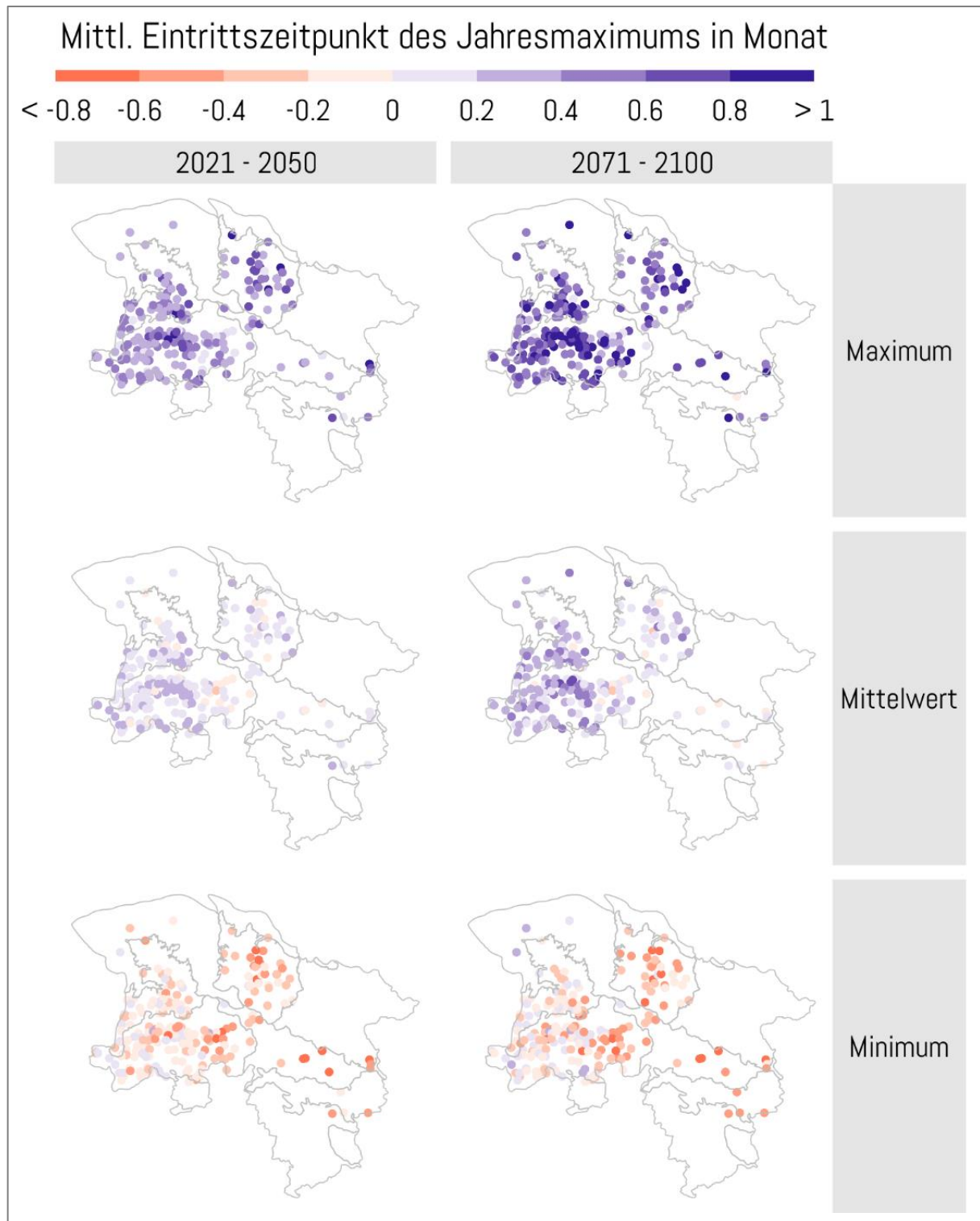


Abbildung 7.64: Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den mittleren Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle.



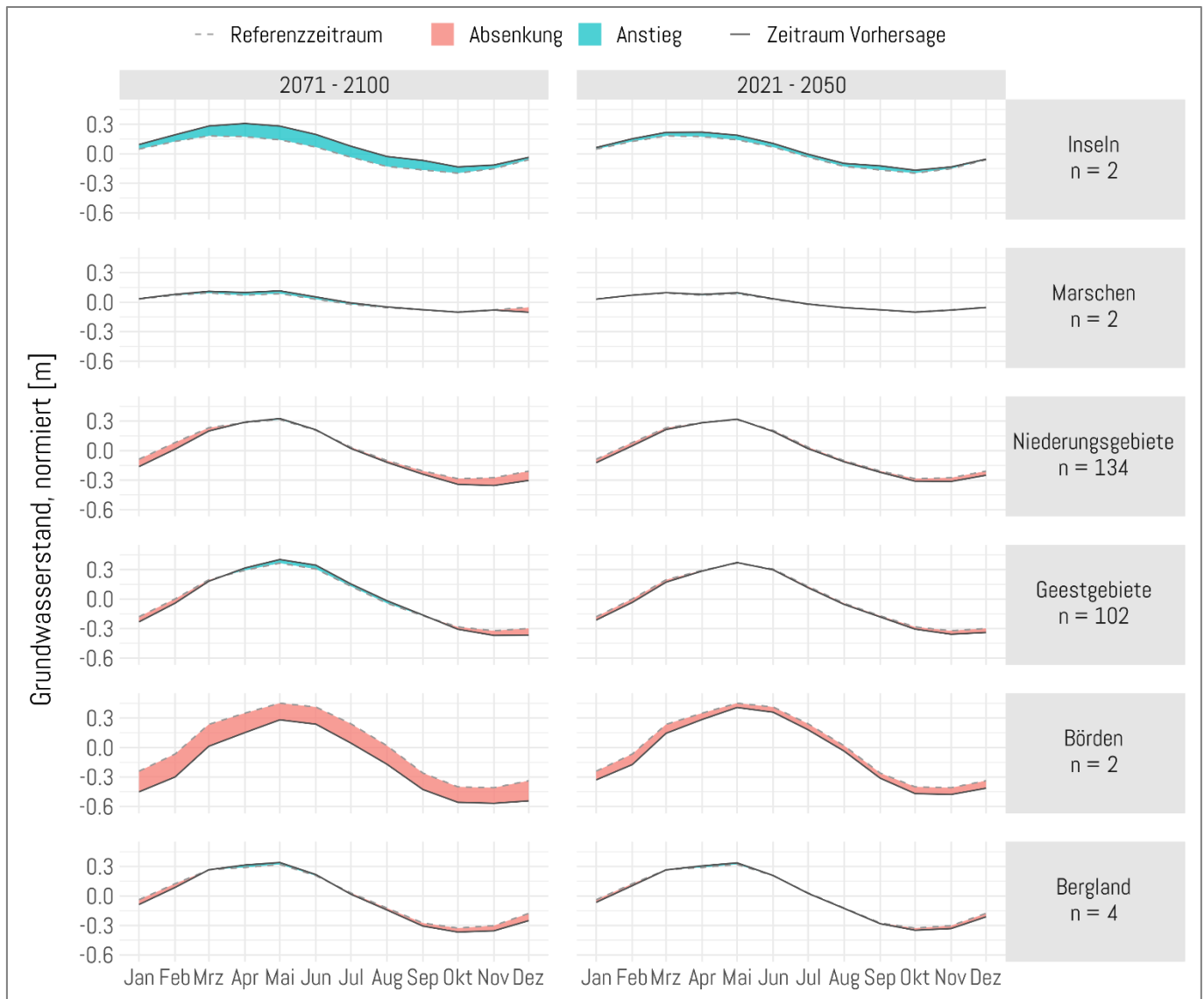


Abbildung 7.65: Änderung des Jahresgangs bzw. der intra-jährlichen Grundwasserstandsdynamik für die nahe bzw. ferne Zukunft unterteilt nach Regionen.

### 7.3.4 Zusammenfassung

Die Zeitreihen von Grundwasserständen wurden durch ein 1-D CNN an 246 Grundwassermessstellen auf Basis eines Klimamodell-Ensembles bis in das Jahr 2100 projiziert. Auf Basis dieser projizierten Grundwasserstandszeitreihen wurden für die zwei definierten Zeiträume der nahen (2021 bis 2050) und fernen (2071 bis 2100) Zukunft Kenngrößen sowie deren absolute und relative Änderung in Bezug auf den Referenzzeitraum (1981 bis 2010) berechnet und teilweise anhand der Zugehörigkeit der Messstellen zur ausgewählten Raumgliederung dargestellt. Aufgrund der geringen Anzahl von Messstellen in manchen dieser Regionen, wurden die Ergebnisse nur für die Regionen Niederungsgebiete sowie Geestgebiete beschrieben. Zusammenfassend zeigt sich hier eine überwiegende Zunahme der Extremwerte (d.h. mittlerer Jahrestief- und hochstand) bzw. eine Ausweitung von Trockenperioden und feuchteren Perioden. Die zeitliche Ausweitung dieser Extremsituationen kann zu starken Veränderungen der hydrologischen Prozesse führen, die im Modell nicht abgebildet sind, wie z.B. langfristige Auswirkungen durch

lange Dürreperioden auf Ökosysteme und Vegetation. Das Maß dieser Zunahme ist für die meisten Kenngrößen im Mittel relativ gering, kann im Fall einzelner Messstellen aber eine deutliche Veränderung der bisher beobachteten Verhältnisse mit sich bringen und nimmt von der nahen in die ferne Zukunft tendenziell zu. Dabei zeigen sich teilweise große Spannbreiten zwischen den Minima und Maxima, die vor allem in Bezug auf den Eintrittszeitpunkt von Jahresminima und Jahresmaxima kaum eine eindeutige Richtungstendenz belegen.

## 7.4 Modellierung zukünftiger Grundwasserstandsveränderungen mit Hilfe von Grundwasserströmungsmodellen (Teilprojekt D)

In diesem Teilprojekt wurden zwei dreidimensionale numerische Grundwasserströmungsmodelle verwendet, um mit Hilfe von projizierten Grundwasserneubildungsdaten zukünftige Grundwasserstandsveränderungen an insgesamt 14 Grundwassermessstellen zu simulieren. Die Anwendung solcher physikalisch basierten Modelle stellt ein etabliertes Verfahren zur Beantwortung hydrogeologischer und geohydraulischer Fragestellungen dar. Für den Einsatz dieser Modelle sind umfassende Datengrundlagen und Kenntnisse der mitunter komplizierten Geologie sowie der hydrogeologischen Verhältnisse des Modellgebietes von grundlegender Bedeutung. Nach erfolgtem Aufbau und Kalibrierung eines Modells können Prognoserechnungen zu verschiedensten wasserwirtschaftlichen Fragestellungen durchgeführt werden, indem zum Beispiel Randbedingungen entsprechend eines Szenarios verändert werden. Strömungsmodelle finden unter anderem zur Berechnung von Grundwasserabsenkungen, zur Ermittlung von Grundwassereinzugsgebieten für Trinkwasserfassungen und zur Bemessung von Wasserschutzgebieten Anwendung (DVGW, 2016).

### 7.4.1 Modellbeschreibung

In diesem Abschnitt werden die im Teilprojekt D verwendeten numerischen Grundwasserströmungsmodelle beschrieben. Es handelt sich dabei um zwei mittelmaßstäbliche Planungsmodelle (nach DVGW, 2016), die für die Modellierung zukünftiger Grundwasserstandsveränderungen erstellt bzw. angepasst wurden. Dabei wurden im Rahmen dieses Projektes ein zur Verfügung stehendes Modell erweitert und ein weiteres dreidimensionales Grundwasserströmungsmodell neu erstellt.

In den folgenden Beschreibungen der beiden Modelle wird auf eine detaillierte Dokumentation zur Erstellung der Modelle verzichtet, da der Fokus in dieser Arbeit auf den Ergebnissen und dem Vergleich der projizierten Grundwasserstände liegt. Die Grundwasserströmungsmodelle nehmen in diesem Rahmen die Rolle von Wirkmodellen ein, die mit projizierten Klimadaten zukünftige Grundwasserstandsveränderungen simulieren. Mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells mGROWA18 (Ertl et al., 2019) wurden anhand der Klimaprojektionsdaten (Niederschlag, Temperatur etc.) zunächst Projektionen der Grundwasserneubildung erstellt. Diese Grundwasserneubildungsdaten gehen nun wiederum als Eingangsdaten in die Strömungsmodelle ein.

### 7.4.1.1 Sandelermöns

Das dreidimensionale Grundwasserströmungsmodell Sandelermöns (Abbildung 7.67) wurde im Rahmen einer Masterarbeit (SCHLINSOG, 2015) erstellt und für dieses Projekt entsprechend angepasst und nachkalibriert. Im Modellgebiet befinden sich sechs der in KliBiW7 ausgewählten Messstellen, welche möglichst anthropogen unbeeinflusst sein sollen. Ursprünglich wurde das Modell mit der Modellierungssoftware FEFLOW 6.2 (DHI-WASY, 2014) aufgesetzt, alle neueren Arbeiten daran wurden mit der Version 7.4 (DHI, 2020) durchgeführt. FEFLOW ist ein Softwarepaket zur Berechnung von Wasserströmung, Massen- und Wärmetransport in porösen und geklüfteten Medien nach dem Prinzip der Finiten-Elemente.

Das Modellgebiet befindet sich in Küstennähe ca. 20 km östlich von Wilhelmshaven. Es liegt in den hydrogeologischen Räumen der Oldenburgisch-Ostfriesischen Geest und der Ostfriesischen Marsch (ELBRACHT et al., 2016) und kann der im Rahmen von KliBiW7 festgelegten Naturregionen der Geestgebiete und den Marschen zugeordnet werden (Abbildung 7.66). Die Größe des Modellraumes beträgt ca. 215 km<sup>2</sup> mit einer maximalen Ausdehnung von Nord nach Süd von ca. 18 km und von Ost nach West von 17 km. Die Modellumrandung orientiert sich dabei an dem Trinkwasserschutzgebiet des Wasserwerkes Sandelermöns sowie an dessen Förderbrunnengalerie und wurde maßgeblich anhand von Grundwassergleichen festgelegt. Bei der räumlichen Diskretisierung fanden die Hauptgewässer und die Förderbrunnen besondere Berücksichtigung, was einschließlich der Diskretisierung in Z-Richtung (in der Tiefe) zu einer Gesamtzahl von ca. 1,15 Mio. Netzknoten führt. Die maximale vertikale Ausdehnung beträgt dabei 204 m. Zur Umsetzung der Hydrogeologischen Modellvorstellung in das numerische Strömungsmodell stand ein bereits fertiges geologisch-hydrogeologisches Modell des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes aus dem Jahr 2015 zur Verfügung, woraus eine Einteilung in sechs Modell-Layer resultierte (siehe Tabelle 7.5). Als Randbedingungen wurden am östlichen und westlichen Modellrand aus Messwerten interpolierte Grundwassergleichen als feste Druckhöhen (Dirichlet Randbedingung) eingesetzt. Die Grundwasseroberfläche am östlichen Rand wurde mit 7 m und die am westlichen Rand mit 0 m über NHN angenommen. Die nördliche und südliche Begrenzung wurde durch sogenannte Randstromlinien dargestellt, bei denen weder ein Zu- noch Abstrom ins Modellgebiet vorliegt. Die im Modell befindlichen Hauptgewässer wurden über die sogenannte Cauchy-Randbedingung integriert, wobei deren Flusswasserstände über ein DGM stationär abgeleitet wurden. Die im Modellgebiet liegenden Trinkwasserförderbrunnen des Wasserwerkes Sandelermöns wurden als „Multilayer Wells“, d.h. filterstreckengenau, im Modell berücksichtigt. Insgesamt handelt es sich um 25 Brunnen, die im oberen und unteren Hauptgrundwasserleiter (Layer 4 und 6, Tabelle 7.5) verfiltert

sind. Zur Vervollständigung des Modellaufbaus wurden entsprechende Materialeigenschaften der Grundwasserleiter und -nichtleiter in Form von Durchlässigkeitsbeiwerten (kf-Werten) und effektiven Porositäten nach Literaturangaben (REUTTER, 2011 und HÖLTING & COLDEWEY, 2013) vordefiniert. Die Anfangswerte der Grundwasseroberfläche

wurden aus Messwerten interpoliert. Die Grundwasserneubildung aus mGROWA18 (ERTL et al., 2019) wurde flächendifferenziert im Modell berücksichtigt und entsprechend der stationären oder instationären Kalibrierung als Monatsmittelwert eingeladen.

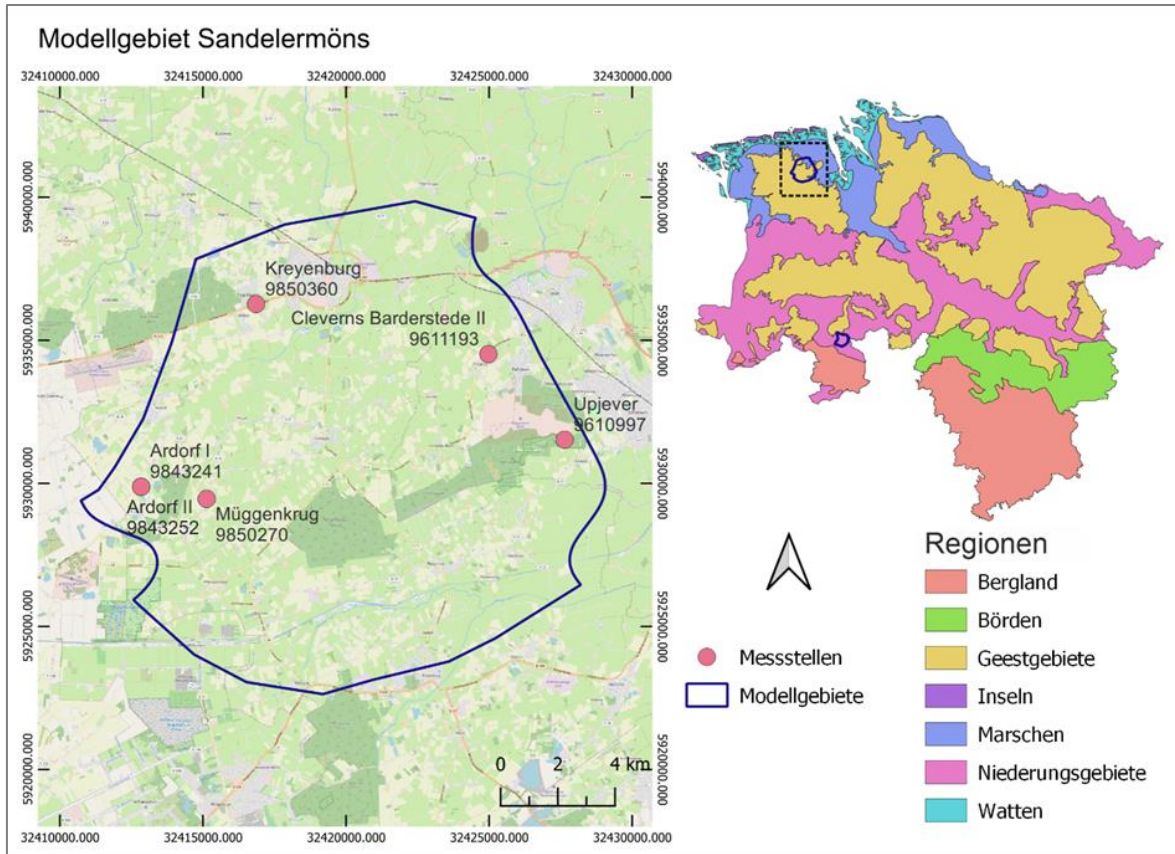


Abbildung 7.66: Links: Modellgebiet und Messstellen des Strömungsmodells Sandelermöns. Rechts: Lage der Modellgebiete der Strömungsmodelle in den Naturregionen.

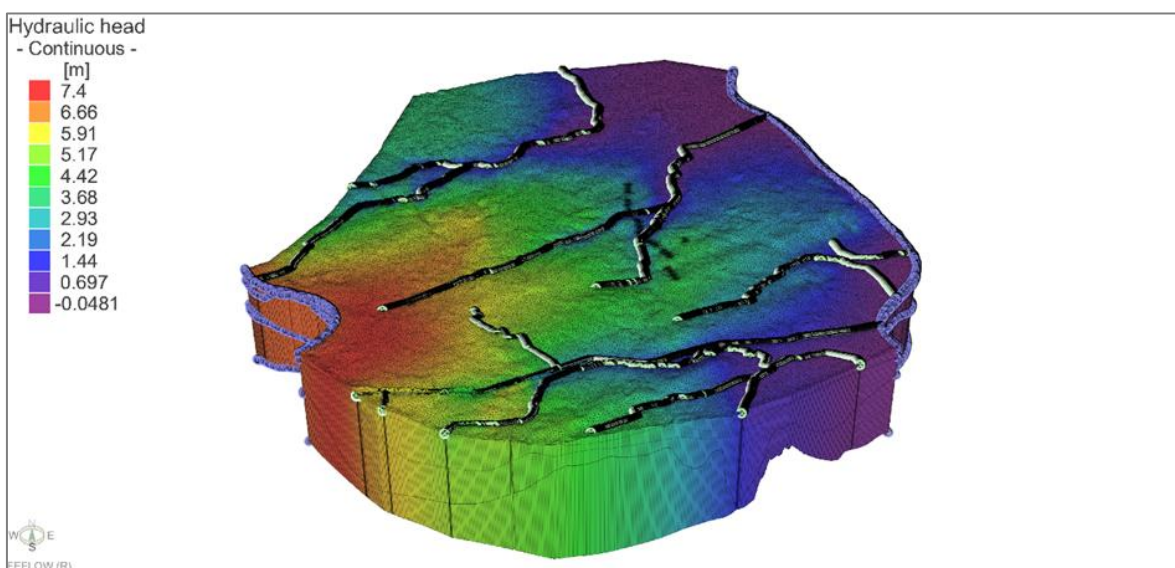


Abbildung 7.67: Darstellung des dreidimensionalen Strömungsmodells Sandelermöns. Die Abbildung ist mit einer 25-fachen Überhöhung in Z-Richtung dargestellt. Gezeigt werden die Lage der Grundwasseroberfläche in m NHN (Legende) und die verwendeten Randbedingungen. Bei Letzteren bilden die blauen Kreise die Dirichlet-Randbedingung und die grünen Kreise die Cauchy-Randbedingung ab.

#### 7.4.1.2 Vörden-Hunteburg

Das dreidimensionale Grundwasserströmungsmodell Vörden-Hunteburg (Abbildung 7.69) wurde im Rahmen dieses Projektes neu erstellt. Ausschlaggebend für die Wahl dieses Modelgebietes war das Vorhandensein eines dreidimensionalen geologischen Strukturmodells für dieses Gebiet. Neben den vorhandenen detaillierten geologischen Informationen konnten insgesamt acht der in KliBiW7 ausgewählten Messstellen berücksichtigt werden, welche möglichst anthropogen unbeeinflusst sein sollen. Die Erstellung des Modells fand mit FEFLOW in der Version 7.5 (DHI, 2021) statt.

Das Modellgebiet befindet sich ca. 25 km nordöstlich von Osnabrück im Bereich der Ortschaft Hunteburg. Es liegt in den hydrogeologischen Räumen der Niederungen im nord- und mitteldeutschen Lockergesteinsgebiet sowie des Nord- und mitteldeutschen Mittelpleistozän (ELBRACHT et al., 2016). Nach Aufteilung in Naturregionen befindet sich das Modellgebiet in den Niederungsgebieten (Abbildung 7.68). Der Modellraum weist sowohl in nordsüdlicher als auch in ostwestlicher Ausdehnung eine maximale Länge von ca. 10 km auf, woraus sich eine Fläche von ca. 61 km<sup>2</sup> ergibt. Die Abgrenzung des Modellgebietes orientiert sich im Westen an der Grenze des Grundwasserkörpers „Hunte Lockergestein links“. Im Norden und Osten begrenzen die Vorfluter Bornbach und Hunte das Modellgebiet. Im Süden wird das Modell durch die 45 m Grundwassergleiche der Hydrogeologischen Karte – Lage der Grundwasseroberfläche (NIBIS®, 2022a) abgegrenzt und der südwestliche Modellrand wird durch eine Randstromlinie dargestellt. Das Modellgebiet wurde so gewählt, dass es keine Förderbrunnen zur Trinkwassergewinnung enthält. Bei der Netzgenerierung zur räumlichen Diskretisierung wurden sowohl Hauptgewässer, Nebengewässer als auch Entwässerungsgräben durch eine entsprechende

Verfeinerung des Modellgitters berücksichtigt. Das Modell bildet in vertikaler Richtung eine maximale Tiefe von 84 m ab und ist in insgesamt 14 Layer unterteilt (Tabelle 7.7), woraus sich eine Gesamtzahl von ca. 3,1 Mio. Netzknoten ergibt. Die hydrogeologische Modellvorstellung konnte durch Verwendung des detaillierten geologischen 3D-Modells Vörden-Hunteburg (NIBIS®, 2022b) erarbeitet und in FEFLOW umgesetzt werden. Die Zuweisung der einzelnen geologischen Einheiten zu den im numerischen Strömungsmodell definierten Layern der Grundwasserleiter und -nichtleiter kann der Tabelle 7.7 entnommen werden. Der südliche Rand des Modellgebietes wurde entsprechend der zur Abgrenzung herangezogenen Hydrogeologischen Karte – Lage der Grundwasseroberfläche (NIBIS®, 2022a) mit einer Dirichlet-Randbedingung von 45 m definiert. Alle im Modell implementierten Flüsse wurden mit einer Transfer Randbedingung (Cauchy-Randbedingung) belegt. Die Flusswasserstände dazu wurden aus dem DGM1 (LGLN 2019) abgeleitet und mit den mittleren Wasserständen der Oberflächengewässerpegel Hunteburg an der Elze und Dievenmoor (NLWKN Landesdatenbank) am Bornbach abgeglichen. Ebenfalls wurde der ca. 1 km außerhalb des Modellgebietes in nordöstlicher Richtung gelegene Pegel Schäferhof an der Hunte zum Abgleich herangezogen (NLWKN, 2022). Die vor der Kalibrierung definierten Ausgangswerte der Materialeigenschaften, wie kf-Werte und effektive Porositäten, konnten aus REUTTER (2011), HÖLTING & COLDEWEY (2013) und MENGELING (1994) für die einzelnen Grundwasserleiter und -nichtleiter entnommen werden. Die Anfangswerte der Grundwasseroberfläche wurden zuerst aus Messwerten interpoliert und später durch kurze instationäre Simulationen des gewählten Monats erzeugt. Die Grundwasserneubildung aus mGROWA18 (ERTL et al., 2019) wurde flächendifferenziert im Modell eingeladen und entsprechend stationär oder instationär als Monatsmittelwert berücksichtigt.

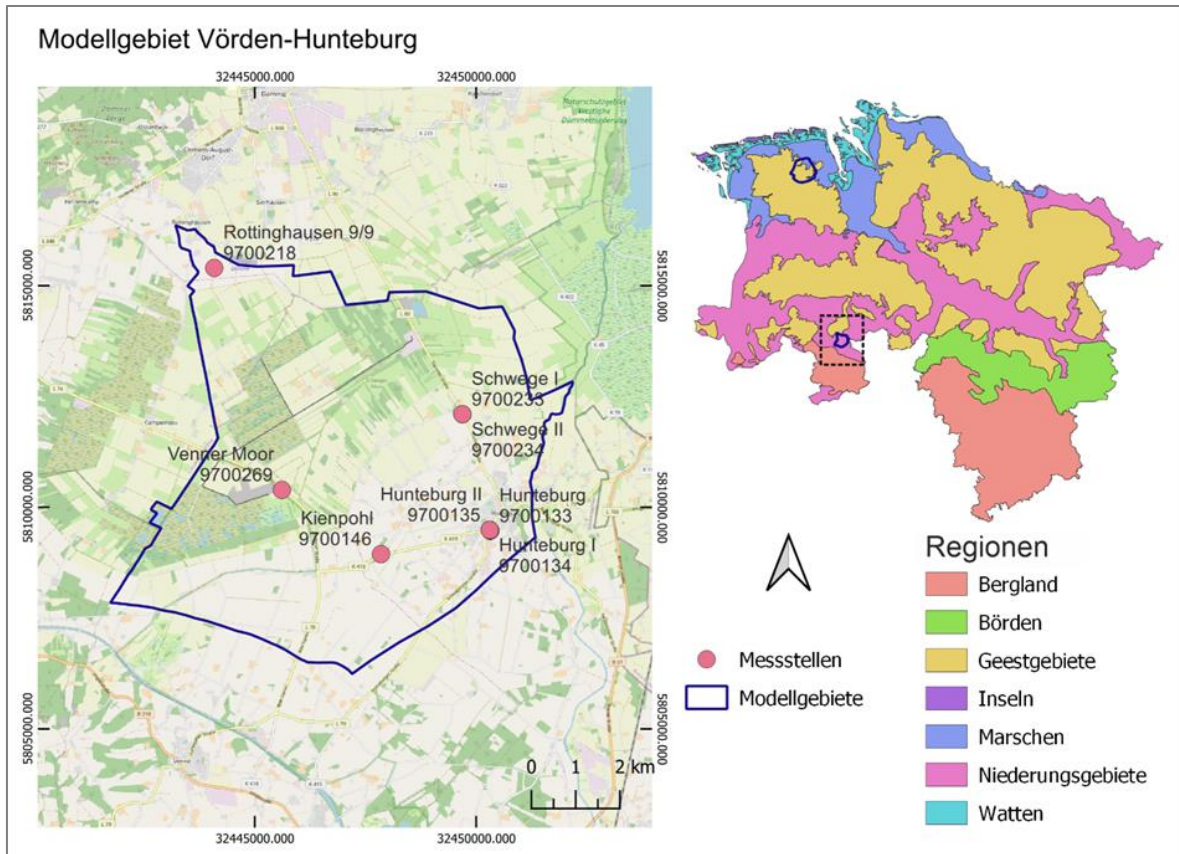


Abbildung 7.68: Links: Modellgebiet und Messstellen des Strömungsmodells Vörden-Hunteburg. Rechts: Lage der Modellgebiete der Strömungsmodelle in den Naturregionen.

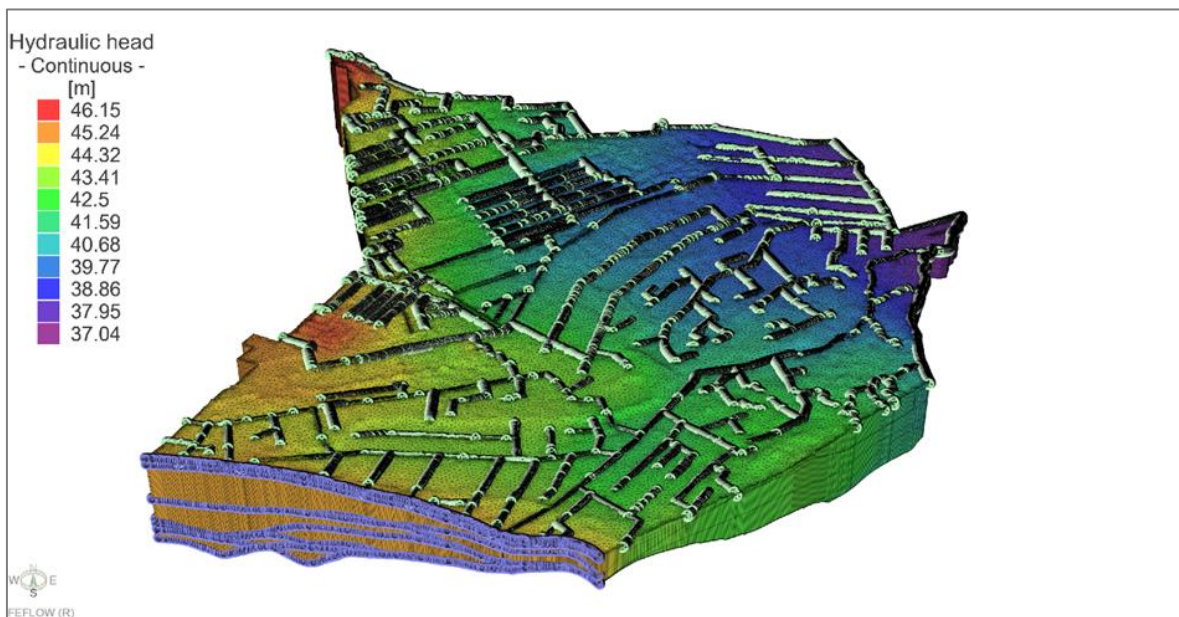


Abbildung 7.69: Darstellung des dreidimensionalen Strömungsmodells Vörden-Hunteburg. Die Abbildung ist mit einer 25-fachen Überhöhung in Z-Richtung dargestellt. Gezeigt werden die Lage der Grundwasseroberfläche in m NHN (Legende) und die verwendeten Randbedingungen. Bei Letzteren bilden die blauen Kreise die Dirichlet-Randbedingung und die grünen Kreise die Cauchy-Randbedingung ab.

## 7.4.2 Kalibrierung

Dieser Abschnitt zeigt sowohl die Vorgehensweise als auch die Ergebnisse der Kalibrierungen der verwendeten Grundwasserströmungsmodelle. Bei der Kalibrierung eines Grundwasserströmungsmodells werden Modellparameter gezielt solange innerhalb plausibler Grenzen variiert, bis eine Simulation die gewünschte Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Grundwasserständen liefert. Eine Kalibrierung kann stationär, d.h. zeitunabhängig oder instationär, d.h. zeitabhängig, erfolgen. Die Güte oder auch Wiedergabetreue des Modells wird dabei anhand verschiedener statistischer Parameter bestimmt. Mit erfolgreicher Kalibrierung wird dem Modell eine Prognosefähigkeit zugeschrieben, die es für weitere Simulationen von Szenarien qualifiziert.

Die in diesem Projekt durchgeführten Simulationen mit projizierten Klimadaten bis ins das Jahr 2100 setzten instationär kalibrierte Modelle voraus. Die Ergebnisse der Simulationen müssen in Form von Grundwasserganglinien, also zeitlich differenzierten Daten, ausgegeben werden, um in der anschließenden Auswertung die Berechnungen der Indikatoren durchführen zu können. Für den Kalibrierungszeitraum sollte nach DVGW (2016) ein hinreichend langer und repräsentativer Zeitraum ausgewählt werden, der die Dynamik der Grundwasserstandsschwankungen ausreichend erfasst. Für die Kalibrierung bzw. Nachkalibrierung der beiden Strömungsmodelle wurden daher möglichst lange Zeiträume ausgewählt. Dabei wurde die Zeitspanne zum einen durch die zur Verfügung stehenden Messreihen der betrachteten Grundwassermessstellen und zum anderen durch den zum Zeitpunkt der Kalibrierung verfügbaren Datensatz der Grundwasserneubildung eingeschränkt. Die Datenreihe der verwendeten flächendifferenzierten monatlichen Grundwasserneubildung aus mGROWA18 (ERTL et al., 2019) reichte vom November 1960 bis zum Oktober 2010. Der Datensatz lag mit einer Auflösung von 100 x 100 m vor, wurde aus Verarbeitungsgründen und zum Angleich an die projizierten Grundwasserneubildungsdaten aber auf 500 x 500 m aggregiert (bilineare Interpolation). Im Modellgebiet Sandelermöns spielten zusätzlich die verfügbaren Daten zur Grundwasserentnahme der Förderbrunnen eine Rolle, die von 2004 bis 2011 vorlagen. Im Modellgebiet Vörden-Hunteburg wurde die untere Grenze des Kalibrierungszeitraums durch den Beginn einiger Messreihen ab 1993 vorgegeben. Eine nachgeschaltete Validierung, in dem die Güte der Modelle an einem weiteren ähnlich langen Zeitraum überprüft wird, konnte durch die genannten Einschränkungen nicht durchgeführt werden. Nach DVGW (2016) kann in Abhängigkeit der Aufgabenstellung bei entsprechender Modellgüte und einem ausreichend langen Kalibrierungszeitraum mit unterschiedlichen hydraulischen Systemzuständen und mehreren hydrologischen Zyklen jedoch auch auf eine zusätzliche Validierung verzichtet werden.

### 7.4.2.1 Sanderlermöns

Das übernommene Strömungsmodell im Bereich des Wasserwerks Sandelermöns wurde ursprünglich unter anderem mit dem Ziel der Abbildung der Grundwassersituation im Jahr 2011 erstellt und entsprechend stationär für das gesamte Jahr und instationär anhand monatlicher Werte kalibriert. Um der Aufgabenstellung im Rahmen dieses Projektes gerecht zu werden, fand eine Anpassung und Nachkalibrierung dieses Modells statt. Die Nachkalibrierung wurde instationär anhand monatlicher Grundwasserneubildungsdaten aus mGROWA18 (ERTL et al., 2019) für den Zeitraum Januar 2004 bis Oktober 2010 durchgeführt. Für die Förderraten der Entnahmekunnen wurden monatliche Mittelwerte des gesamten Kalibrierungszeitraums angesetzt. Im Fokus der Nachkalibrierung standen die im Projekt KliBiW7 ausgewählten und als anthropogen möglichst unbeeinflusst geltenden Messstellen. Wie in Abbildung 7.66 und Tabelle 7.6 zu sehen, trifft das im Modellgebiet Sandelermöns auf insgesamt sechs Messstellen zu. Die zuvor im Modell integrierten 154 Beobachtungspunkte, inklusive Förderbrunnen, wurden bei der erneuten Kalibrierung nur zweitrangig berücksichtigt. Für den Vergleich zwischen beobachtenden und simulierten Werten wurden die sechs KliBiW7 Messstellen verwendet. Als statistische Parameter zur Bestimmung der Modellgüte kamen der mittlere Fehler (engl. Mean Error, ME), der mittlere absolute Fehler (engl. Mean Absolute Error, MAE), die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (engl. Root Mean Square Error, RMSE) und der Nash-Sutcliffe-Koeffizient (engl. Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE) (NASH & SUTCLIFFE, 1970) zum Einsatz. Weiterhin fand eine visuelle Kontrolle zwischen simulierten und beobachteten Ganglinien hinsichtlich der Grundwasserstandsdynamik statt, die eine zeitlich differenzierte Betrachtung der simulierten Grundwassersituation erlaubt. Es wurde so lange kalibriert, bis sich keine nennenswerte Verbesserung der Güteparameter, der Übereinstimmung der Ganglinien und der Grundwasserbilanz mehr einstellte. Als Kalibrierparameter dienten dabei die kf-Werte in horizontaler und vertikaler Richtung, die effektiven Porositäten der Grundwasserleiter und -nichtleiter sowie die Transferraten der über die Cauchy-Randbedingung integrierten Flüsse. Für die numerische Simulation der Grundwasserströmung in FEFLOW wurde die Darcy-Gleichung für vollständig gesättigte Medien verwendet, wobei die freie Grundwasseroberfläche als „gesättigt“ mit teilweise gespannten Verhältnissen Berücksichtigung fand. Als Ergebnis der Nachkalibrierung werden für die Transferraten der Grundwasserinfiltration 0,05 und für die Grundwasserexfiltration 10 1/d angenommen. Alle weiteren während der Nachkalibrierung ermittelten Parameter, die Gliederung des geologisch-hydrogeologischen Modells und die daraus resultierende Einteilung in Layer des numerischen Strömungsmodells finden sich in Tabelle 7.5.

Tabelle 7.5: Gliederung des geologisch-hydrogeologischen Modells, Einteilung in Layer des numerischen Strömungsmodells und Ergebnisse der Kalibrierparameter für das Modell Sandelermöns. Die Klassifizierung nach hydrostratigrafischen Einheiten und Durchlässigkeitsklassen erfolgte nach (REUTTER, 2011). Grundwasserleiter sind blau hinterlegt. Teilweise wurden mehrere geologische bzw. Hydrostratigrafische Einheiten in einem Layer des Strömungsmodells zusammengefasst.

Stratigraphie	Genese	Lithologie	Geolog. Kürzel	Hydrostrat. Einheiten	Durchlässigkeitsklasse	Layer im Strömungsmodell	k <sub>r</sub> -Wert [m/s]		Effektive Porosität [-]
							horizontal	vertikal	
Holozän	ungegliedert	Ton, Schluff	qh//	H1.1-H1.2	10 gering bis äußerst gering	1	8E-04	8E-04	0,225
Holozän	Anmoor	Torf	qh//Hm	H1.3	10 gering bis äußerst gering				
Holozän	Hochmoor	Torf	qh//Hh	H1.3	10 gering bis äußerst gering				
Holozän	Niedermoore	Torf	qh//Hn	H1.3	10 gering bis äußerst gering				
Weichsel-Kaltzeit bis Holozän	Flugsand	Sand, Kies	qw-qh//fls	L1.2	9 mittel bis mäßig	2	1E-03	1E-03	0,225
Weichsel-Kaltzeit	Geschiebedecksand	Sand, Kies	qw//Gds	L1.2	9 mittel bis mäßig				
Weichsel-Kaltzeit	fluviatil	Sand, Kies	qw//f	L1.2-L1.3	9 mittel bis mäßig / 3 mittel				
Drenthe-Stadium	Geschiebelehm, Geschiebemergel	Geschiebe-mergel/-lehm, Schluff, Ton	qd//Lg,Mg	H3	5 gering	3	8E-07	8E-07	0,1
Drenthe-Stadium	glazifluviatil	Sand, Kies	qd//gf	L3	3 mittel				
Lauenburger Schichten	ungegliedert	Ton, Schluff	ql//	H4.1	6 sehr gering	3	8E-07	8E-07	0,1
Lauenburger Schichten	sandige Fazies	Schluff, Feinsand, Sand	qLS//b	H4.1-L4.1	6 sehr gering / 9 mittel bis mäßig				
Elster-Kaltzeit	Geschiebelehm, Geschiebemergel	Geschiebe-mergel/-lehm	qe//Lg,Mg	H4.2	5 gering	4	1E-04	1E-05	0,2
Ältere Elster-Stadial	glazifluviatil	Sand, Feinsand, schluffig	qe(1)//gf	L4.1	9 mittel bis mäßig				
Tergast-Ton	limnisch	Ton, Schluff	tpIT//I	H4.4	10 gering bis äußerst gering	5	5E-07	5E-07	0,08
Pliozän	sandige Fazies, terrestrisch	Sand	tpIS//te	L4.3	3 mittel	6	9E-05	9E-06	0,2

Die statistische Auswertung zur Überprüfung der Modellgüte wird in Tabelle 7.6 gezeigt. Dabei werden die erreichten Werte für jede der betrachteten Messstellen aufgelistet sowie das Gütemaß für das gesamte Modell, bezogen auf den MAE und den RMSE, angegeben. Letzteres errechnet sich aus dem Mittelwert des jeweiligen Parameters und der maximalen Differenz der Grundwasserstände im Modellgebiet, welche hier 7,5 m beträgt. Je nach Literatur (DVGW, 2016 und LANUV, 2010) gilt ein Strömungsmodell als gut oder sehr gut kalibriert, wenn diese Gütemaße einen Wert von 5 % nicht überschreiten.

Die Anpassung zwischen beobachteten und simulierten Grundwasserständen hinsichtlich der

Grundwasserstandsdynamik findet sich in Abbildung 7.70 wieder. Dort sind für jede der betrachteten Messstellen die entsprechenden Ganglinien innerhalb des instationären Kalibrierungszeitraumes dargestellt. Die Dynamik wird hierbei ausschließlich durch die monatlich variierende Grundwasserneubildung bestimmt, da sich alle betrachteten Messstellen außerhalb des Einflussbereiches der Förderbrunnen befinden. Die monatlichen bzw. jahreszeitlich bedingten Schwankungen der beobachteten Grundwasserstände können durch das Modell über den gesamten Zeitraum ausreichend gut wiedergegeben werden. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass die Grundwasserstandsdynamik auch bis ins Jahr 2100 mit entsprechender Wiedergabetreue simuliert werden kann.

Tabelle 7.6: Ergebnisse der instationären Kalibrierung des Strömungsmodells Sandelermöns. Die Modellgüte bzw. die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen werden anhand verschiedener Fehlerkriterien für die einzelnen Messstellen und das gesamte Modellgebiet dargestellt.

MEST_NAME	MEST_ID	ME [m]	MAE [m]	RMSE [m]	NSE [-]
Upjever	9610997	0.331	0.334	0.353	-1.413
Cleaverns Barderstedde II	9611193	-0.021	0.144	0.175	0.581
Ardorf I	9843241	-0.236	0.245	0.286	0.243
Ardorf II	9843252	0.07	0.112	0.153	0.72
Mueggenkrug	9850270	-0.261	0.286	0.349	0.371
Kreyenburg	9850360	0.003	0.307	0.357	-0.147

Modellgebiet					
Güte MAE [%]	Güte RMSE [%]	ME-Mittel [m]	MAE-Mittel [m]	RMSE-Mittel [m]	NSE-Mittel [-]
3.172	3.717	-0.019	0.238	0.279	0.059



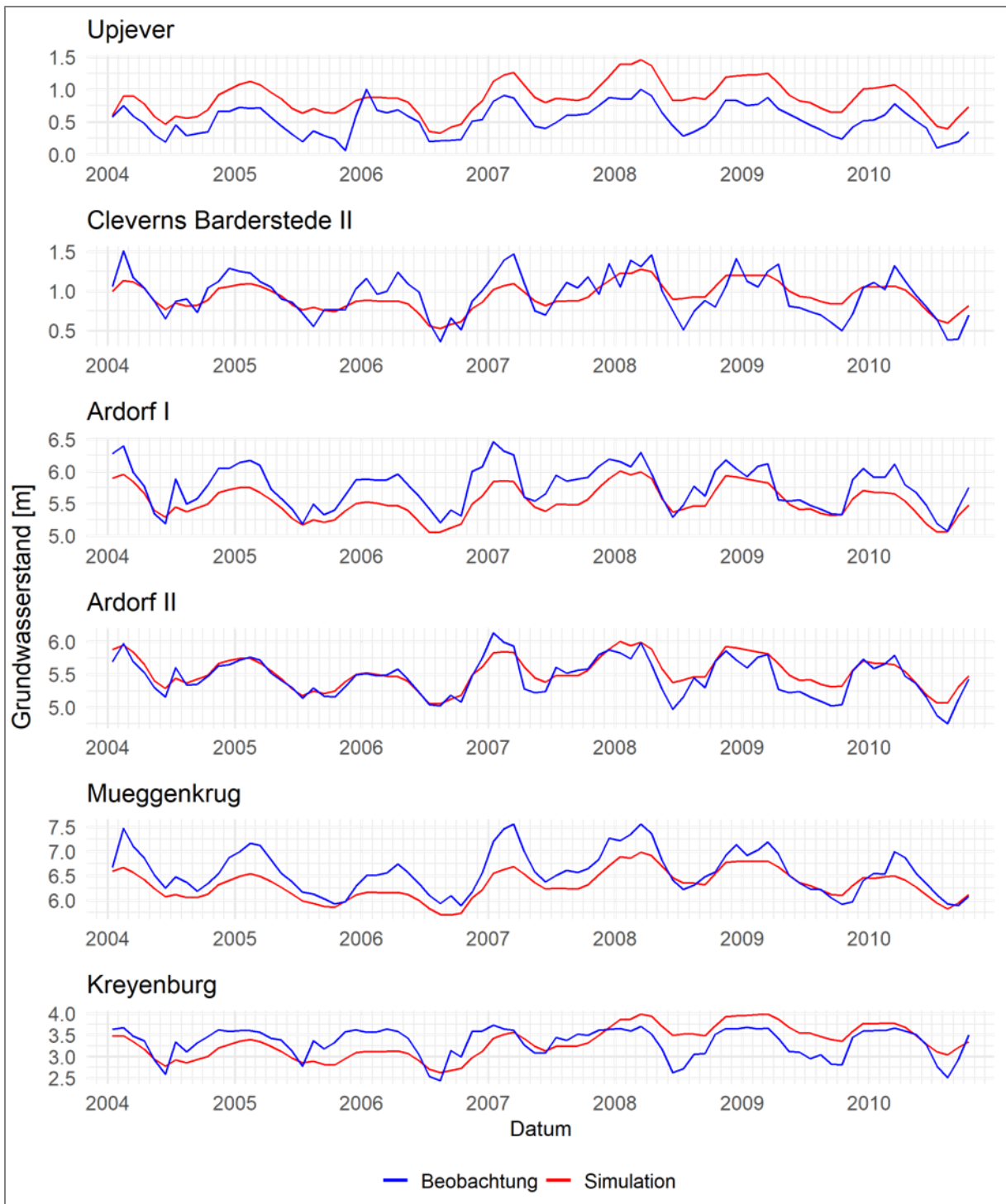


Abbildung 7.70: Ergebnisse der instationären Kalibrierung des Strömungsmodells Sandelermöns. Dargestellt sind die Ganglinien der gemessenen und simulierten Grundwasserstände in m NHN der einzelnen Messstellen.

#### 7.4.2.2 Vörden-Hunteburg

Das im Rahmen dieses Projektes erstellte dreidimensionale Strömungsmodell Vörden-Hunteburg wurde sowohl stationär als auch instationär kalibriert. Zuerst erfolgte die stationäre Kalibrierung für den Januar 1993, was dem Startzeitpunkt des instationären Zeitraumes entspricht. Die Grundwasserneubildungsdaten stammen aus mGROWA18 (ERTL et al., 2019) und wurden für den Januar 1993 als Monatsmittel flächendifferenziert eingeladen. Im Modelgebiet befinden sich ausschließlich Messstellen, die in KliBiW7 als anthropogen möglichst unbeeinflusst ausgewählt wurden. Wie in Abbildung 7.68 und Tabelle 7.8 zu sehen, trifft das im Modellgebiet Vörden-Hunteburg auf insgesamt acht Messstellen zu. Für den Vergleich zwischen beobachtenden und simulierten Startwerten wurden gemittelte Messwerte des Januar 1993 verwendet. Zur weiteren Bestimmung der Modellgüte kamen der mittlere Fehler (engl. Mean Error, ME), der mittlere absolute Fehler (engl. Mean Absolute Error, MAE), die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (engl. Root Mean Square Error, RMSE) zum Einsatz. Während der stationären Kalibrierung dienten die kf-Werte der Grundwasserleiter und –nichtleiter in horizontaler und vertikaler Richtung sowie die Transferraten der über die Cauchy-Randbedingung integrierten Flüsse als Kalibrierparameter. Neben der manuellen Variation der genannten Parameter kam auch das in FEFLOW integrierte FePEST (FEFLOW Parameter Estimation) zum Einsatz, was unterstützend zur Ermittlung der kf-Werte eingesetzt wurde. Nachdem sich keine nennenswerte Verbesserung zwischen beobachteten und simulierten Werten sowie der Grundwasserbilanz mehr einstellte, wurden die simulierten Grundwasserstände als Anfangswerte in die instationäre Kalibrierung übertragen.

Als zeitlich variierender Parameter wurde die monatliche Grundwasserneubildung aus mGROWA18 (ERTL et al., 2019) für den instationären Kalibrierungszeitraum vom Januar 1993 bis zum Oktober 2010 eingeladen. Die Übereinstimmung zwischen simulierten und beobachteten Grundwasserständen wurde ergänzend durch den Nash-Sutcliffe-Koeffizienten (NSC) (NASH & SUTCLIFFE, 1970) sowie durch die Überprüfung der Gangliniendynamik beurteilt. Als weiterer Kalibrierparameter wurden die effektiven Porositäten der Grundwasserleiter und –nichtleiter herangezogen, welche am Ende der instationären Kalibrierung mit Hilfe von FePEST abschließend angepasst wurden, da diese maßgeblich die Amplituden der Grundwasserganglinien beeinflussen. Es wurde erneut solange kalibriert, bis sich keine nennenswerte Verbesserung der Güteparameter, der Übereinstimmung der Ganglinien und der Grundwasserbilanz mehr einstellte. Die numerische Simulation der Grundwasserströmung in FEFLOW wurde mit der Darcy-Gleichung für vollständig gesättigte Medien durchgeführt, wobei die freie Grundwasseroberfläche als „gesättigt“ mit vollständig ungespannten Verhältnissen Berücksichtigung fand. Als Ergebnis der Nachkalibrierung werden für die Transferraten der Grundwasserinfiltration

0,01 und für die Grundwasserexfiltration  $5 \text{ 1/d}$  angenommen. Die während der instationären Kalibrierung ermittelten Parameter, die Gliederung des geologisch-hydrogeologischen Modells und die daraus resultierende Einteilung in Layer des numerischen Strömungsmodells finden sich in Tabelle 7.7.

Tabelle 7.7: Gliederung des geologisch-hydrogeologischen Modells, Einteilung in Layer des numerischen Strömungsmodells und Ergebnisse der Kalibrierparameter für das Modell Vörden-Hunteburg. Die Klassifizierung nach hydrostratigrafischen Einheiten und Durchlässigkeitsklassen erfolgte nach (REUTTER, 2011). Grundwasserleiter sind blau hinterlegt. Einige Einheiten des geologischen 3D-Modells wurden im Strömungsmodell durch mehrere Layer abgebildet. Wurden mehrere Einheiten des 3D-Modells einem Layer zugeordnet, wurden diese im Strömungsmodell zusammengefasst behandelt.

Einheit im 3D-Modell Stratigraphie + Genese	Lithologie	Geolog. Kürzel	Hydrostrat. Einheiten	Durchlässigkeitsklasse	Layer im Strömungsmodell	k <sub>r</sub> -Wert [m/s]		Effektive Porosität [-]
						horizontal	vertikal	
01 - Holozän / Hochmoor, Niedermoos, Anmoor	Torf	qh/Hn	H1.3	10 gering bis äußerst gering	1			
04 - Weichsel-Kaltzeit / fluviatil	Sand, Kies, Muschelschill, Travertin	qw//f	L1.2	9 mäßig bis mittel	2			
03 - Weichsel-Kaltzeit / Beckenablagerung	Ton, Schluff, Rutschmassen, Torf	qw//b	H2.1	5 gering	3			
04 - Weichsel-Kaltzeit / fluviatil	Sand, Kies, Muschelschill, Travertin	qw//f	L1.2	9 mäßig bis mittel	4			
05 - Weichsel-Kaltzeit / Hangbildung	Ton, Schluff, Sand Rutschmassen, Torf	qw-qh/hg	L1.2-H2.1	9 mäßig bis mittel / 5 gering	5	0.00001	1E-06	0,18
10 - Älteres Drenthe-Stadial / Geschiebelehm	Geschiebemergel/-lehm, Schluff, Ton	qD1//Lg	H3 (H3.2)	5 gering				
13 - Älteres Drenthe-Stadial / glazifluviatil	Sand, Kies	qD1//gf	L3	3 mittel	6			
12 - Älteres Drenthe-Stadial / Beckenablagerung	Schluff, Ton	qD1//b	H3 (H3.3)	5 gering	7			
14 - Mittelterrasse / fluviatil	Sand, Kies	qM//f	L3	3 mittel	8	2,6e-4	2,6e-5	0,18
16 - Elster-Kaltzeit / Fließerde	Geschiebemergel/-lehm, Schluff, Ton	qe//fl	H3.3-H4.2	5 gering	9			
17 - Elster-Kaltzeit / Beckenablagerung	Ton, Schluff	qe//b	H4.3	5 gering	10	0.000001	1E-07	0,08
19 - Jüngerer Elster-Stadial / glazifluviatil	Kies, Sand	qe(2)//gf	L4.2	2 hoch	11			
17 - Elster-Kaltzeit / Beckenablagerung	Ton, Schluff	qe//b	H4.3	5 gering	12	8,9e-9	8,9e-10	0,05
19 - Jüngerer Elster-Stadial / glazifluviatil	Kies, Sand	qe(2)//gf	L4.2	2 hoch	13	2,48e-4	2,48e-5	0,18
22 - Cromer-Komplex / Seeablagerungen	Ton, Schluff	qci//l	H4.3	5 gering	14	0.0000001	1E-08	0,05
24 - Altpleistozän / Fließerde	Ton, Schluff	qpa//fl	H4.3	5 gering				

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung zur Überprüfung der Modellgüte werden in Tabelle 7.8 gezeigt. Dabei werden die erreichten Werte der einzelnen Messstellen aufgelistet sowie das Gütemaß für das gesamte Modell, bezogen auf den MAE und den RMSE, angegeben. Letzteres errechnet sich aus dem jeweiligen Mittelwert des Parameters über alle Pegel und der maximalen Differenz der Grundwasserstände im Modellgebiet, welche hier 6 m beträgt. Je nach Literatur (DVGW ,2016 und LANUV, 2010) gilt ein Strömungsmodell als gut oder sehr gut kalibriert, wenn diese Gütemaße einen Wert von 5 % nicht überschreiten.

Die Anpassung zwischen beobachteten und simulierten Grundwasserständen hinsichtlich der

Grundwasserstandsdynamik findet sich in Abbildung 7.71 und Abbildung 7.72 wieder. Dort sind für jede der betrachteten Messstellen die entsprechenden Ganglinien innerhalb des instationären Kalibrierungszeitraumes dargestellt. Die Dynamik wird hierbei ausschließlich durch die monatlich variierende Grundwasserneubildung bestimmt. Die monatlichen bzw. jahreszeitlich bedingten Schwankungen der beobachteten Grundwasserstände können durch das Modell über den gesamten Zeitraum ausreichend gut wiedergegeben werden. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass die Grundwasserstandsdynamik auch bis ins Jahr 2100 mit entsprechender Wiedergabetreue simuliert werden kann.

Tabelle 7.8: Ergebnisse der instationären Kalibrierung des Strömungsmodells Vörden-Hunteburg. Die Modellgüte bzw. die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen werden anhand verschiedener Fehlerkriterien für die einzelnen Messstellen und das gesamte Modellgebiet dargestellt.

MEST_NAME	MEST_ID	ME [m]	MAE [m]	RMSE [m]	NSE [-]
Hunteburg	9700133	-0.205	0.246	0.311	0.215
Hunteburg I	9700134	-0.125	0.209	0.266	0.46
Hunteburg II	9700135	0.218	0.26	0.304	0.22
Kienpohl	9700146	-0.291	0.32	0.379	-0.205
Rottinghausen 9/9	9700218	0.147	0.315	0.436	-2.461
Schwege I	9700233	-0.089	0.182	0.237	0.527
Schwege II	9700234	-0.013	0.165	0.214	0.554
Venner Moor	9700269	0.088	0.14	0.17	0.614

Modellgebiet					
Güte MAE [%]	Güte RMSE [%]	ME-Mittel [m]	MAE-Mittel [m]	RMSE-Mittel [m]	NSE-Mittel [-]
3.85	4.86	-0.03	0.23	0.29	-0.01

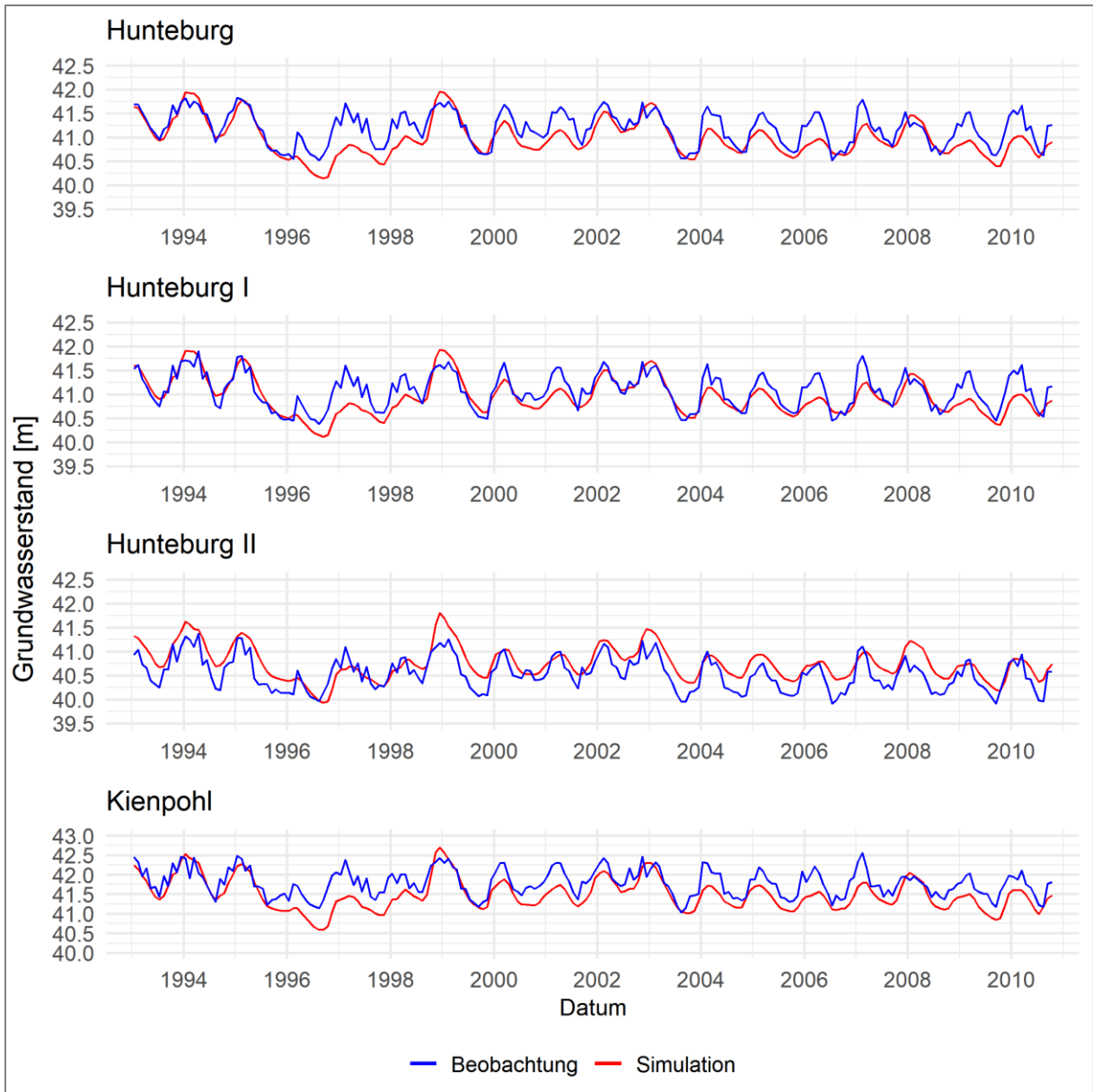


Abbildung 7.71: Ergebnisse der instationären Kalibrierung des Strömungsmodells Vörden-Hunteburg. Dargestellt sind die Ganglinien der gemessenen und simulierten Grundwasserstände in m NHN der ersten Hälfte der Messstellen.

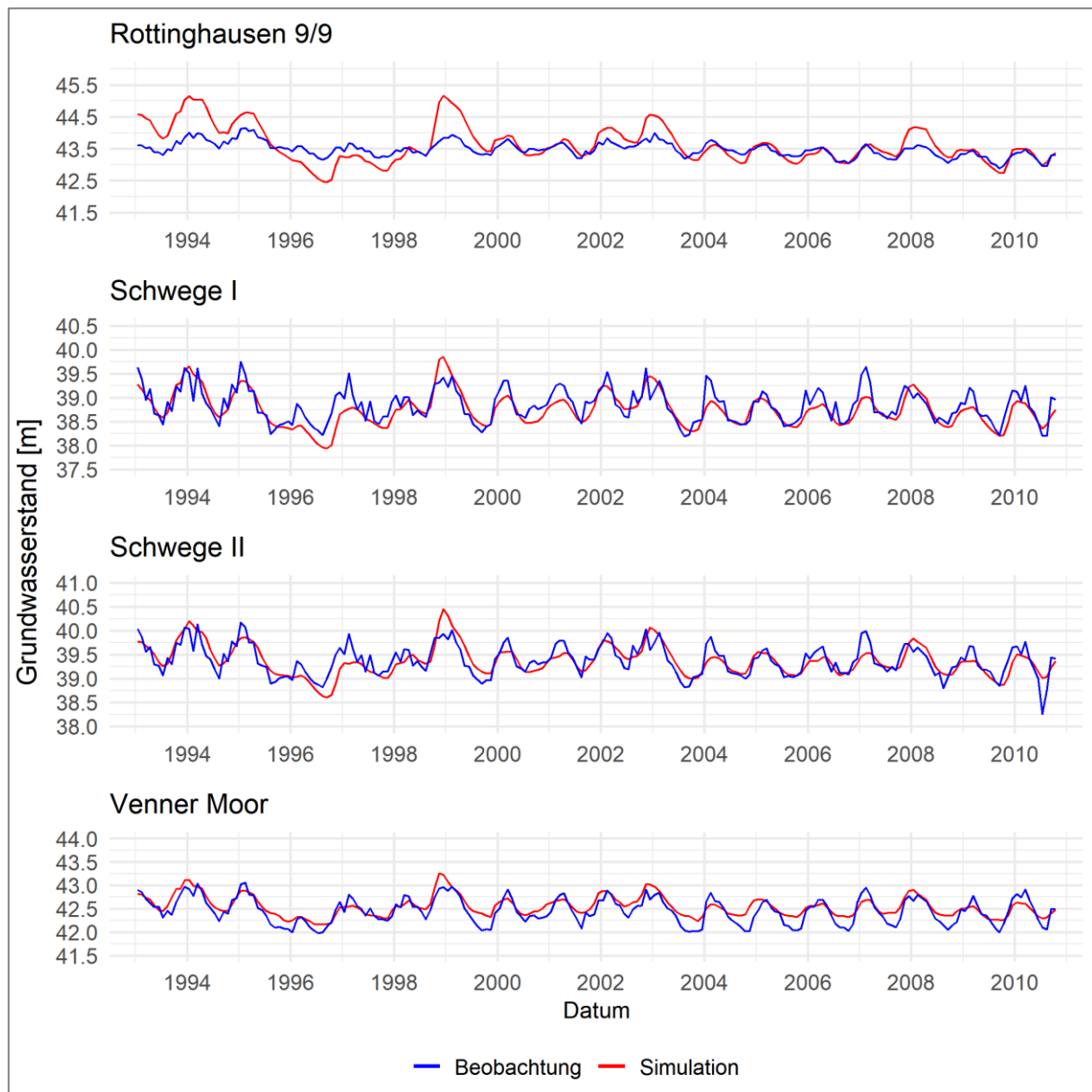


Abbildung 7.72: Ergebnisse der instationären Kalibrierung des Strömungsmodells Vörden-Hunteburg. Dargestellt sind die Ganglinien der gemessenen und simulierten Grundwasserstände in m NHN der zweiten Hälfte der Messstellen.

### 7.4.3 Ergebnisse der Kernindikatoren

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Strömungssimulationen mit Hilfe von Klimaprojektionsdaten der Grundwasserneubildung im jeweiligen Modellgebiet gezeigt. Die Darstellungen der projizierten Grundwasserstandsveränderungen beruhen dabei auf den Auswertungen der Grundwasserstände bzw. deren Ganglinien durch die in KliBiW7 festgelegten Indikatoren (vgl. Kapitel 3.2). Im Fokus der Betrachtungen stehen die möglichen Entwicklungen in den Zeiträumen der nahen (2021-2050) und fernen (2071-2100) Zukunft. Der für die Berechnungen der Änderungssignale benötigte Referenzzeitraum wurde aufgrund der verfügbaren Grundwasserstandsdaten auf die Jahre 1981-2010 festgelegt.

Nach der erfolgreichen instationären Kalibrierung der beiden dreidimensionalen numerischen

Grundwasserströmungsmodelle wurden die Projektionen der Grundwasserneubildung aus mGROWA18 (ERTL et al., 2019) von 1971-2100 als monatliche Werte eingeladen. Im Unterschied zu den anderen Teilprojekten wurde dafür nicht das komplette Ensemble, bestehend aus acht Klimaprojektionen, verwendet, sondern mit jeweils drei gebietsspezifisch ausgewählten Projektionen gearbeitet. Der Grund dafür ist der enorme zeitliche Mehraufwand jedes zusätzlichen Rechenlaufs der Strömungsmodelle über den Zeitraum von 130 Jahren. Um dennoch die Bandbreite des Ensembles zu repräsentieren und einen Vergleich mit den anderen Projektteilen zu gewährleisten, wurden für jedes Modellgebiet drei Klimaprojektionsläufe aus dem bestehenden Ensemble ausgewählt. Dabei wurde jeweils ein Lauf für das Minimum, ein für den Mittelwert und ein für das Maximum des Ensembles ausgewählt. Die Auswahl beruht auf einer niedersachsenweiten Auswertung (LBEG, 2021), die anhand des Änderungssignals der klimatischen Wasserbilanz für die ferne Zukunft pro Grundwasserkörper

den minimalen, den maximalen und den mittleren Lauf aus dem Ensemble ermittelt. Das Ergebnis dieser Auswahl ist in Tabelle 7.9 zu sehen.

Tabelle 7.9: Auswahl der Klimaprojektionen für die beiden Modellgebiete der Strömungsmodelle.

Klima- projektion	Sandelermöns		Vörden- Hunteburg
	Maximum	MPI_CCLM	MPI_CCLM
	Mittel	HadGEM_ WRF361H	HadGEM_ WRF361H
	Minimum	MPI_W13	HadGEM_ W13

Die von den Strömungsmodellen benötigten Anfangswerte für die Grundwassersituation im Januar 1971 wurden aus instationären Modellläufen gewonnen. Dabei wurde ein Zeitpunkt gewählt, welcher die gemessenen Grundwasserstände des Januar 1971 am nächsten kam. Die Strömungsmodelle geben als Ergebnis für jeden der ausgewählten Klimaprojektionsläufe den simulierten Verlauf der Grundwasserstände an den im Modell implementierten Messstellen aus. Die in FEFLOW ausgewählte automatische Zeitschrittanpassung führte zu einer, teils vordefinierten, Ausgabe von Tageswerten, die zu monatlichen Werten aggregiert wurden. Die so erzeugten Ganglinien konnten nun anhand der Indikatoren für die betrachteten Zeiträume ausgewertet werden.

Auf den folgenden Seiten befinden sich die Ergebnisdarstellungen beider Modellgebiete (Sandelermöns: Abbildung 7.73 bis Abbildung 7.79 und Vörden-Hunteburg: Abbildung 7.81 bis Abbildung 7.87). Gezeigt werden die projizierten Änderungen der Kernindikatoren für die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100) bezogen auf den Referenzzeitraum (1981-2010). Die Berechnung der absoluten Änderungssignale über den Delta-Change Ansatz (vgl. Kapitel 3.2) erfordert für die betrachtete Messstelle die entsprechende 30-jährige Messreihe an Beobachtungswerten im Referenzzeitraum. Diese liegen in den beiden Modellgebieten nicht für alle Messstellen vor. Daher weicht die Anzahl der Messstellen pro Modellgebiet hier von der Anzahl der in der Kalibrierung verwendeten Messstellen ab. Die verbleibenden Messstellen sind in Tabelle 7.10 aufgeführt, deren Lage findet sich in Abbildung 7.66 und Abbildung 7.68.

Tabelle 7.10: Auswahl der Messstellen für die Ergebnisdarstellung der beiden Strömungsmodelle.

Sandelermöns		Vörden-Hunteburg	
MEST_NAME	MEST_ID	MEST_NAME	MEST_ID
Upjever	9610997	Hunteburg	9700133
Mueggenkrug	9850270	Kienpohl	9700146
Kreyenburg	9850360	Rottinghausen 9/9	9700218
		Schwege I	9700233
		Schwege II	9700234
		Venner Moor	9700269

Im Gegensatz zu den anderen Teilprojekten, wurden hier in Teilprojekt D keine Messstellen anhand eines Grenzwertes der während der Kalibrierung erreichten Güteparameter ausgeschlossen. Ein Ausschluss von Messstellen anhand eines Grenzwertes des NSE von  $< 0,6$ , wie in den anderen Projektteilen angewandt, würde hier zum Ausschluss fast aller Messstellen führen. Dies ist hauptsächlich auf die Methodik der numerischen Strömungssimulation an sich zurückzuführen. Wie im Abschnitt der Kalibrierung aufgezeigt, werden dennoch die methodisch üblichen Grenzen der Modellgüte eingehalten.

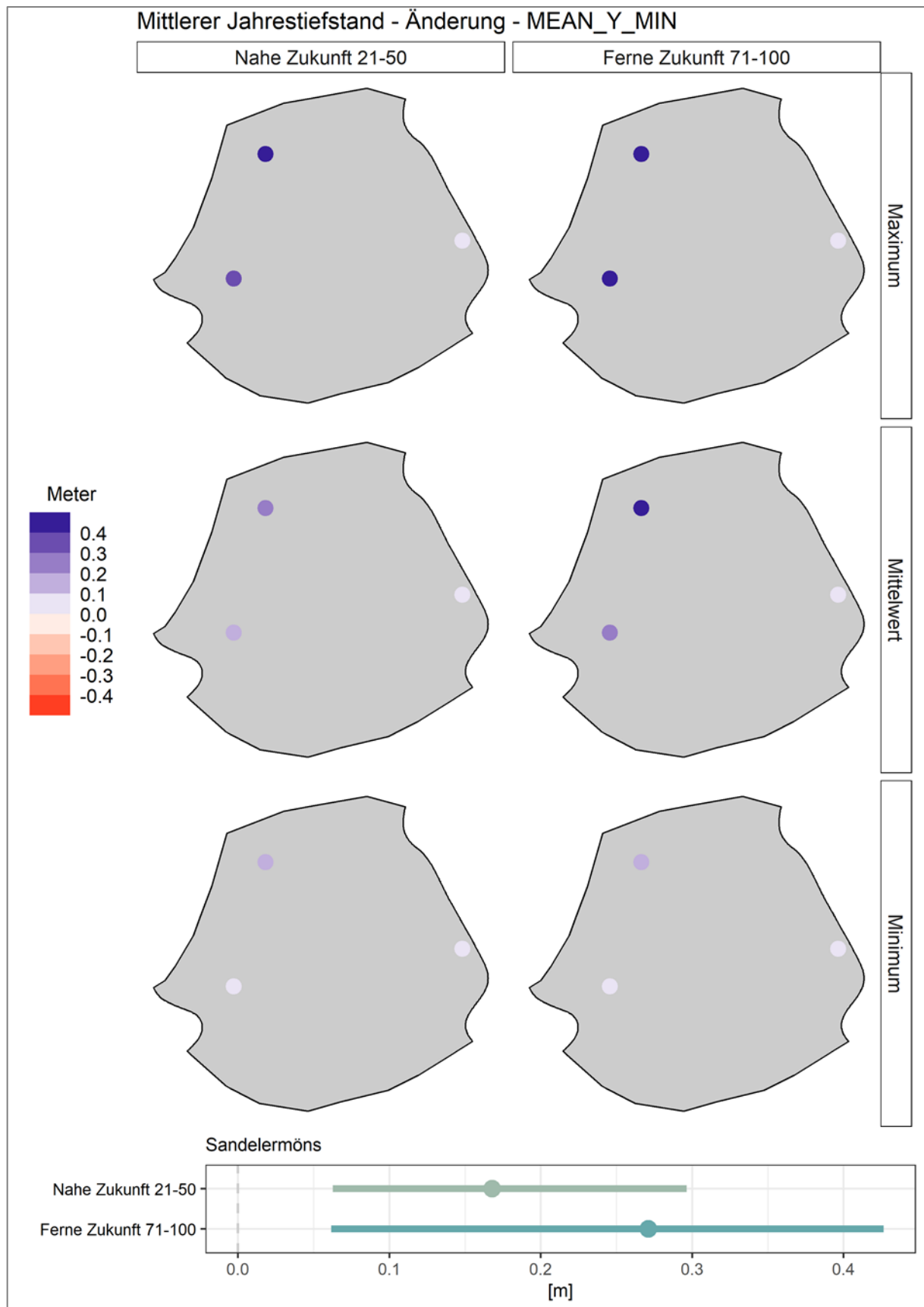


Abbildung 7.73: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Mittlerer Jahrestiefstand im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010



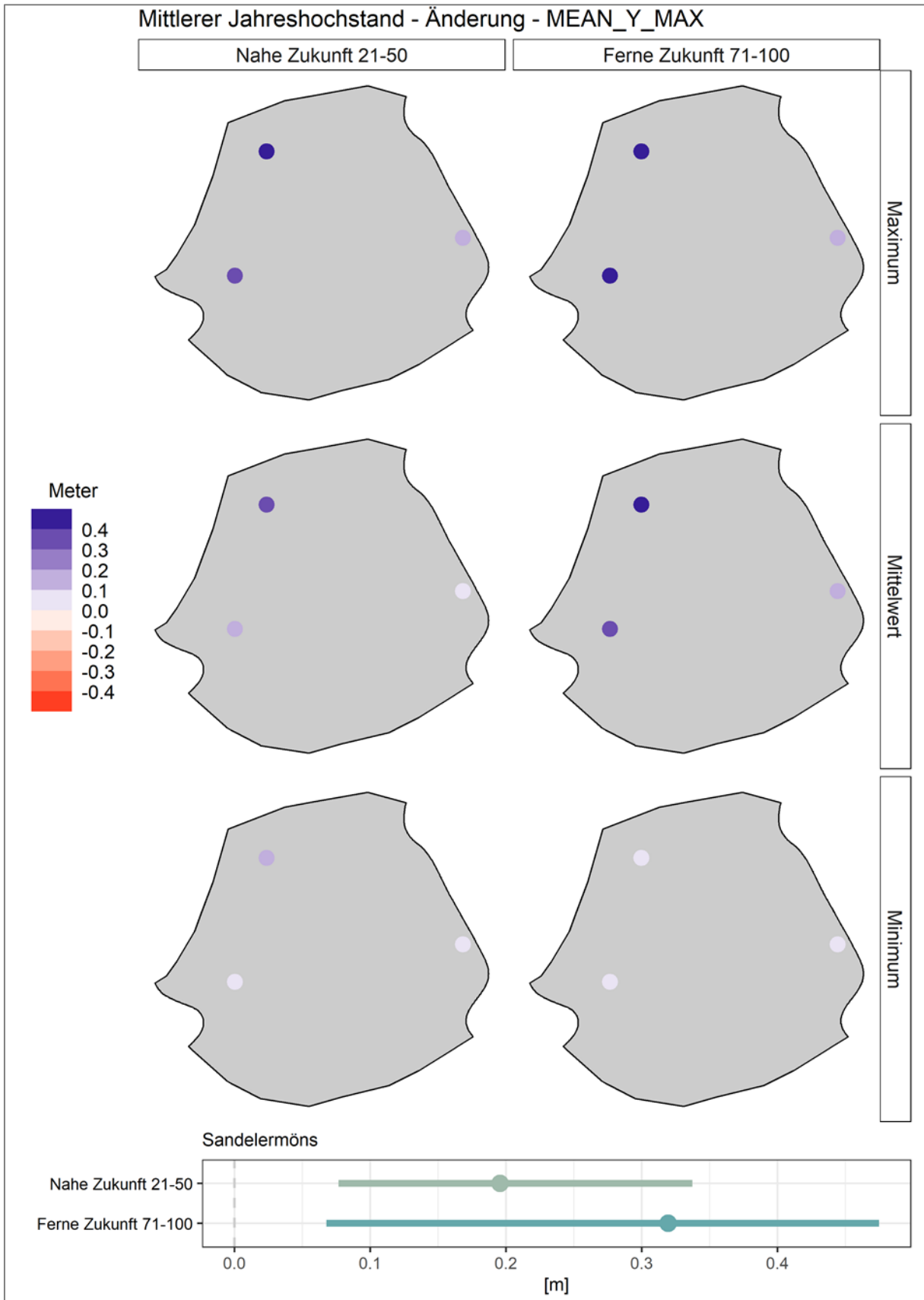


Abbildung 7.74: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Mittlerer Jahreshochstand im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

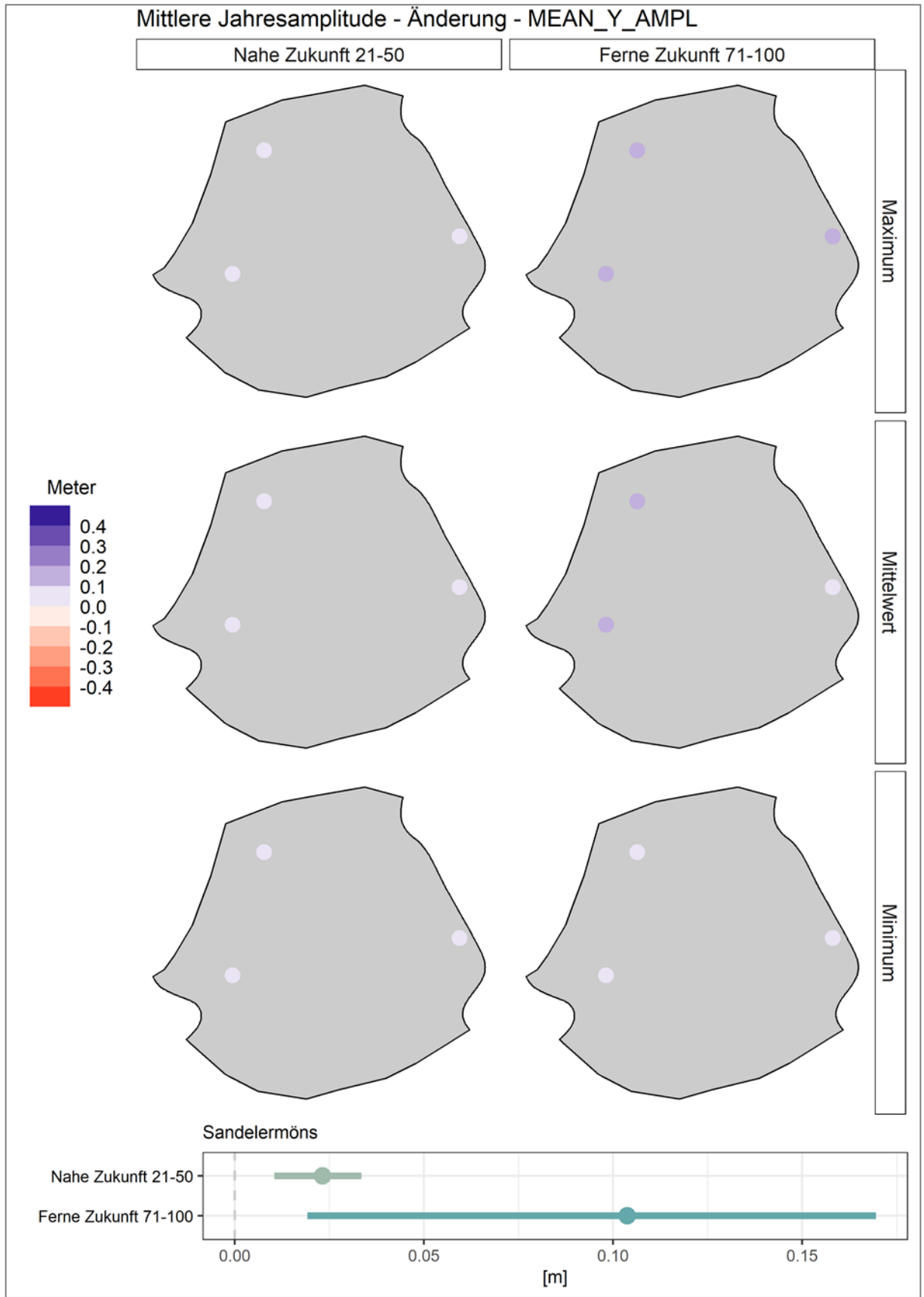


Abbildung 7.75: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Mittlere Jahresamplitude im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

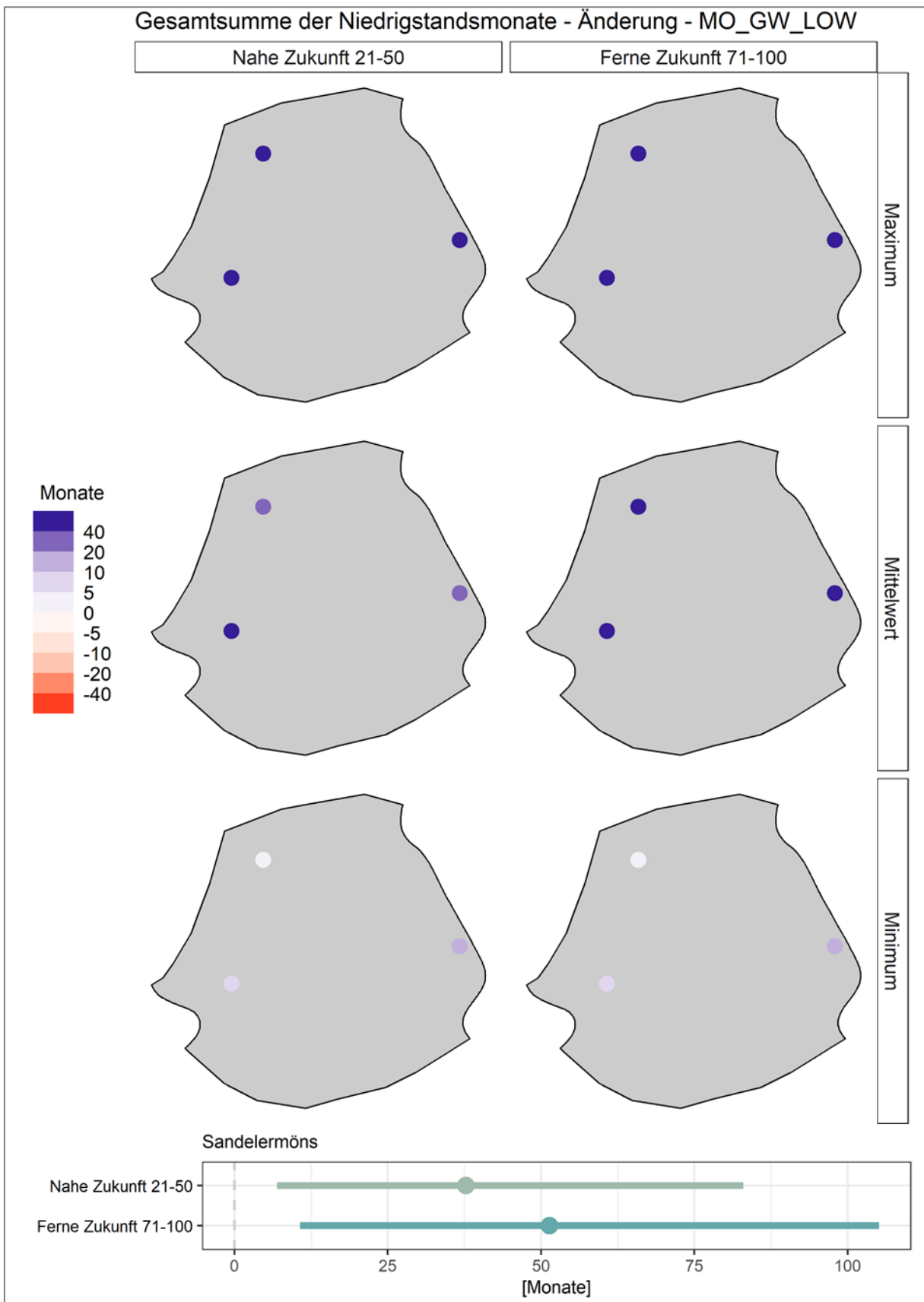


Abbildung 7.76: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010

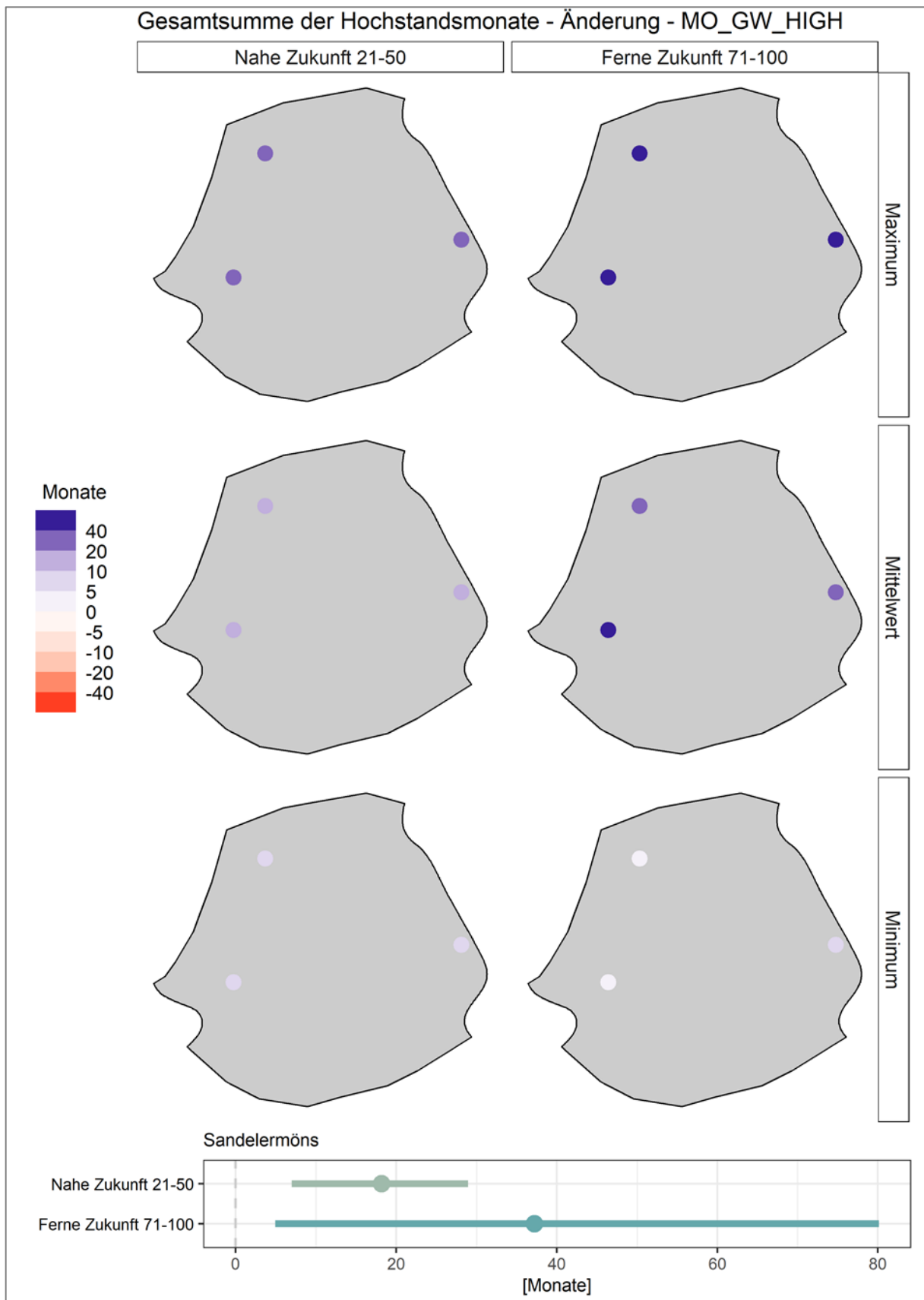


Abbildung 7.77: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Gesamtsumme der Hochstandsmonate im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010

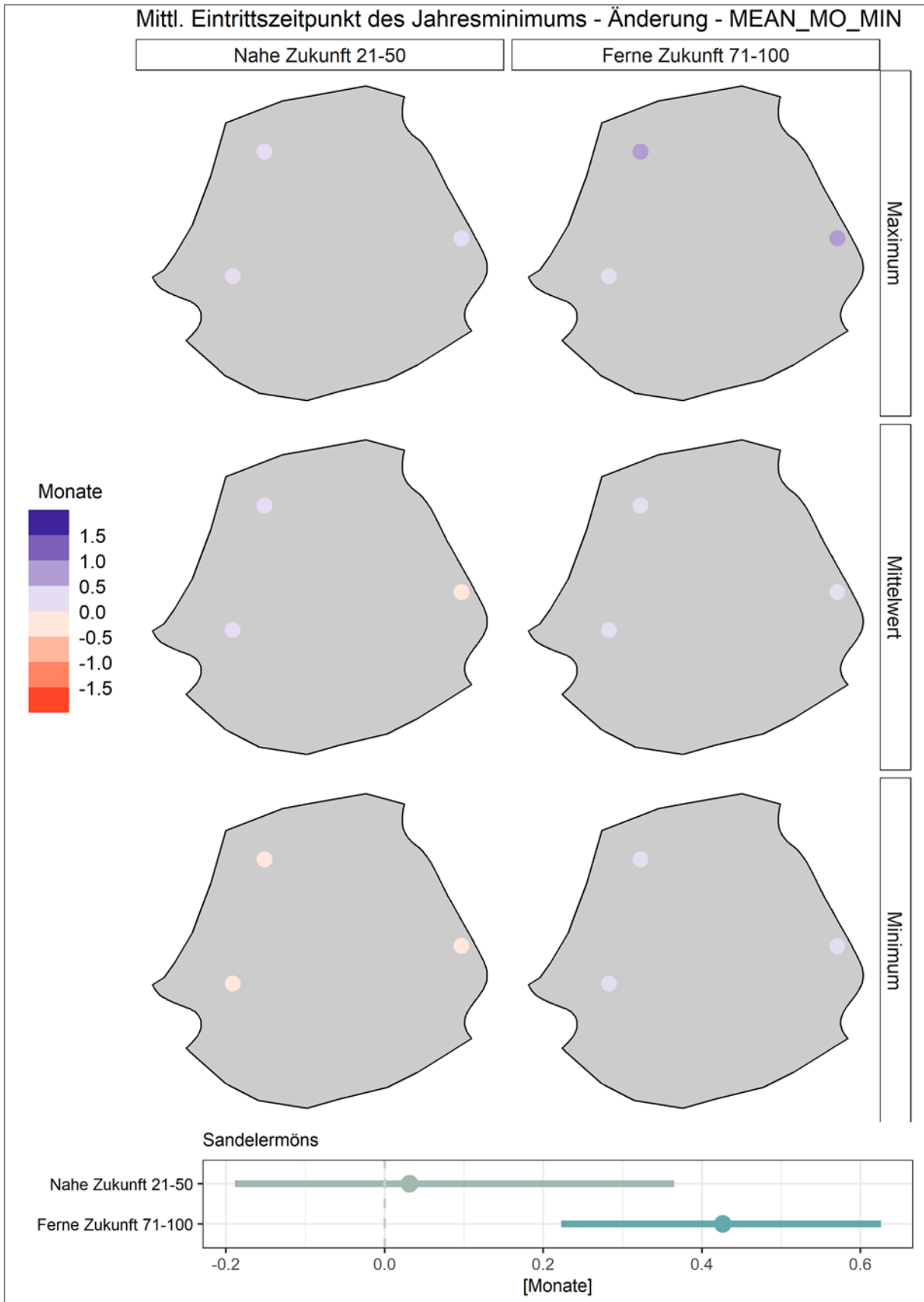


Abbildung 7.78: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Mittlerer Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

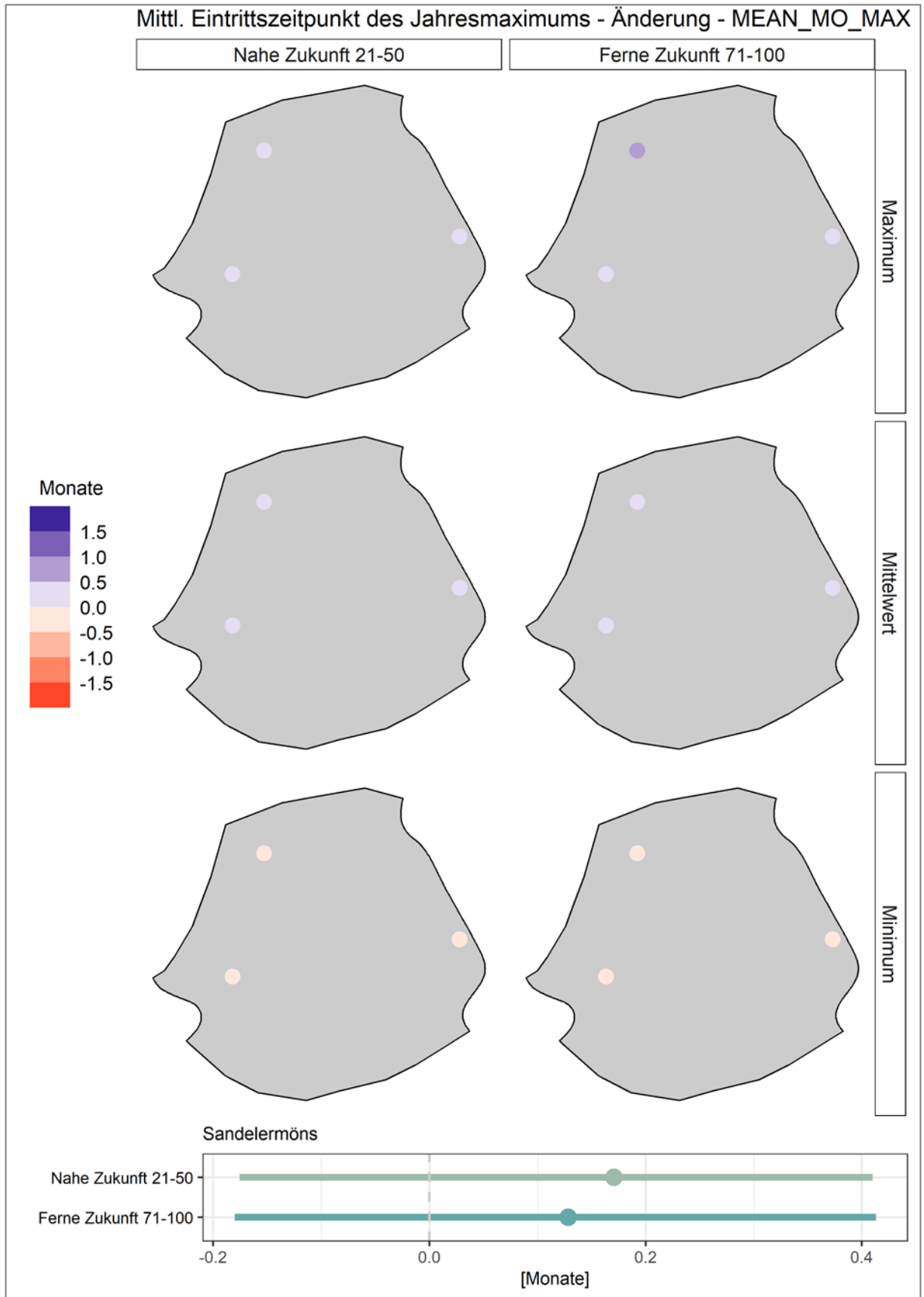


Abbildung 7.79: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Mittlerer Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

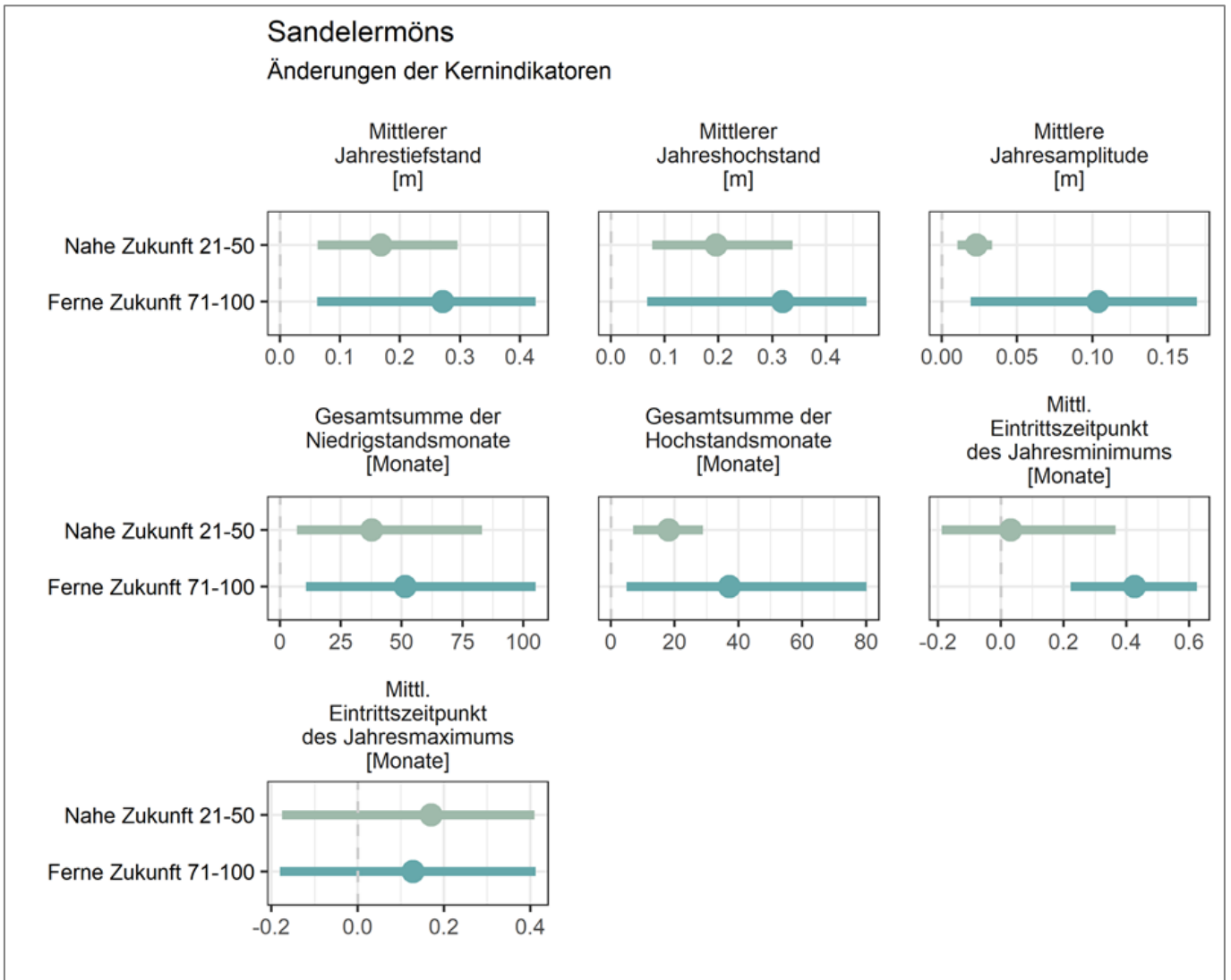


Abbildung 7.80: Übersicht der Bandbreite der projizierten Änderungen\* der Kernindikatoren im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010

7.4.3.2 Ergebnisse Vörden-Hunteburg

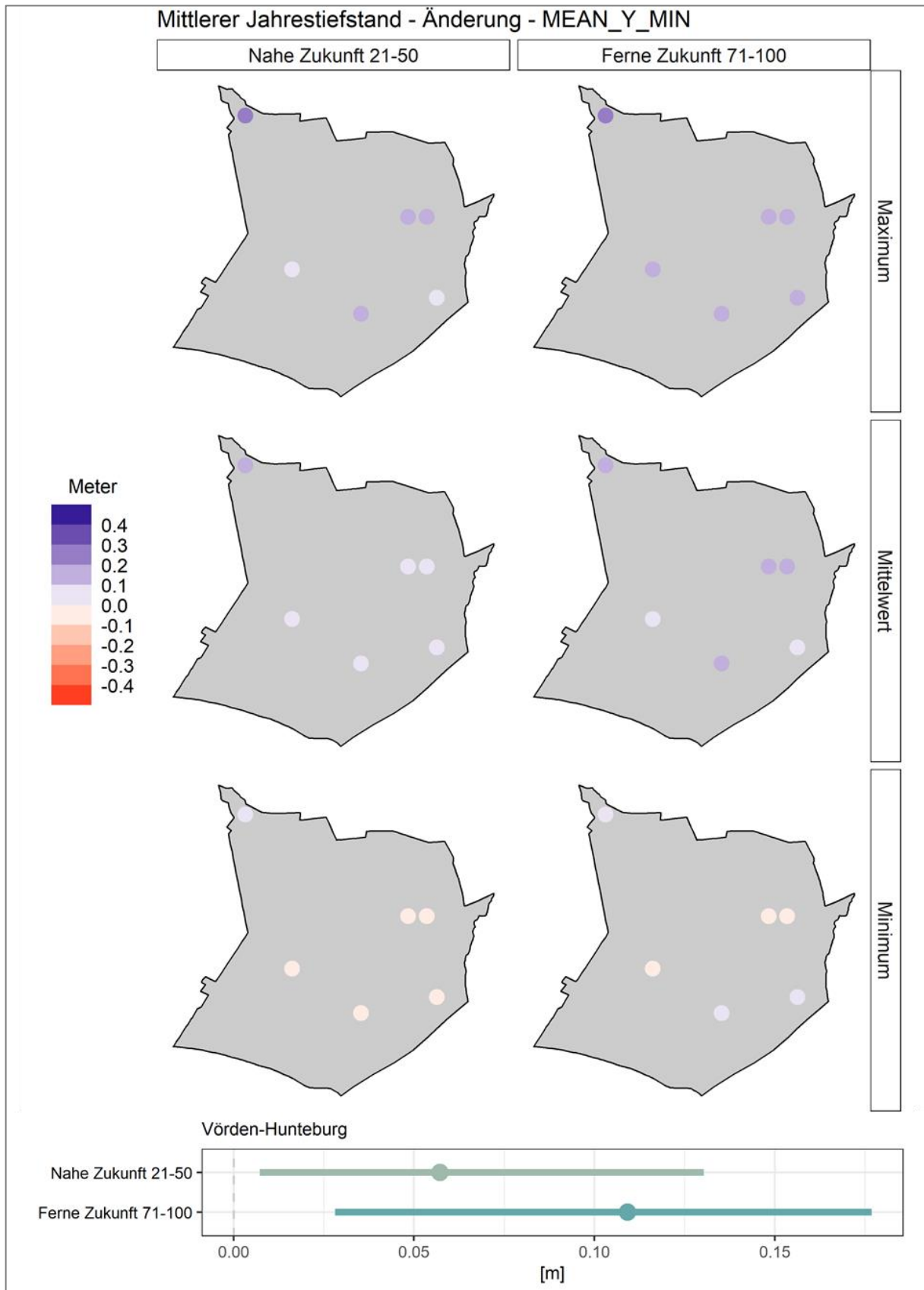


Abbildung 7.81: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Mittlerer Jahrestiefstand im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010



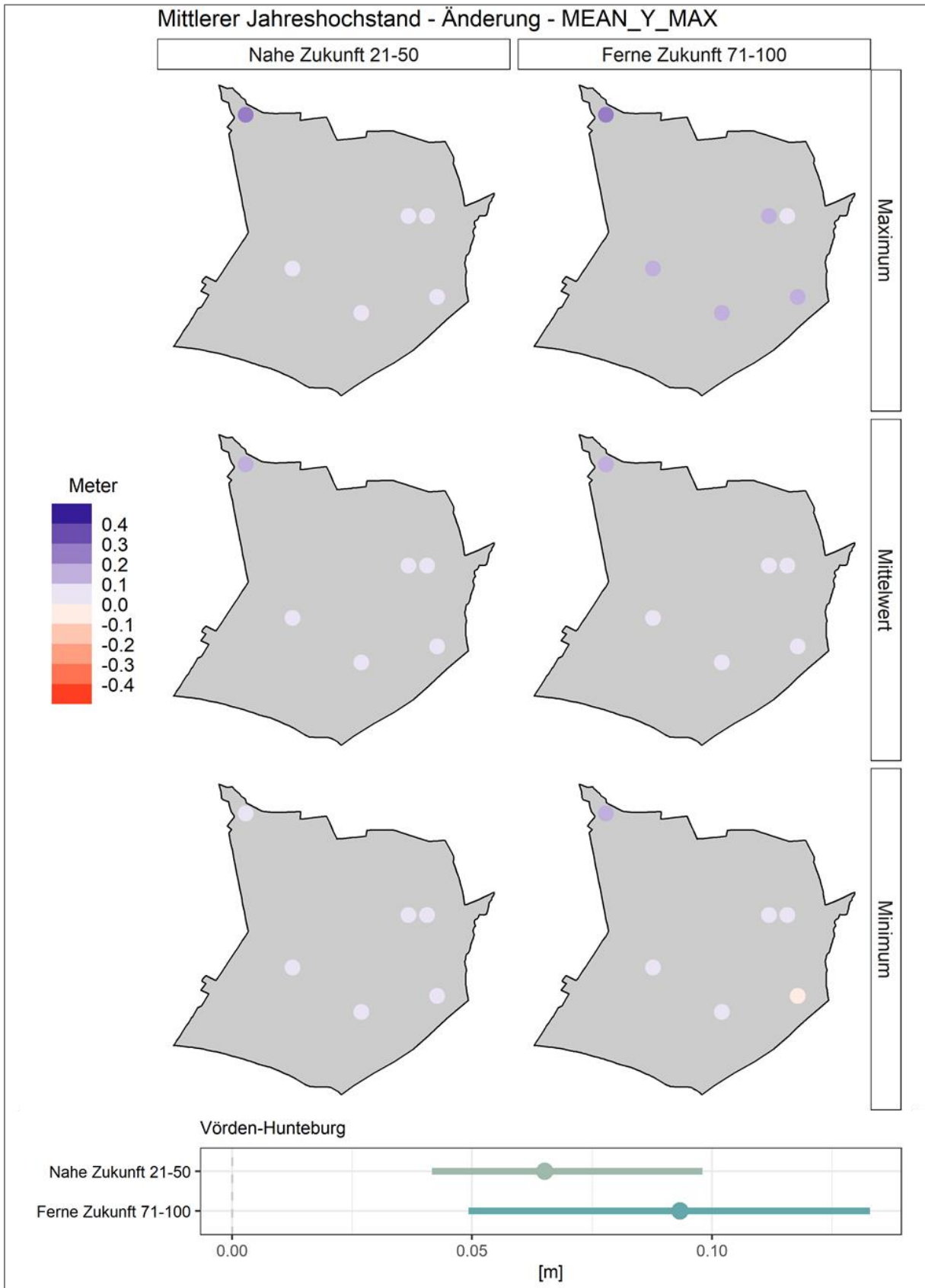


Abbildung 7.82: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Mittlerer Jahreshochstand im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

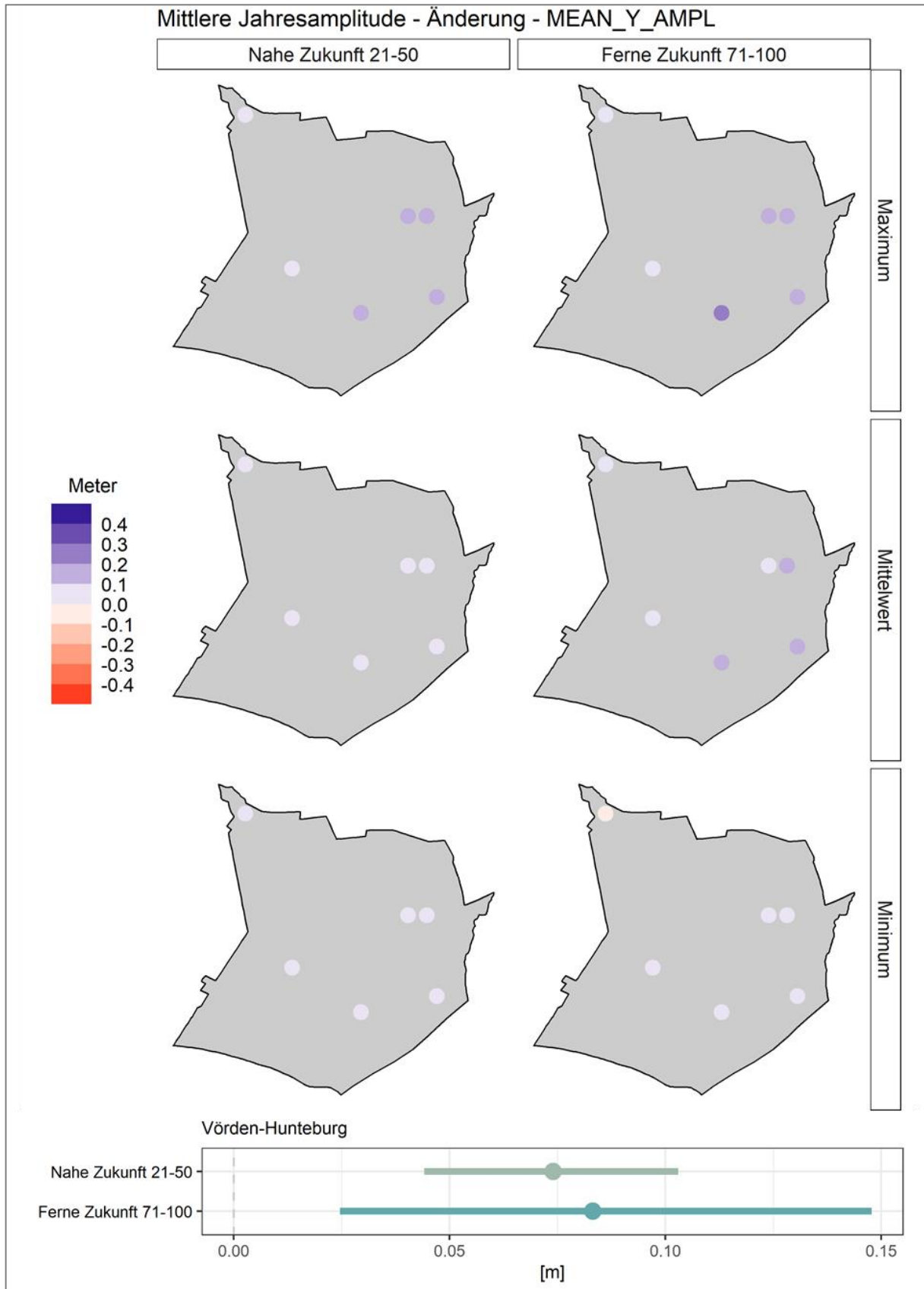


Abbildung 7.83: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikator Mittlere Jahresamplitude im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

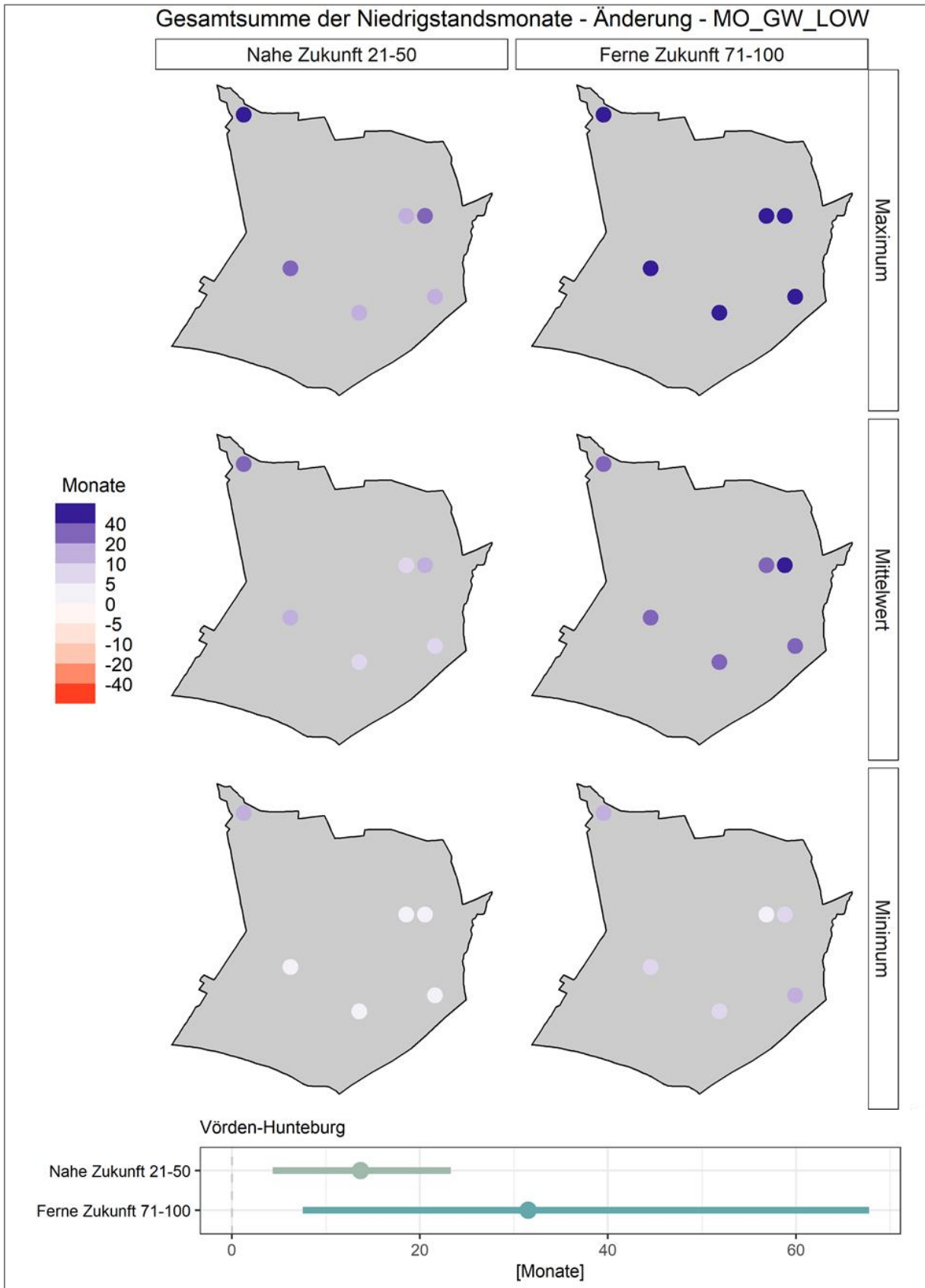


Abbildung 7.84: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

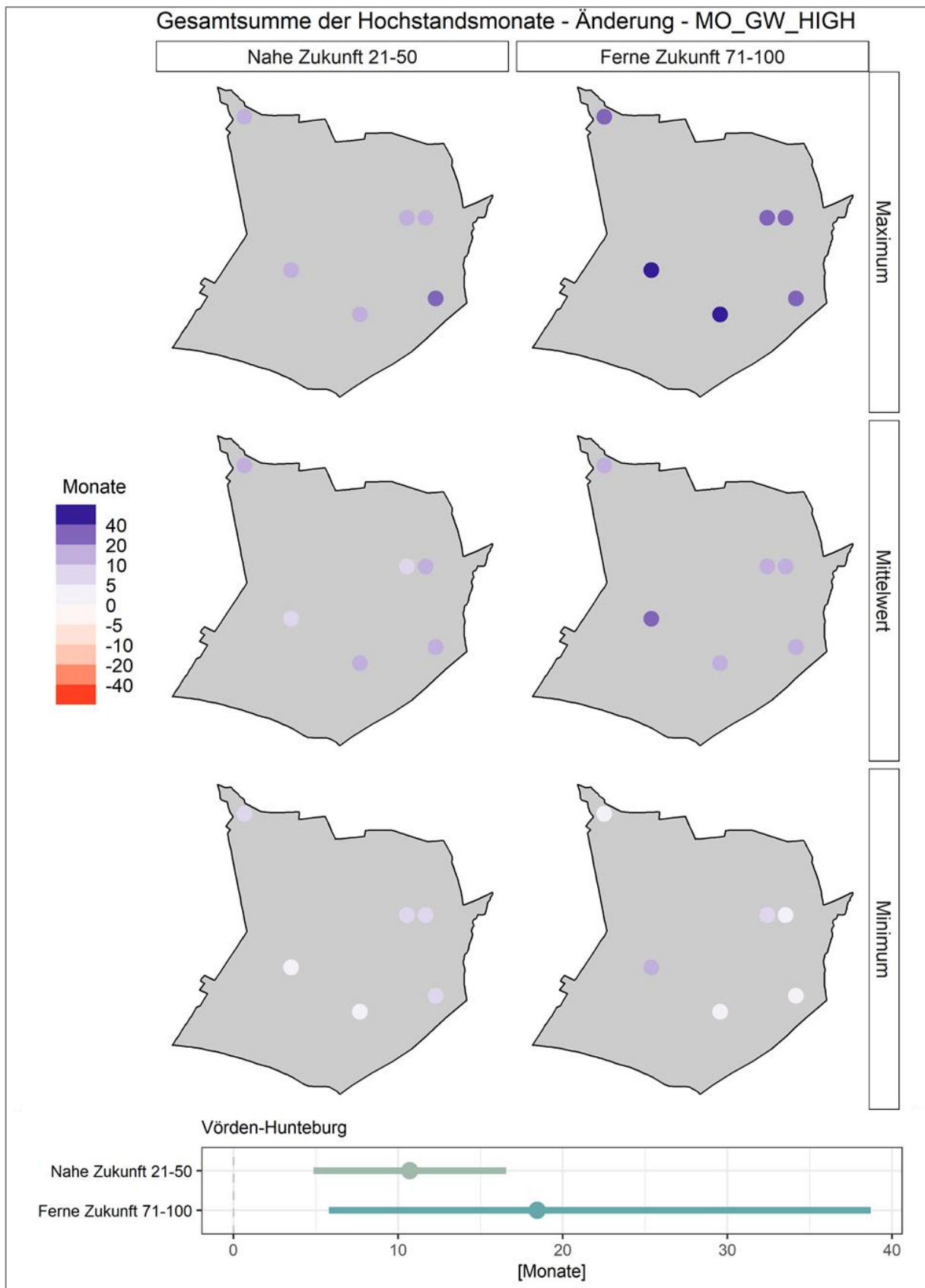


Abbildung 7.85: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Gesamtsumme der Hochstandsmonate im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

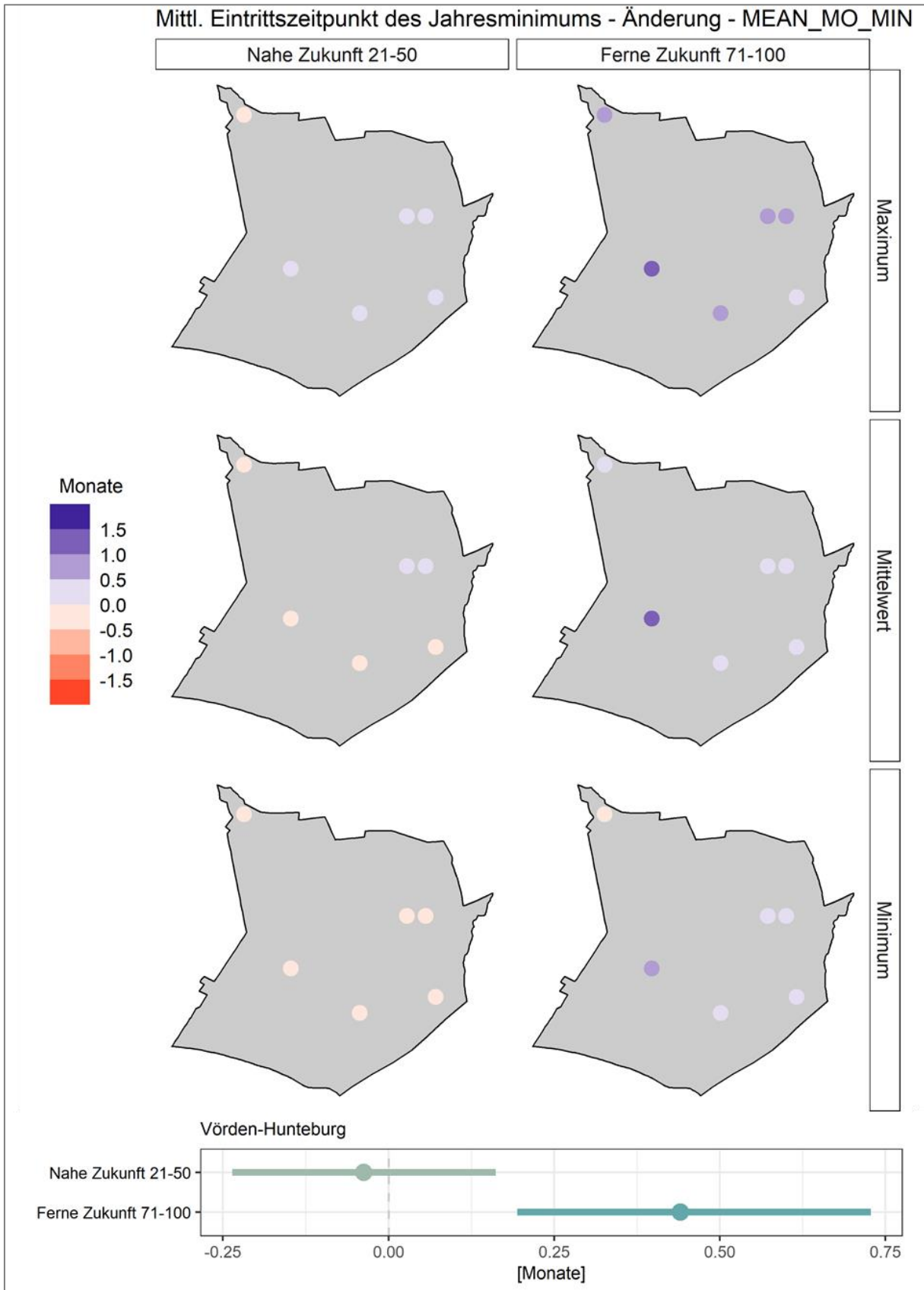


Abbildung 7.86: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Mittlerer Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

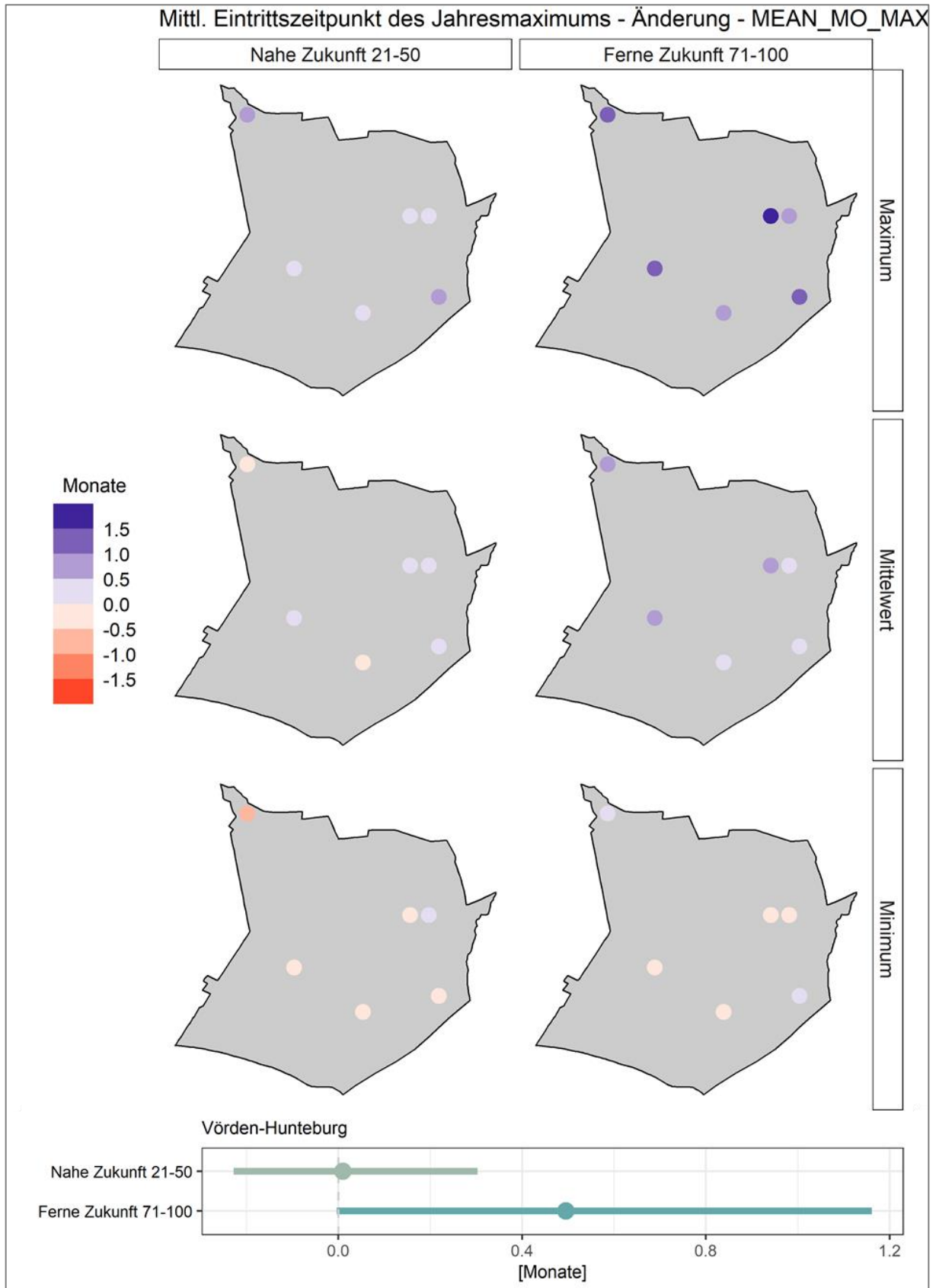


Abbildung 7.87: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Mittlerer Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

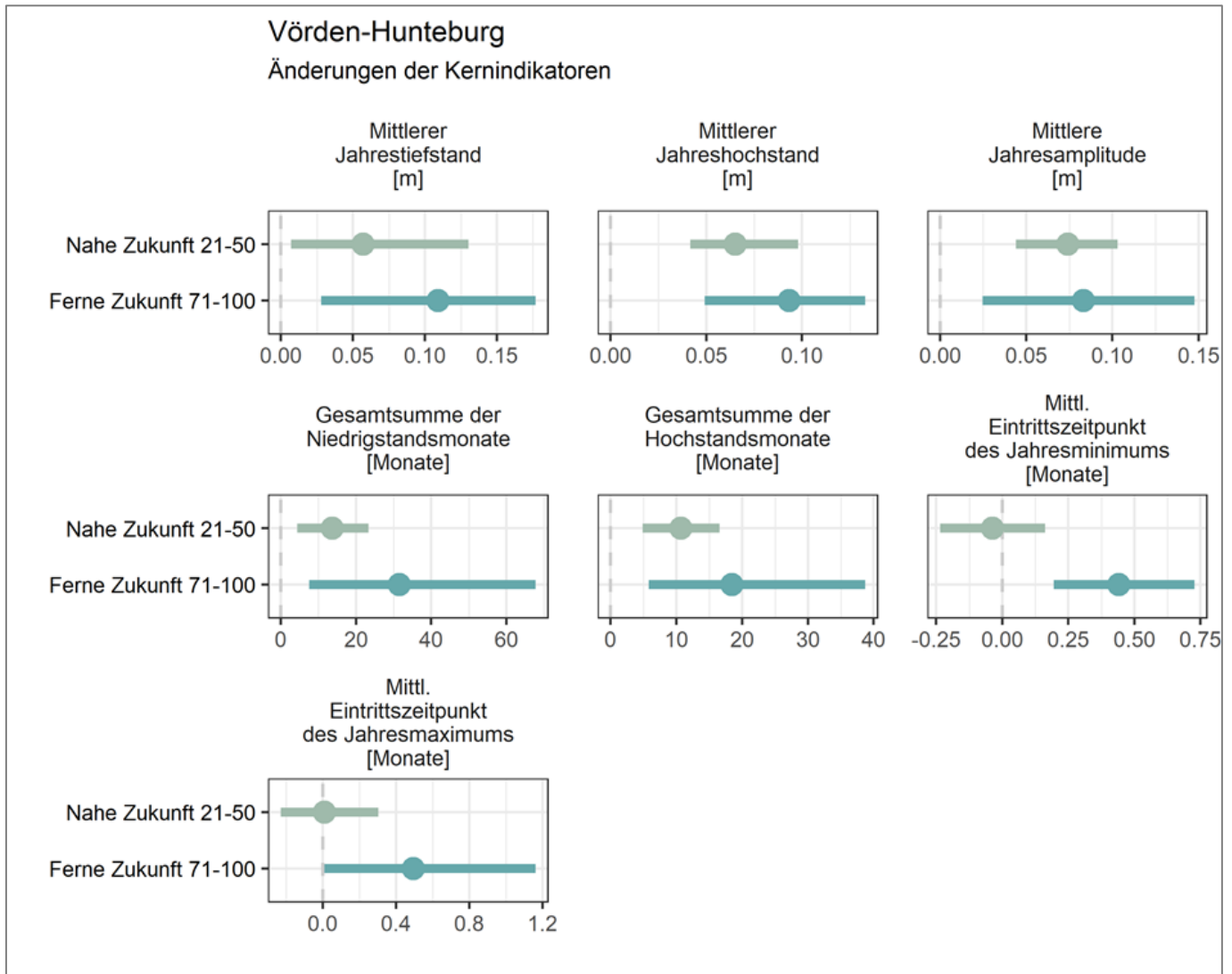


Abbildung 7.88: Übersicht der Bandbreite der projizierten Änderungen\* der Kernindikatoren im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

#### 7.4.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

In den vorherigen Abbildung 7.80 und Abbildung 7.88 zu den Änderungen der Kernindikatoren beider Strömungsmodelle zeigen sich zukünftig sowohl Zunahmen als auch Abnahmen der betrachteten Größen. Für die Mehrzahl der Kernindikatoren wird jedoch eine Zunahme modelliert. Das Ausmaß der Änderungen nimmt dabei generell nur einen geringen Umfang ein, der im Modellgebiet Sandelermöns teils etwas höher ausfällt. So zeigt sich dort eine Zunahme des Mittleren Jahrestiefstandes (MEAN\_Y\_MIN) und des Mittleren Jahreshochstandes (MEAN\_Y\_MAX) um maximal ca. 0,4 m in der fernen Zukunft. Im Modellgebiet Vörden-Hunteburg sind es dagegen nur ca. 0,15 m. Die Änderungen der mittleren Jahresamplitude (MEAN\_Y\_AMPL) fallen im Mittel mit einer Zunahme von rund 0,1 m in der fernen Zukunft in beiden Modellgebieten ähnlich hoch aus. Die Gesamtsummen der Niedrig- und Hochstandsmonate (MEAN\_MO\_MAX und MEAN\_MO\_MIN) zeigen für beide Modellgebiete sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft eine Zunahme, welche in der fernen Zukunft stets höher ausfällt. Für die

betrachteten 30-jährigen Zeiträume wird für die Messstellen im Strömungsmodell Vörden-Hunteburg eine Zunahme der Niedrigstandsmonate mit einer Bandbreite von ca. 10-65 Monaten modelliert. Die Hochstandsmonate weisen im selben Zeitraum eine Bandbreite von ca. 5-40 Monaten auf. Für die drei Messstellen im Modellgebiet Sandelermöns zeigen sich im Mittel höhere Zunahmen mit einer maximalen Änderung von bis zu ca. 100 zusätzlichen Niedrigstandsmonaten bzw. bis zu ca. 80 Hochstandsmonaten im Zeitraum der fernen Zukunft (2071-2100). Beim Mittleren Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums (YR\_GW\_LOW) zeigen sich im Mittel in der nahen Zukunft in beiden Modellgebieten keine Änderungen. In der fernen Zukunft ergibt das Änderungssignal eine Verschiebung von im Mittel ca. 0,4 Monaten (also rund 12 Tagen) nach hinten. Ähnlich zeigen sich die Ergebnisse beim Mittleren Eintrittszeitpunkt der Jahresmaxima (YR\_GW\_HIGH). Im Modellgebiet Vörden-Hunteburg liegt die Bandbreite der Änderungen bei ca. -0,2 bis +0,25 Monaten (ca. -6 bis +8 Tage) in der nahen und bei 0 bis ca. 1,2 Monaten (0 bis 36 Tage) in der fernen Zukunft. Im Modellgebiet Sandelermöns wird für die nahe und ferne

Zukunft dieselbe Verschiebung der Mittleren Eintrittszeitpunkte der Jahresmaxima modelliert. Die Bandbreite umfasst dabei die Verschiebung hin zu einem früheren als auch zu einem späteren Eintrittszeitpunkt dieses Indikators, der im Mittel bei ca. 0,17 Monaten (ca. 5 Tage) nach hinten verschoben wird.

#### 7.4.4 Schlussfolgerung

Nach den Ergebnissen der Modellierungen zukünftiger Grundwasserstandsveränderungen durch die beiden Strömungsmodelle nimmt die Anzahl von Monaten mit Grundwasserniedrigstands- und Grundwasserhochstandssituationen in beiden Modellgebieten bis zum Ende des Jahrhunderts zu. Die Intensitäten verändern sich dabei jedoch nicht wesentlich. Die Mittelwerte der jährlichen Maxima und Minima sowie die sich daraus ergebenden Mittelwerte der Jahresamplituden nehmen sowohl für die nahe als auch für die ferne Zukunft nur leicht zu. Daraus ergibt sich eine Erhöhung der mittleren winterlichen Grundwasserstände, ebenso wie eine Erhöhung, also Abschwächung, der sommerlichen Minima. Des Weiteren findet, vor allem in der fernen Zukunft, eine leichte Verschiebung der Eintrittszeitpunkte von Jahresminimum und -maximum hin zu einem späteren Zeitpunkt im Jahr statt.

Die Ergebnisse spiegeln generell die projizierten Änderungen der klimatischen Eingangsgrößen des verwendeten Klimaprojektionsensembles wieder. Dazu gehören vor allem die projizierte Erhöhung der Temperatur sowie die saisonale Verschiebung der Niederschläge hinein in die Wintermonate und den Frühling, die mit einer Zunahme der Gesamtniederschlagsmenge einhergehen (DWD 2018). Die veränderte Saisonalität der Niederschläge zeigt sich hier unter anderem in der Verschiebung der Eintrittszeitpunkte von Jahresminima und -maxima. Ebenfalls findet sich diese Veränderung in der Zunahme der Gesamtsummen der Grundwasserniedrigstands- und -hochstandsmonate wieder, d.h. einer Verlängerung der sommerlichen Niedrigstands- und der winterlichen Hochstandsphasen. Beeinflusst werden diese Entwicklungen ebenso durch die projizierte Zunahme der Gesamtniederschlagsmenge sowie durch längere Trockenphasen in den Sommermonaten. Widersprüchlich zu diesen projizierten klimatischen Änderungen steht hier nur die Erhöhung des mittleren Jahrestiefstandes an den betrachteten Messstellen, da eher eine Abnahme des Mittelwertes der jährlichen Minima zu erwarten gewesen wäre. Hier ist vorstellbar, dass die erhöhten Niederschlagsmengen im Winterhalbjahr die Erhöhung des mittleren Jahrestiefstandes bedingen. Die Zunahme der Mittleren Jahreshochstände hingegen, entspricht wiederum dem projizierten Anstieg der winterlichen Niederschläge.

Die Änderungen der Kernindikatoren decken sich ebenfalls mit den Projektionen der Grundwasserneubildung, die hier als Eingangsdaten für die

Grundwasserströmungsmodellierung dienen und mit denen schon zuvor in einem ersten Schritt der Wirkmodellierung die klimatischen Eingangsdaten des verwendeten Klimaprojektionsensembles weiterverarbeitet wurden. Ergebnisse einer solchen Wirkmodellierung wurden bereits anhand eines früheren Klimaprojektionsensembles (siehe HAJATI et al., 2022) in der Klimawirkungsstudie Niedersachsen (MU, 2019) veröffentlicht. Die grundlegenden Aussagen haben sich seitdem nicht verändert (LBEG, 2022) und spiegeln sich hier in den Ergebnissen der beiden Strömungsmodelle wieder. Dazu gehören im Wesentlichen eine vermehrte Grundwasserzehrung im Sommer sowie eine erhöhte Grundwasserneubildung im Winter, die sich, mit regionalen Unterschieden, im langjährigen Mittel ausgleichen und somit in der mittleren Tendenz der Bandbreite zu wenig Änderungen führen. Sichtbar wird dies hier zum Beispiel im eher geringen Ausmaß der Änderungen der Kernindikatoren beider Modellgebiete. Dennoch sind insbesondere die projizierten saisonalen Änderungen, wie schon beschrieben, in beispielsweise den Änderungen der Gesamtsummen der Grundwasserniedrigstands- und -hochstandsmonate, präsent.

Die durchgeführten Modellierungen zeigen generell eine Verwendbarkeit der mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18 (ERTL et al., 2019) erzeugten projizierten Grundwasserneubildungsdaten in der weiteren Wirkmodellierung mit Grundwasserströmungsmodellen. Das Wasserhaushaltsmodell mGROWA wird unter anderem am Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) stetig weiterentwickelt und fortlaufend mit den neuesten Klimaprojektionsdaten angetrieben. Aktuelle Daten zur projizierten Grundwasserneubildung und deren Änderungen finden sich auf dem NIBIS®-Kartenserver (NIBIS®, 2022c). Bei der Anwendung von Grundwasserströmungsmodellen können stets nur Aussagen für das entsprechende Modellgebiet getroffen werden. Eine Übertragbarkeit von Ergebnissen auf andere Messstellen, die beispielsweise in derselben Naturregion liegen, ist nicht möglich. Des Weiteren führt die räumliche Begrenzung der Modellgebiete, in Kombination mit den für die Auswertung der Änderungssignale über den Delta-Change Ansatz benötigten 30jährigen Zeitreihen an Beobachtungswerten, leichter zu einem Ausschluss von Messstellen. Dies trifft insbesondere auf die Verwendung bereits bestehender Modelle zu, wie es hier der Fall ist. Obwohl die Strömungsmodelle grundsätzlich in der Lage sind, weitere projizierte Daten bzw. zukünftige Entwicklungen, wie zum Beispiel Änderungen von Oberflächengewässern oder Änderungen von Grundwasserentnahmen zu berücksichtigen, stehen solche Daten oftmals noch nicht zur Verfügung bzw. sind diese nur schwer abzuschätzen. Daher basieren die hier durchgeführten Modellierungen zukünftiger Grundwasserstandsveränderungen ausschließlich auf der Veränderung klimatischer Eingangsgrößen beziehungsweise der daraus resultierenden Grundwasserneubildung. Es kann keine Aussage darüber



getroffen werden, welchen Einfluss das nicht vollends ausgeschöpfte Potential der Grundwasserströmungsmodellierung hier im Vergleich mit den Methoden der anderen Teilprojekte hat. Die übereinstimmenden klimatischen Eingangsparameter der einzelnen Teilprojekte führen aber zu der Annahme, dass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse an den betrachteten, als anthropogen unbeeinflusst ausgewählten, Grundwassermessstellen gegeben ist.

#### 7.4.5 Zusammenfassung

In Teilprojekt D wurden zwei dreidimensionale numerische Grundwasserströmungsmodelle verwendet, um mit Hilfe von projizierten Grundwasserneubildungsdaten zukünftige Grundwasserstandsveränderungen an insgesamt 14 Grundwassermessstellen zu modellieren. Dafür wurde zum einen das bereits bestehende Modell Sandelermöns überarbeitet und instationär nachkalibriert und zum anderen wurde das Modell Vörden-Hunteburg neu erstellt und ebenfalls instationär kalibriert. Die Bearbeitung der Modelle fand mit der Modellierungssoftware FEFLOW (DHI, 2020 und 2021) statt. Nach erfolgreicher Kalibrierung beider Modelle wurden diese mit jeweils drei Klimaprojektionsläufen der Grundwasserneubildung aus mGROWA18 (ERTL et al., 2019) angetrieben. Auf Grund des dabei entstehenden enormen Rechenaufwandes, wurden aus dem bestehenden Klimaprojektionsensemble pro Modellgebiet jeweils ein minimaler, ein mittlerer und ein maximaler Lauf ausgewählt, um die Bandbreite des Kernensembles näherungsweise zu erhalten. Als Zwischenergebnis wurden projizierte Zeitreihen der Grundwasserstände der in den Modellen enthaltenen und als anthropogen unbeeinflusst geltenden Messstellen von 1971-2100 erzeugt. Diese projizierten Ganglinien wurden anschließend in Bezug auf in KliBiW7 definierte Indikatoren ausgewertet. Im Fokus standen dabei die Änderungen der Kernindikatoren in der nahen (2021-2050) und fernen (2071-2100) Zukunft mit Bezug zum Referenzzeitraum 1981-2010. Für die Ergebnisdarstellung der Kernindikatoren in den betrachteten Zeiträumen erfolgte eine Reduzierung auf insgesamt neun Messstellen, da die Berechnung der absoluten Änderungssignale über den Delta-Change Ansatz eine vollständige 30-jährige Messreihe an Beobachtungswerten im Referenzzeitraum bedingt. Die Ergebnisse zu den Änderungen der Kernindikatoren beider Strömungsmodelle zeigen in der Mehrheit eine Zunahme der betrachteten Indikatoren, die in der fernen Zukunft meist stärker ausfällt, insgesamt aber ein eher geringes Ausmaß aufweist. So nehmen die Gesamtsummen der Niedrigstands- und Hochstandsmonate bis zum Ende des Jahrhunderts zu. Ebenfalls zeigt sich eine leichte Erhöhung der mittleren winterlichen Jahreshochstände sowie eine Abschwächung der sommerlichen mittleren Jahrestiefststände, was sich in beiden Modellgebieten in einer geringen Erhöhung der mittleren Grundwasserstände widerspiegelt. Des Weiteren findet, vor allem in der fernen Zukunft, eine leichte Verschiebung der Eintrittszeitpunkte von Jahresminimum und -maximum hin zu einem späteren Zeitpunkt im Jahr

statt. Dabei sind die Aussagen zu den Ergebnissen der modellierten Änderungen der Kernindikatoren auf das jeweilige Modellgebiet beschränkt und können nicht auf andere Messstellen, beispielsweise in derselben Naturregion, übertragen werden. Die numerische Grundwasserströmungsmodellierung stellt ein etabliertes Verfahren zur Beantwortung wasserwirtschaftlicher Fragestellungen unter Berücksichtigung der umgebenden hydrogeologischen Verhältnisse dar. Die in Teilprojekt D erzeugten Ergebnisse werden daher im nachfolgenden Detailvergleich zu Absicherung der Ergebnisse auf Basis der Methoden der anderen Teilprojekte herangezogen.

## 8 Ergebnisvergleich Teilprojekte A, B, C

der

Auch werden einzelne Gebiete nur durch sehr wenige Messstellen repräsentiert (Tabelle 8.1).

Tabelle 8.1: Messstellenanzahl nach Region für den Vergleich der Teilprojekte A, B, C.

Region	Anzahl Messstellen
Bergland	5
Börden	1
Geestgebiete	102
Inseln	2
Marschen	2
Niederungsgebiete	133
Gesamt	245

### 8.1 Vorgehensweise

Aufgrund der unterschiedlichen methodischen Ansätze, Unterschieden in den verwendeten Datengrundlagen sowie aufgrund der Validierungsstrategien (mit voneinander abweichenden Messstellenpools) sind Abweichungen in den Aussagen der einzelnen Teilprojekte nicht auszuschließen. Der Vergleich der Teilprojekte ermöglicht eine Beurteilung grundsätzlicher Übereinstimmungen oder Abweichungen in den Modellaussagen der einzelnen Teilprojekte. Im Unterschied zur Auswertung der einzelnen Teilprojekte erfolgt die Zusammenführung der Teilergebnisse anhand der (in allen drei Teilprojekten) gemeinsam verwendeten Messstellen und Klimaprojektionen, d.h. die Auswertung basiert auf 245 Messstellen und 5 Klimaprojektionen. In den ausgewerteten Messstellen sind das östliche und südöstliche Niedersachsen deutlich unterrepräsentiert (Abbildung 8.1).

Analog zu den Einzelprojekten gibt Abbildung 8.2 einen vergleichenden Überblick der Ergebnisse für die einzelnen Teilprojekte A, B und C für die ausgewählten Kernindikatoren. Die genaueren Werte sind in Tabelle 8.2 abzulesen.

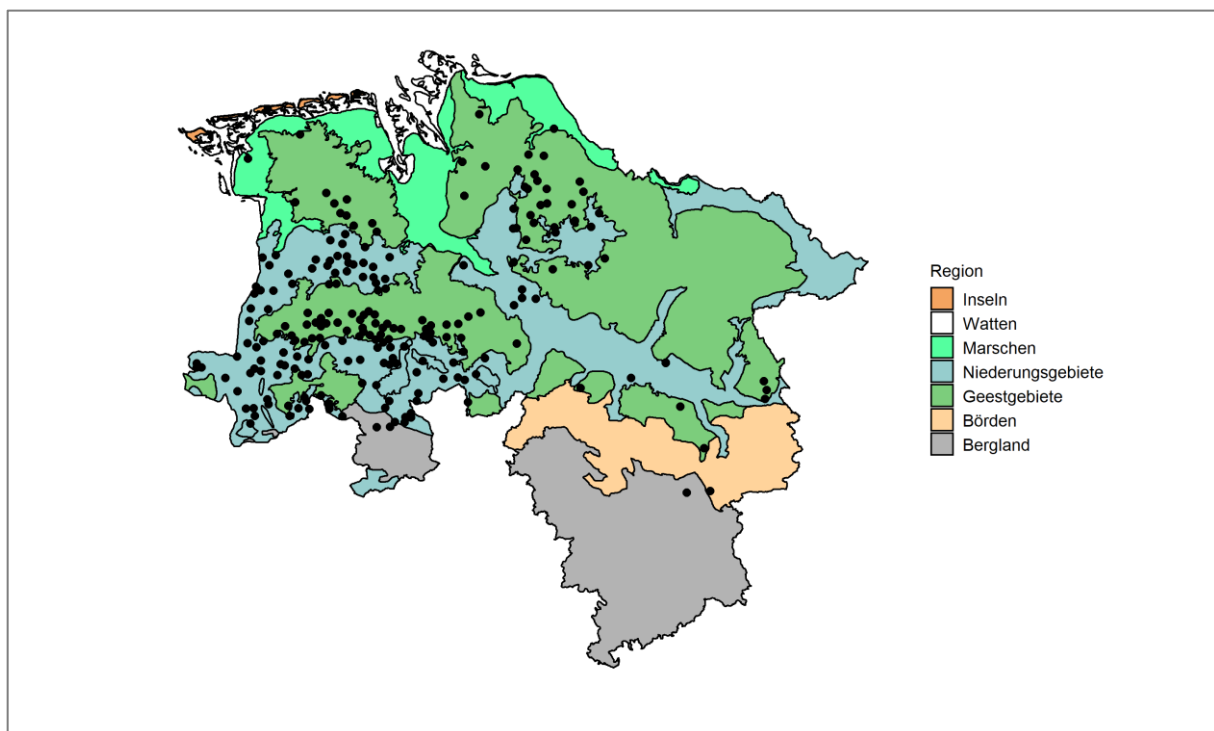


Abbildung 8.1: Lage der Messstellen für den Vergleich der Teilprojekte A, B, C

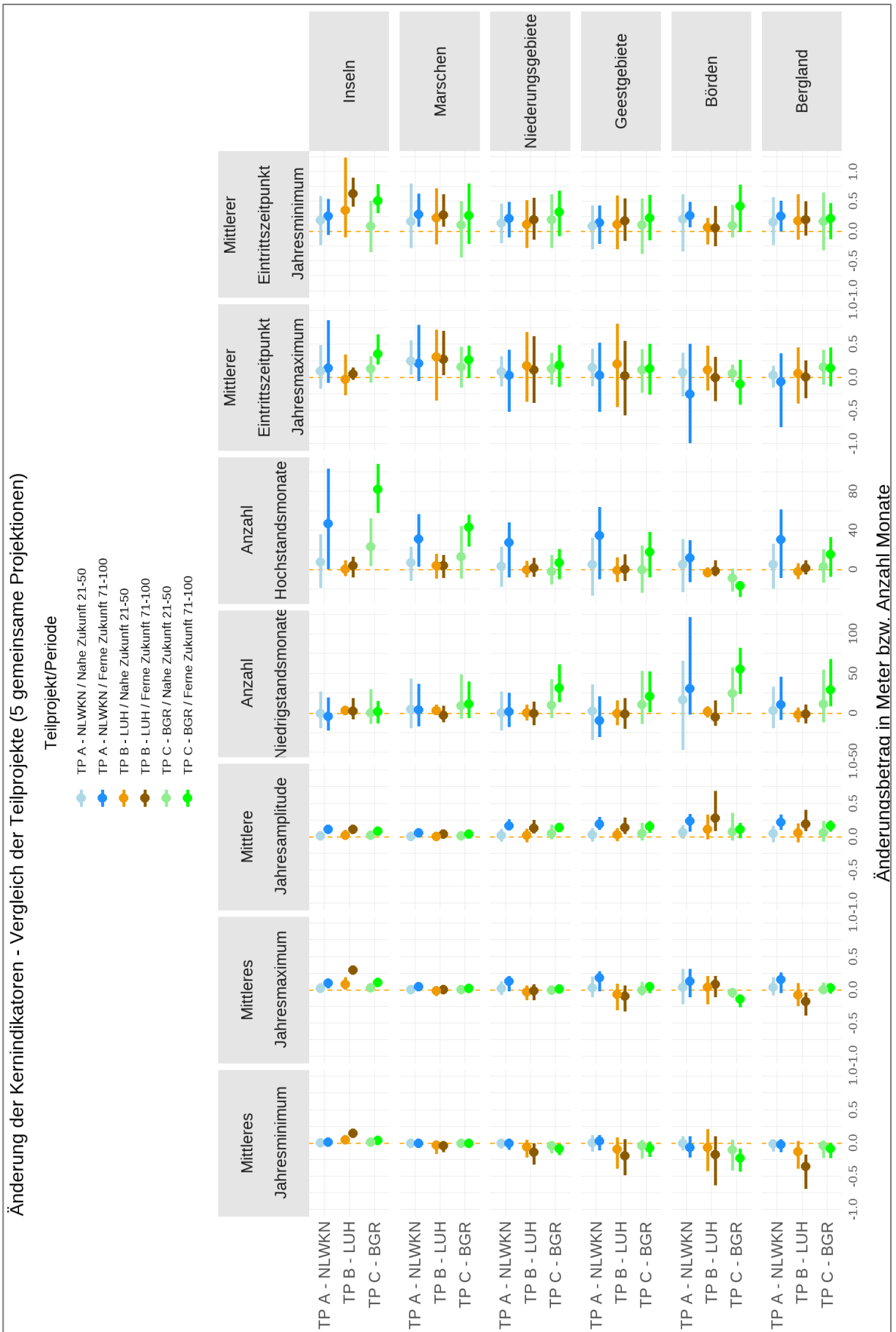


Abbildung 8.2: Vergleich der Teilprojekte A, B und C – Spannweite der Änderungen für die nahe Zukunft und ferne Zukunft (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) nach Teilgebieten.

Tabelle 8.2: Vergleich der Teilprojekte A,B,C: Tabellarische Übersicht über die mittleren regionalen Änderungssignale aus 5 Klimaprojektionen (Teil 1)

	Mittleres regionales Änderungssignal (aus 5 Klimaprojektionen)					
	Nahe Zukunft 21-50			Ferne Zukunft 71-100		
	TP A - NLWKN	TP B - IWW	TP C - BGR	TP A - NLWKN	TP B - IWW	TP C - BGR
<b>Mittleres Jahresminimum (Änderung in Meter)</b>						
Inseln	0,01	0,05	0,01	0,01	0,15	0,04
Marschen	0,00	-0,03	-0,01	0,00	-0,04	-0,01
Niederungsgebiete	0,00	-0,05	-0,04	0,00	-0,13	-0,08
Geestgebiete	0,00	-0,09	-0,04	0,03	-0,19	-0,07
Börden	0,00	-0,06	-0,10	-0,06	-0,17	-0,22
Bergland	-0,01	-0,13	-0,04	-0,02	-0,35	-0,09
Niedersachsen	0,00	-0,07	-0,04	0,01	-0,16	-0,08
<b>Mittleres Jahresmaximum (Änderung in Meter)</b>						
Inseln	0,02	0,08	0,04	0,11	0,30	0,12
Marschen	0,01	-0,01	0,01	0,05	0,00	0,02
Niederungsgebiete	0,02	-0,03	0,00	0,13	-0,01	0,02
Geestgebiete	0,03	-0,07	0,00	0,18	-0,09	0,05
Börden	0,04	0,04	-0,03	0,13	0,09	-0,13
Bergland	0,04	-0,07	0,01	0,16	-0,17	0,04
Niedersachsen	0,03	-0,05	0,00	0,15	-0,05	0,03
<b>Mittlere Jahresamplitude (Änderung in Meter)</b>						
Inseln	0,02	0,02	0,03	0,11	0,11	0,09
Marschen	0,01	0,01	0,02	0,06	0,05	0,04
Niederungsgebiete	0,03	0,02	0,05	0,17	0,13	0,14
Geestgebiete	0,03	0,03	0,06	0,19	0,14	0,16
Börden	0,07	0,11	0,08	0,24	0,28	0,11
Bergland	0,05	0,06	0,06	0,22	0,19	0,17
Niedersachsen	0,03	0,03	0,05	0,18	0,14	0,15
<b>Anzahl der Monate mit Grundwassertiefstand (Änderung als Summe der Monate über 30-Jahres-Zeitraum)</b>						
Inseln	-0,7	3,2	0,1	-4,4	2,5	1,6
Marschen	5,2	3,7	9,5	4,1	-2,3	11,3
Niederungsgebiete	0,5	0,4	10,5	1,6	-0,3	31,5
Geestgebiete	3,0	-0,3	10,6	-9,0	-0,8	21,1
Börden	17,1	1,9	25,0	30,9	-4,7	55,9
Bergland	3,7	-2,0	11,9	11,1	-1,3	29,3
Niedersachsen	1,7	0,10	10,5	-2,5	-0,5	26,8
<b>Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand (Änderung als Summe der Monate über 30-Jahres-Zeitraum)</b>						
Inseln	7,5	0,7	23,5	47,2	4,2	82,3
Marschen	6,9	3,9	13,3	31,4	4,2	43,2
Niederungsgebiete	3,6	-0,2	-2,1	27,7	1,5	7,3
Geestgebiete	5,1	-0,9	-0,1	34,8	0,3	18,1
Börden	5,2	-3,0	-8,5	12,2	-1,4	-16,7
Bergland	5,3	-2,1	2,9	30,6	1,6	15,9
Niedersachsen	4,3	-0,5	-0,9	30,8	1,1	12,8

Tabelle 8.3: Vergleich der Teilprojekte A,B,C: Tabellarische Übersicht über die mittleren regionalen Änderungssignale aus 5 Klimaprojektionen (Teil 2)

	Mittleres regionales Änderungssignal (aus 5 Klimaprojektionen)					
	Nahe Zukunft 21-50			Ferne Zukunft 71-100		
	TP A - NLWKN	TP B - IWW	TP C - BGR	TP A - NLWKN	TP B - IWW	TP C - BGR
<b>Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums (Änderung in Monaten (negative Werte = früher, positive Werte = später))*</b>						
Inseln	0,2	0,4	0,1	0,3	0,6	0,5
Marschen	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3
Niederungsgebiete	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
Geestgebiete	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Börden	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,4
Bergland	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
Niedersachsen	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
<b>Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums (Änderung in Monaten (negative Werte = früher, positive Werte = später))*</b>						
Inseln	0,1	-0,0	0,1	0,1	0,1	0,4
Marschen	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3
Niederungsgebiete	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2
Geestgebiete	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1
Börden	0,1	0,1	0,1	-0,3	0,0	-0,1
Bergland	0,0	0,1	0,2	-0,1	0,0	0,1
Niedersachsen	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2
*) 0,1 Monate entsprechen ca. 3 Tagen						

## 8.2 Mittleres Jahresminimum

Im Teilprojekt A zeigt der mittlere Jahrestiefstand in der nahen und fernen Zukunft in allen Regionen keine wesentlichen Unterschiede zum Referenzniveau, alle Änderungen bleiben im Mittel < 0,1 m. Teilprojekt C zeigt in fast allen Regionen ebenfalls Werte nahe dem Referenzniveau, mit einer Tendenz zu einer geringfügigen Absenkung, die zur fernen Zukunft zunimmt, mit Ausnahme der Börden aber im Mittel -0,1 m nicht überschreitet. Für die Börden wurde für die ferne Zukunft in TP C eine Absenkung von im Mittel -0,2 m ermittelt.

Die Veränderungen im Teilprojekt B gegenüber dem Referenzniveau fallen in vielen Regionen deutlich stärker aus als in den anderen Teilprojekten, vor allem in der fernen Zukunft. Die mittleren Absenkungen liegen hier zwischen -0,04 und -0,35 m. Die gesamte Spanne zwischen der maximalen und minimalen Änderung fällt dabei in Teilprojekt B größer aus als in den Teilprojekten A und C. Insgesamt liegt die Bandbreite der projizierten Änderungen über alle Teilprojekte und Regionen zwischen rund +0,25 und -0,7 m.

In der Region „Inseln“ zeigen alle Teilprojekte eine geringe Zunahme gegenüber dem Referenzzustand. Die Beträge

bleiben dabei in Teilprojekt A und C sehr gering mit weniger als 0,05 m. In Teilprojekt B zeigt sich eine geringe Zunahme bis ca. 0,15 m in der fernen Zukunft.

## 8.3 Mittleres Jahresmaximum

Der mittlere Jahreshochstand bleibt in den Teilprojekten A und C nahezu gleich oder steigt zumeist nur geringfügig an, der Anstieg nimmt von der nahen zur fernen Zukunft zu. Die Änderungsbeträge bleiben im Mittel gering in der Größenordnung von 0 m bis unter 0,2 m. Eine Ausnahme weist Teilprojekt C in den Börden auf, hier erfolgt eine geringe Abnahme der mittleren Jahreshochstände, das Ergebnis basiert jedoch nur auf einer Messstelle.

Teilprojekt B zeigt in den Regionen Bergland und Geestgebiete im Gegensatz zu den Teilprojekten A und C eine geringe Abnahme der mittleren Jahreshochstände, die mittleren Änderungsbeträge liegen in der fernen Zukunft bei -0,17 m und -0,09 m. Ansonsten ändert sich das mittlere Jahresmaximum nicht wesentlich im Vergleich zum Referenzzeitraum.

Insgesamt liegt die Bandbreite der projizierten Änderungen über alle Teilprojekte und Regionen zwischen rund +0,3 und -0,4 m.

## 8.4 Mittlere Jahresamplitude

Für die nahe Zukunft zeigen alle Teilprojekte eine sehr geringe Zunahme der mittleren Jahresamplitude an, die Änderungsbeträge bleiben im Mittel zumeist unter 0,1 m. Für die ferne Zukunft zeigen alle Teilprojekte im Mittel eine geringe Zunahme der mittleren Amplituden um 0,1 m in den Inseln und Marschen und 0,1 m bis < 0,3 m in den übrigen Regionen. Einzig Teilprojekt C zeigt im Vergleich zu den Teilprojekt A und B in den Börden eine deutlich geringere Veränderung.

Insgesamt liegt die Bandbreite der projizierten Änderungen über alle Teilprojekte und Regionen zwischen rund -0,1 und +0,7 m.

## 8.5 Anzahl der Monate mit Grundwassertiefstand

Teilprojekt A zeigt eine geringe Zunahme der Anzahl der Monate mit Grundwassertiefstand mit Ausnahme der Inseln und der Geestgebiete. Der mittlere Änderungsbetrag liegt in der fernen Zukunft zwischen 2 und 31 Monaten. Für die Inseln wird hierbei eine Abnahme von 4 Monaten und für die Geestgebiete von 9 Monaten berechnet.

Die Anzahl der Monate mit Grundwassertiefstand bleibt im Teilprojekt B in allen Regionen weitgehend unverändert im Vergleich zum Referenzzeitraum. Die mittleren Änderungsbeträge liegen zwischen -5 und +4 Monaten.

Teilprojekt C zeigt dagegen mit Ausnahme der Inseln eine generelle Zunahme der Monate mit Grundwassertiefstand, die mittleren Änderungsbeträge liegen zwischen 10 und 56 Monaten und nehmen von der nahen Zukunft (10– 25 Monate) zur fernen Zukunft (11 bis 56 Monate) zu. Diese Veränderungen fallen deutlich größer aus als in Teilprojekt A. Auf den Inseln werden keine Veränderungen deutlich.

Insgesamt liegt die Bandbreite der projizierten Änderungen über alle Teilprojekte und Regionen zwischen rund -45 und +120 Monaten.

## 8.6 Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand

Teilprojekt A zeigt in der nahen Zukunft in allen Regionen eine geringe Zunahme der Monate mit Grundwasserhochstand, die mittlere Änderung beträgt weniger als 10 Monate (4-8 Monate). In der fernen Zukunft nimmt die Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand dagegen in allen Gebieten deutlich zu, die mittleren Änderungsbeträge liegen dann zwischen 12 und 47 Monaten.

Die Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand bleibt im Teilprojekt B in allen Regionen weitgehend unverändert. Die Änderungsbeträge liegen im Mittel zwischen -3 und +4 Monaten.

Das Teilprojekt C zeigt für die nahe Zukunft überwiegend keine Veränderung, die mittleren Änderungsbeträge liegen zwischen -8 in den Börden und -2 bis +3 im Bergland, den Niederungsgebieten und den Geestgebieten. Lediglich für Insel und Marschen werden deutliche Änderungsbeträge von 23 und 13 Monaten ausgewiesen. In der fernen Zukunft nimmt die Anzahl der Monate mit Grundwasserhochstand mit Ausnahme der Börden deutlich zu. Extremwerte von im Mittel 43 bzw. 30 Monaten werden auf den Inseln und in den Marschen erreicht, Änderungsbeträge von 7-18 in Bergland, Geest- und Niederungsgebieten. In den Börden wird eine Abnahme um 16 Monate ausgewiesen. Hier ergibt sich demnach ein sehr heterogenes Bild. Die Ergebnisse für Börden, Inseln und Marschen basieren jedoch auf sehr wenigen Messstellen und lassen sich nicht verallgemeinern.

Insgesamt liegt die Bandbreite der projizierten Änderungen über alle Teilprojekte und Regionen zwischen rund -25 und +110 Monaten.

## 8.7 Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums

Alle Teilprojekte zeigen eine geringfügige Verspätung des Eintrittszeitpunktes des Jahresminimums an. Diese Verspätung erfolgt ähnlich in allen Gebieten und nimmt von der nahen zur fernen Zukunft nur geringfügig zu, in den Inseln etwas deutlicher. Die Verspätung beträgt jeweils im Mittel zwischen rund 0,1 bis 0,3 Monaten, entsprechend ca. 2-11 Tage. Auf den Inseln werden zwischen rund 0,3 (Teilprojekt A) und 0,6 Monate (Teilprojekt B) berechnet, das entspricht ca. 8 bzw. 19 Tagen.

Insgesamt liegt die Bandbreite der projizierten Änderungen über alle Teilprojekte und Regionen zwischen rund -0,5 und +1,25 Monaten (-2 bis +7 Wochen).

## 8.8 Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums

Alle Teilprojekte zeigen für die nahe Zukunft eine geringfügige Verspätung des Eintrittszeitpunktes des Jahresmaximums an. Die Verspätung beträgt im Mittel zwischen rund 0 bis 0,3 Monaten, entsprechend ca. 0-10 Tage.

Im Teilprojekt A erfolgt der Eintritt in der fernen Zukunft mit Ausnahme der Inseln wieder etwas früher als in der nahen Zukunft. Im Bergland, in den Geestgebieten und den Niederungsgebieten ergibt sich mit mittleren Änderungsbeträgen von +/- 0,05 Monaten (< 2 Tage) kein relevanter Unterschied zum Referenzzeitraum, in den Börden erfolgt der Eintritt jedoch ca. 0,25 Monate (~ 8 Tage) früher als im Referenzzeitraum (eine Messstelle).

Teilprojekt B verhält sich ähnlich wie Teilprojekt A, auch hier erfolgt von der nahen zur fernen Zukunft ein Rückgang der Änderungsbeträge zum Referenzzeitraum, mit Ausnahme der Inseln. Dabei wird in den Niederungen und Marschen das Referenzniveau noch geringfügig überschritten (4-8 Tage), ansonsten bleibt es in etwa erhalten.

In Teilprojekt C nimmt die Verspätung von der nahen zur fernen Zukunft weiter zu auf im Mittel etwa 0,15 bis 0,35 Monate (bzw. 4-11 Tage). Ausnahme sind hier die Börden, in denen in der fernen Zukunft ein früherer Eintritt des Jahresmaximums gegenüber dem Referenzzeitraum um 0,1 Monate (~3 Tage) angezeigt wird.

Insgesamt liegt die Bandbreite der projizierten Änderungen über alle Teilprojekte und Regionen zwischen rund -1,0 und +0,8 Monaten (-4 bis +3 Wochen).

## 9 Detailvergleich der Ergebnisse zwischen den einzelnen Teilprojekten

### 9.1 Einführung

In diesem Projekt wurden vier verschiedene methodische Ansätze zur Abschätzung von Grundwasserständen für die Zukunft auf Basis eines Ensembles von Klimaprojektionen angewendet.

Im Gegensatz zu den Ansätzen aus Teilprojekt A (NLWKN), B (IWW) und C (BGR) handelt es sich bei den Strömungsmodellen von Teilprojekt D (LBEG) um Modelle, welche die gebietsspezifische hydrogeologische Situation detailliert berücksichtigen (siehe Kapitel 7.4.1) mit den Modellbeschreibungen). Der Grundwasserstockwerksbau, die als Vorflut dienenden Gewässer und die Grundwasserentnahmen wurden in den Modellen von TP D abgebildet und die projizierte monatliche Grundwasserneubildung flächendifferenziert eingebunden. Die Verwendung von Grundwasserströmungsmodellen zur Identifizierung von Auswirkungen in Wasserrechtsverfahren sind gängige Praxis in Niedersachsen. Somit werden die Messstellen aus Teilprojekt D hier als Referenz verwendet, um einen Detailvergleich durchführen zu können. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Teilprojekte mit einander verglichen werden, um Stärken und Schwächen sowie Unterschiede und Gemeinsamkeiten der einzelnen Methoden benennen zu können.

### 9.2 Methodisches zum Detailvergleich

Die Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte werden anhand ausgewählter Messstellen miteinander verglichen. Die Auswahl der verwendeten Messstellen erfolgte nach den folgenden Kriterien:

- Messstellen für die mittels der Strömungsmodellierung zukünftige Grundwasserstände simuliert werden konnten
- Delta- Change-Ansatz setzt eine 30jährige Zeitreihe während des Referenzzeitraumes (1981-2010) voraus.

Diese Kriterien werden von fünf Messstellen erfüllt (Tabelle 9.1). Für diese Messstellen konnten in den einzelnen Teilprojekten A, B und D Ergebnisse mit ausreichender Vorhersagegüte generiert werden. Daher beschränkt sich dieser Detailvergleich auf die Ergebnisse der Teilprojekte A, B und D, da diese Messstellen von Teilprojekt C nicht abgedeckt werden konnten.

Tabelle 9.1: Auswahl der Messstellen der beiden Strömungsmodelle für den Detailvergleich.

Sandelermöns		Vörden-Hunteburg	
MEST_NAME	MEST_ID	MEST_NAME	MEST_ID
Upjever	9610997	Hunteburg	9700133
Mueggenkrug	9850270	Schwege II	9700234
		Venner Moor	9700269

Mittels der Strömungsmodellierung wurden im Teilprojekt D für drei Klimaprojektionsläufe Grundwasserstände je Messstelle berechnet (siehe Kapitel 7.4.3). Somit werden im Folgenden eine minimale, eine mittlere und eine maximale Projektion je Messstelle dargestellt und miteinander verglichen und nicht alle berechneten Ergebnisse des gesamten Ensembles aus den Teilprojekten A und B.

Die Ergebnisse basieren ausschließlich auf der zukünftigen Veränderung klimatischer Eingangsgrößen oder der daraus resultierenden Grundwasserneubildung an anthropogen weitestgehend unbeeinflussten Grundwassermessstellen. Die tatsächliche zukünftige Entwicklung der Grundwasserstände kann sich z.B. auf Grund von Grundwasserentnahmen grundsätzlich anders darstellen. Da im Projekt ausschließlich unbeeinflusste Grundwassermessstellen verwendet wurden, sind die verwendeten methodischen Ansätze aus den Teilprojekten A-C nicht in der Lage, anthropogene Veränderungen im Wasserhaushalt zu berücksichtigen. Grundwasserströmungsmodelle des Teilprojektes D bieten dazu die Möglichkeit und im Fall des Modelles Sandelermöns wurden die Grundwasserentnahmen berücksichtigt, um den Gebietswasserhaushalt korrekt darzustellen. Die vorgestellten Ergebnisse können nicht auf andere Grundwassermessstellen in Niedersachsen übertragen werden.

### 9.3 Detailvergleich

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 9.1 bis Abbildung 9.25) werden die Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte an den fünf ausgewählten Messstellen gegenübergestellt. Dabei werden pro Messstelle stets fünf Abbildungen in derselben Abfolge gezeigt, die einen Vergleich der Modellergebnisse ermöglichen. Diese werden im Folgenden kurz generell beschrieben: mit der jeweils ersten Abbildung erfolgt eine Darstellung der projizierten Ganglinien, die als direkter Modelloutput den Verlauf der Grundwasserstände jedes Teilprojektes (Institution) über den gesamten Simulationszeitraum zeigen. Farblich hervorgehoben sind dabei die betrachteten Zeiträume der nahen Zukunft (2021-2050), der fernen Zukunft (2071-2100) und der Referenzzeit (1981-2010). Es ist zu beachten, dass sich je nach Güte der Kalibrierung ein systematischer Fehler, beispielsweise der eines an der Messstelle generell zu hoch simulierten Grundwasserstandes, über den ganzen Zeitraum fortsetzt.



Dennoch können bei dieser Darstellungsweise bereits mit einem linearen Trend die Richtungen der simulierten Veränderungen angezeigt werden. Die jeweils zweite und dritte Abbildung in den folgenden Kapiteln (9.3.1 und 9.3.2) zeigen je Messstelle eine Detailansicht der nahen und fernen Zukunft, somit wird die Gangliniendynamik dargestellt. So können mögliche Gemeinsamkeiten und Unterschiede im zeitlichen Verlauf der simulierten Grundwasserstände identifiziert werden. Anschließend erfolgt in der jeweils vierten Abbildung eine Darstellung der Änderungen der Kernindikatoren für die nahe und ferne Zukunft. Die Berechnungen der Änderungen beziehen sich, wie im gesamten Projekt, auf den Referenzzeitraum 1981-2010 und stellen hier eine Auswertung der in der ersten Abbildung gezeigten Ganglinien dar. Durch die Berechnung der Änderungssignale mit Hilfe des Delta-Change-Ansatzes können hier die oben genannten systematischen Fehler umgangen werden. Dabei werden die simulierten Änderungen der drei verwendeten Klimaprojektionsläufe pro Institution bzw. Teilprojekt als Bandbreite zusammengefasst und gegenübergestellt. Der sich in der jeweils vierten Abbildung von der Linie abhebende Punkt repräsentiert stets den mittleren Klimaprojektionslauf. In der fünften Abbildung wird als weitere Auswertung der Indikator „Y\_MEAN – Mittlerer Grundwasserstand“ zusammen mit den beobachteten Grundwasserständen dargestellt. Für diese Darstellungsform wurden die berechneten Änderungen der nahen und fernen Zukunft auf die Beobachtungsdaten der Referenzzeit aufaddiert. Auf diese Weise können hier die projizierten mittleren Grundwasserstände neben der beobachteten Ganglinie gezeigt werden, woraus sich an der entsprechenden Messstelle die tendenzielle Entwicklung der mittleren Verhältnisse ableiten lässt.

Das Strömungsmodell Sandelermöns liegt größtenteils in der Region Geest und das Strömungsmodell Vörden-Hunteburg liegt in der Region Niederung.

Für Sandelermöns und Vörden-Hunteburg zeigt der Vergleich, dass ganz grundsätzlich die Ergebnisspannbreite von naher zu ferner Zukunft zunimmt (siehe Abbildung 9.4, Abbildung 9.9, Abbildung 9.14 und Abbildung 9.19), dies kann mit der zunehmenden Ungenauigkeit der Klimamodelldaten begründet werden.

### 9.3.1 Sandelermöns

Das Strömungsmodell Sandelermöns zeigt für die beiden Messstellen „9610997“ und „9850270“ in den Abbildung 9.4 und Abbildung 9.9 jeweils für die nahe Zukunft eine größere Änderung des mittleren Jahrestiefstandes und des mittleren Jahreshochstandes zum Referenzzeitraum, als die Ergebnisse der Modelle aus Teilprojekt A (NLWKN) und Teilprojekt B (IWW). Daraus resultiert eine geringfügige ( $<0,05$ ) positive Zunahme der mittleren Jahresamplitude. Die Ergebnisse der Teilprojekte A und B zeigen hingegen eine

Abnahme, keine Änderung oder eine geringere Zunahme der mittleren Jahresamplitude.

Für die ferne Zukunft ergibt sich eine positive Änderung sowohl des mittleren Jahrestiefstandes ( $>0,3$  m) als auch des mittleren Jahreshochstandes ( $>0,4$  m) für die Teilprojekte B und D in der Messstelle 9850270 (siehe Abb. 27). Teilprojekt A zeigt für diese Messstelle keine oder nur eine sehr geringe Zunahme beider Werte. Für die Messstelle 9610997 zeigt sich in der fernen Zukunft für den mittleren Jahrestiefstand in allen drei Teilprojekten fast keine Änderung, der mittlere Jahreshochstand hingegen zeigt auch in dieser Messstelle eine Zunahme, welche in den Teilprojekten B und D mit Werten zwischen 0,1 m und 0,15 m deutlicher ausfällt als in Teilprojekt A ( $<0,05$  m). Die ferne Zukunft ist im Vergleich zur nahen Zukunft im Mittel durch höhere Grundwasserstände geprägt (vergleiche Abbildung 9.1, Abbildung 9.2, Abbildung 9.3, Abbildung 9.6, Abbildung 9.7, Abbildung 9.8 und Abbildung 9.10). In den Abbildung 9.5 und Abbildung 9.10 zeigt der Vergleich des mittleren Grundwasserstandes ebenfalls dieses Ergebnis. Für die Messstelle 9610997 (siehe Abbildung 9.5) zeigt sich in allen drei Teilprojekten eine geringe Zunahme und auch eine geringere Bandbreite zwischen den verschiedenen Projektionsdaten des mittleren Grundwasserstandes als für die Messstelle 9850270 (siehe Abbildung 9.10).

Für die nahe Zukunft zeigt der Vergleich der Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate und der Gesamtsumme der Hochstandsmonate ein vergleichbares Bild, wie für den mittleren Jahrestiefstand und den mittleren Jahreshochstand. Das Strömungsmodell errechnet eine größere Änderung als die Ergebnisse der Teilprojekte A und B und somit eine größere Variabilität.

Der mittlere Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums zeigt im Vergleich für die nahe Zukunft eine sehr geringe Zunahme für Teilprojekt A und eine geringe Abnahme für die Ergebnisse der Teilprojekte B und D (eine Abnahme bedeutet, dass das Jahresminimum früher eintritt). Für die ferne Zukunft hingegen ändern sich die Ergebnisse und zeigen, dass sich der Eintrittszeitung im Vergleich zum Referenzzeitraum verspätet. Die Verschiebung der Niederschläge in das Winterhalbjahr und die Zunahme der Niederschläge haben zur Folge, dass Tiefstand der Grundwasserstände sich in der fernen Zukunft zeitlich nach hinten verlagert. Für den mittleren Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums zeigen die Ergebnisse keine zeitliche Verschiebung zwischen naher und ferner Zukunft. Generell verspätet sich der Eintrittszeitpunkt bei allen drei Teilprojekten. Auch diese Ergebnisse lassen sich mit der Veränderung und Verlagerung der Niederschläge erklären. Die Auffüllung sowie die Entleerung des Grundwasserreservoirs werden dadurch zeitlich verlagert.

Im Vergleich performen die Modelle bei den Änderungen des mittleren Jahreshochstandes, der mittleren Jahresamplitude und der Gesamtsumme der Hochstandsmonate in der fernen Zukunft einheitlich (siehe Abbildung 9.4 und Abbildung 9.9). Für diese Größen liegt die gesamte Bandbreite aller Modelle im positiven Bereich. Für andere Größen sowohl in der nahem als auch in der fernen Zukunft performen die Modelle nicht einheitlich, hierbei zeigen die Ergebnisse des Teilprojektes B in einigen Fällen ein grundsätzlich anderes Verhalten bezogen auf die Bandbreite.

### 9.3.1.1 Messstelle 9610997

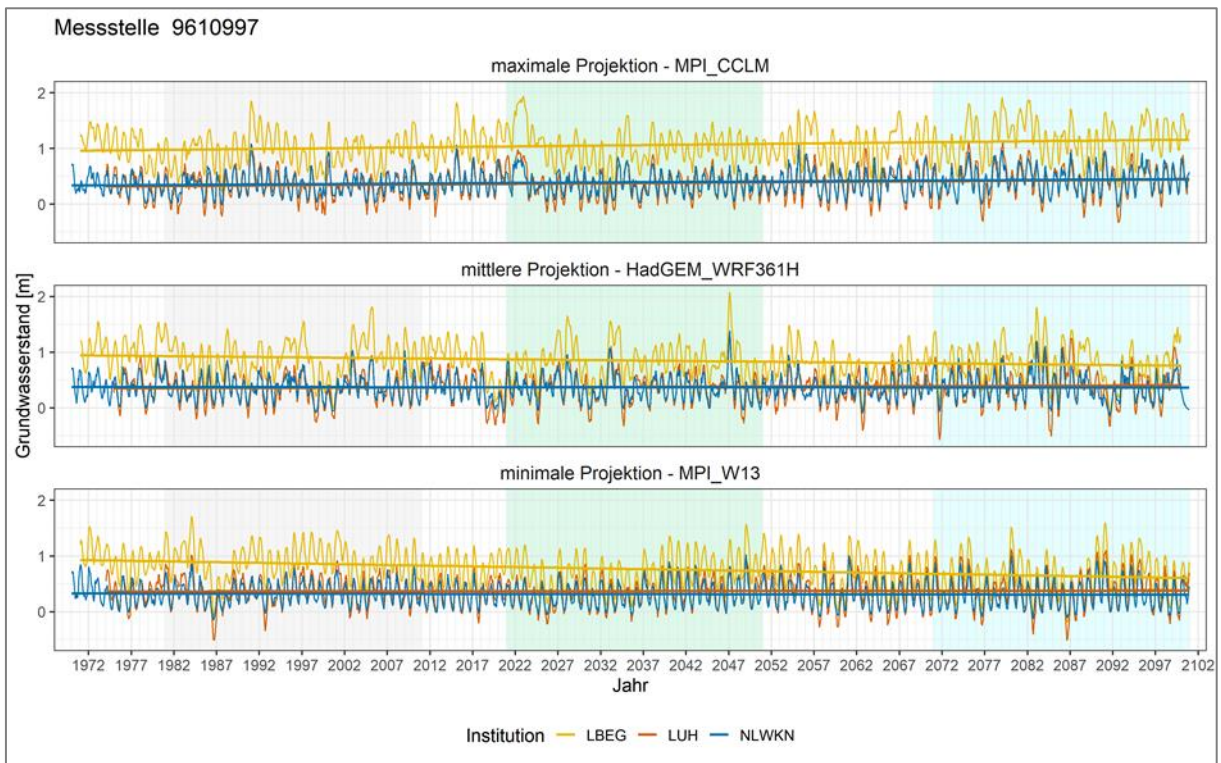


Abbildung 9.1 Modellierter Verlauf der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9610997 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Die Ganglinien decken den gesamten Simulationszeitraum ab, farblich hinterlegt sind die Zeiträume der Referenzzeit (1981-2010) sowie der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 und 2071-2100).

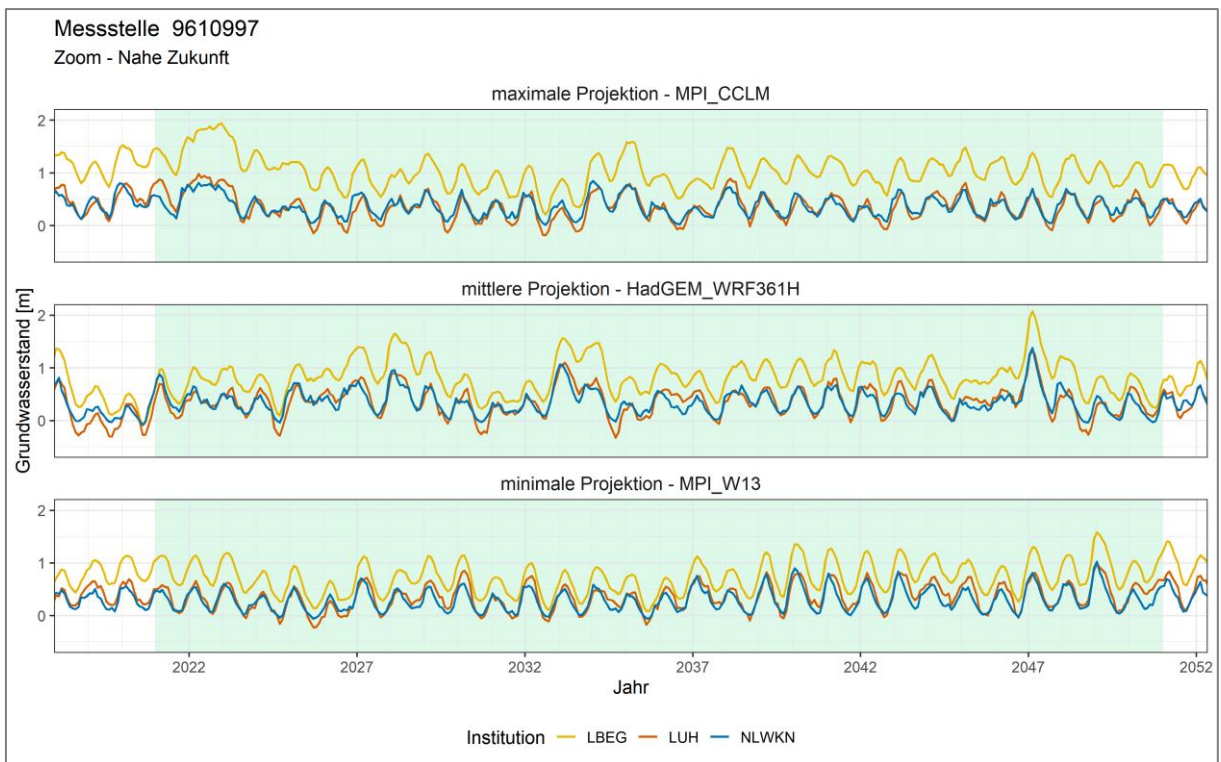


Abbildung 9.2: Zoom auf die nahe Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9610997 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der nahen Zukunft (2021-2050).

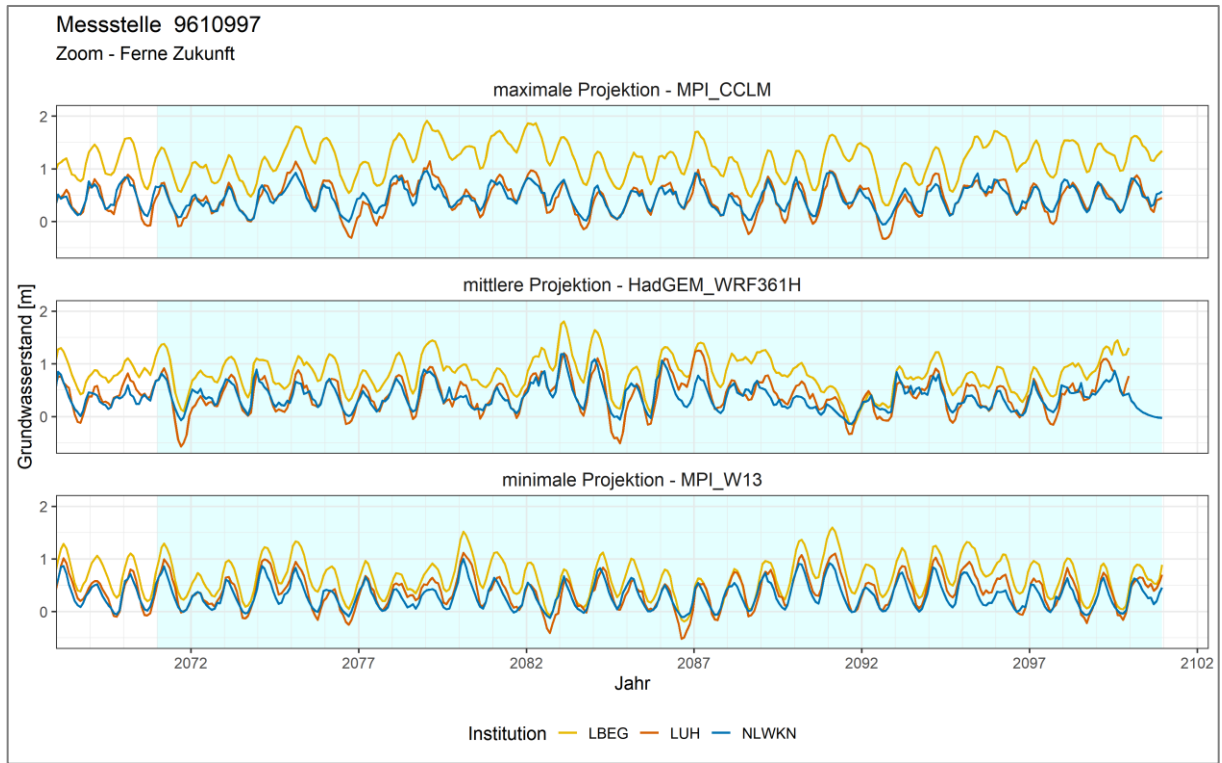


Abbildung 9.3 Zoom auf die ferne Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9610997 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der fernen Zukunft (2071-2100).

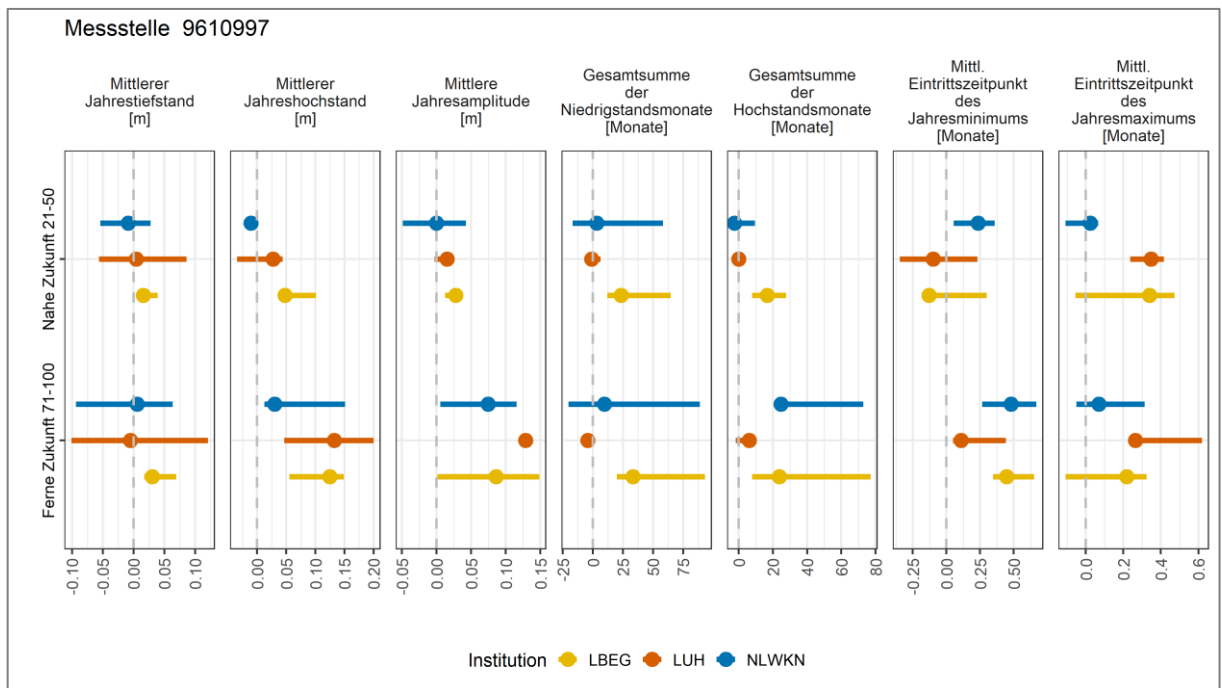


Abbildung 9.4: Bandbreite der Änderungen der Kernindikatoren (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9610997 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf.

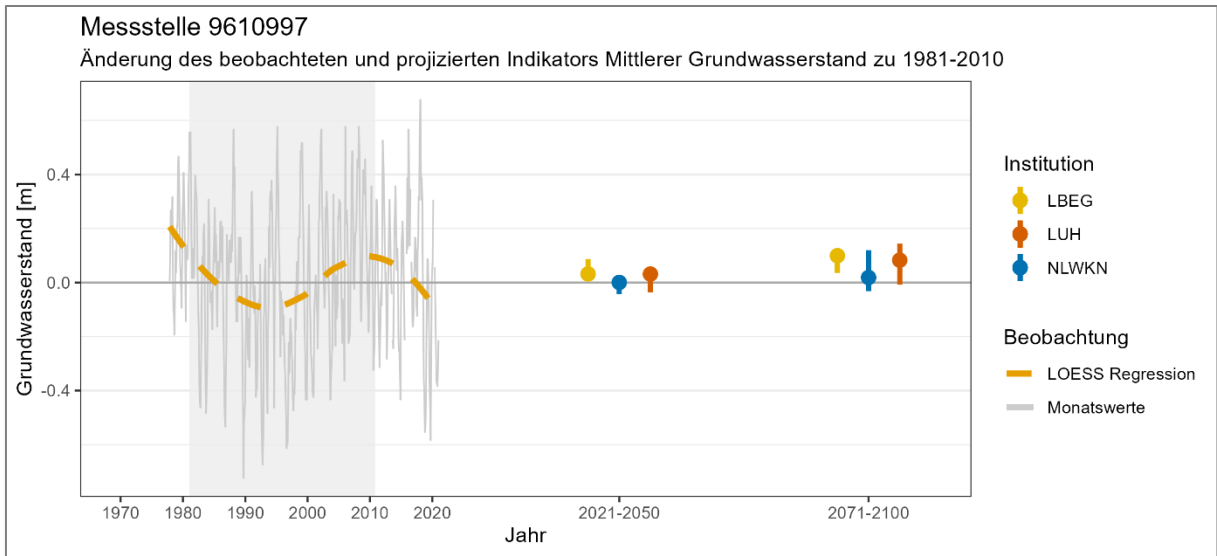


Abbildung 9.5: Änderung des beobachteten (links) und projizierten (rechts) Indikators Mittlerer Grundwasserstand sowie die Bandbreite des Indikators Mittlerer Grundwasserstand je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe (rechts) an der Messstelle 9610997 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der Referenzzeit (1981-2010).

### 9.3.1.2 Messstelle 9850270

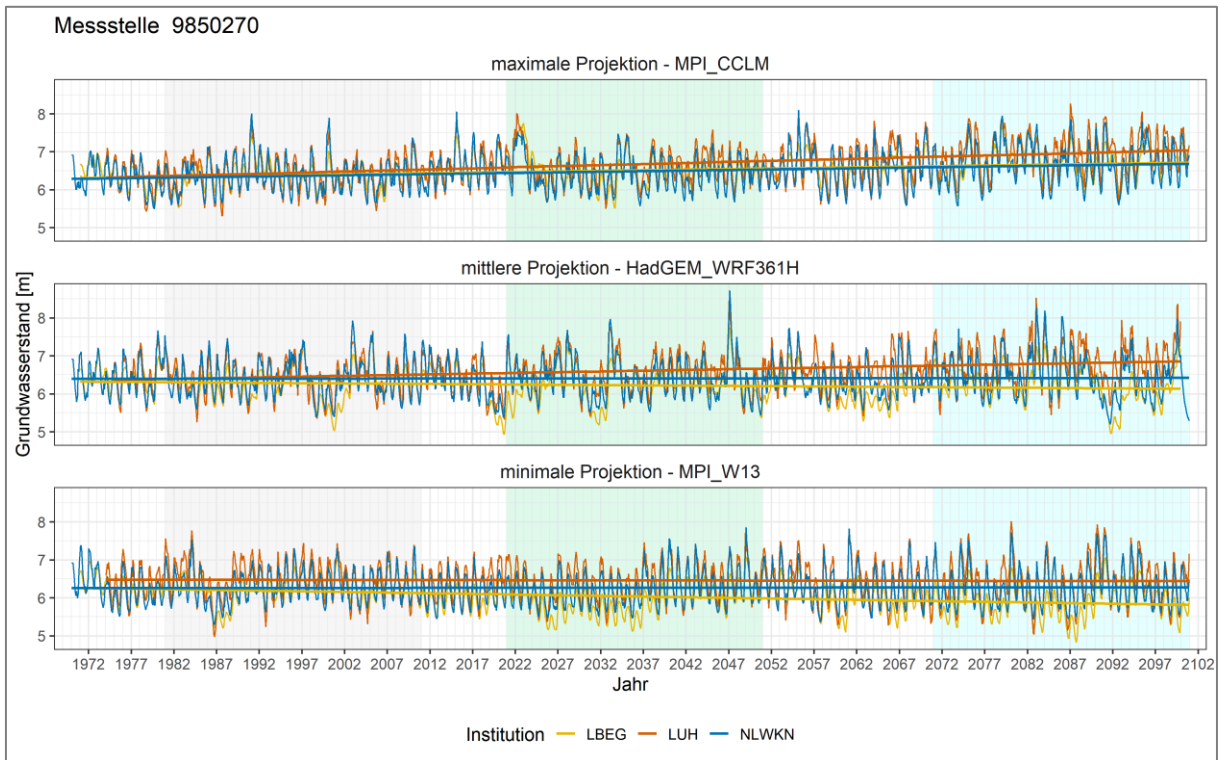


Abbildung 9.6: Modellierter Verlauf der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9850270 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Die Ganglinien decken den gesamten Simulationszeitraum ab, farblich hinterlegt sind die Zeiträume der Referenzzeit (1981-2010) sowie der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 und 2071-2100).

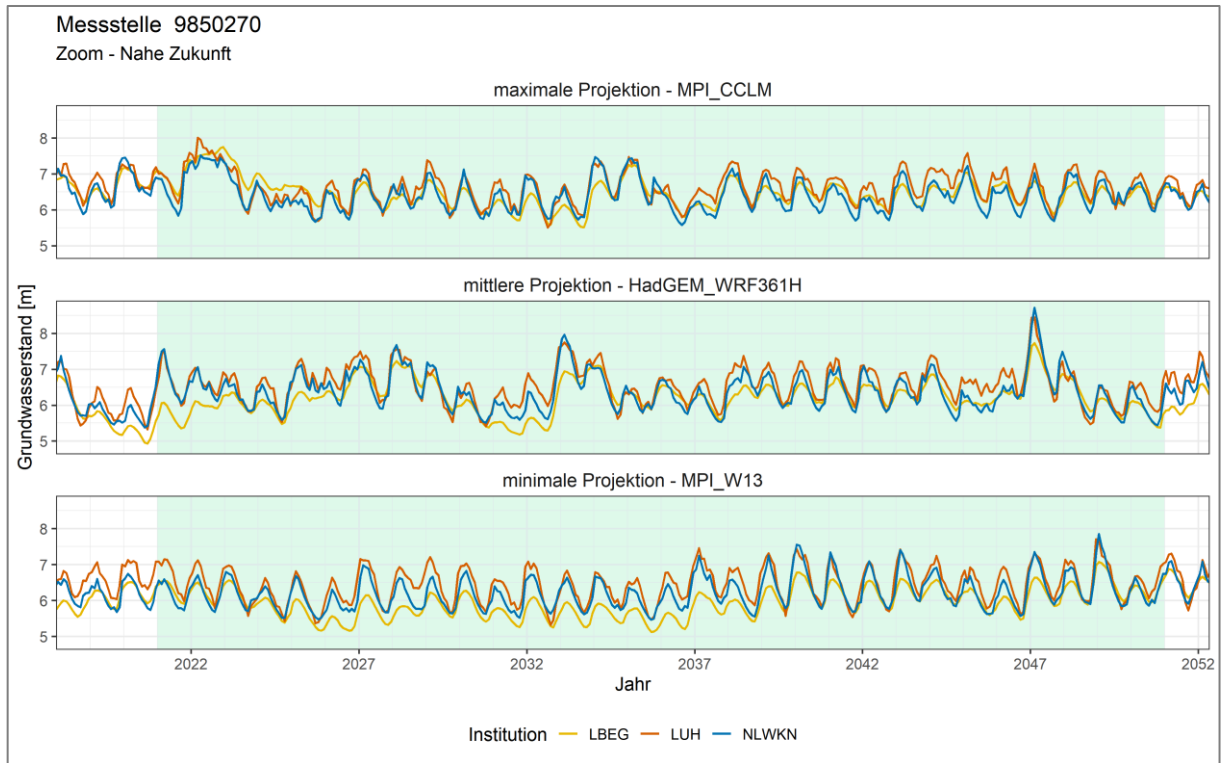


Abbildung 9.7: Zoom auf die nahe Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9850270 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der nahen Zukunft (2021 - 2050).

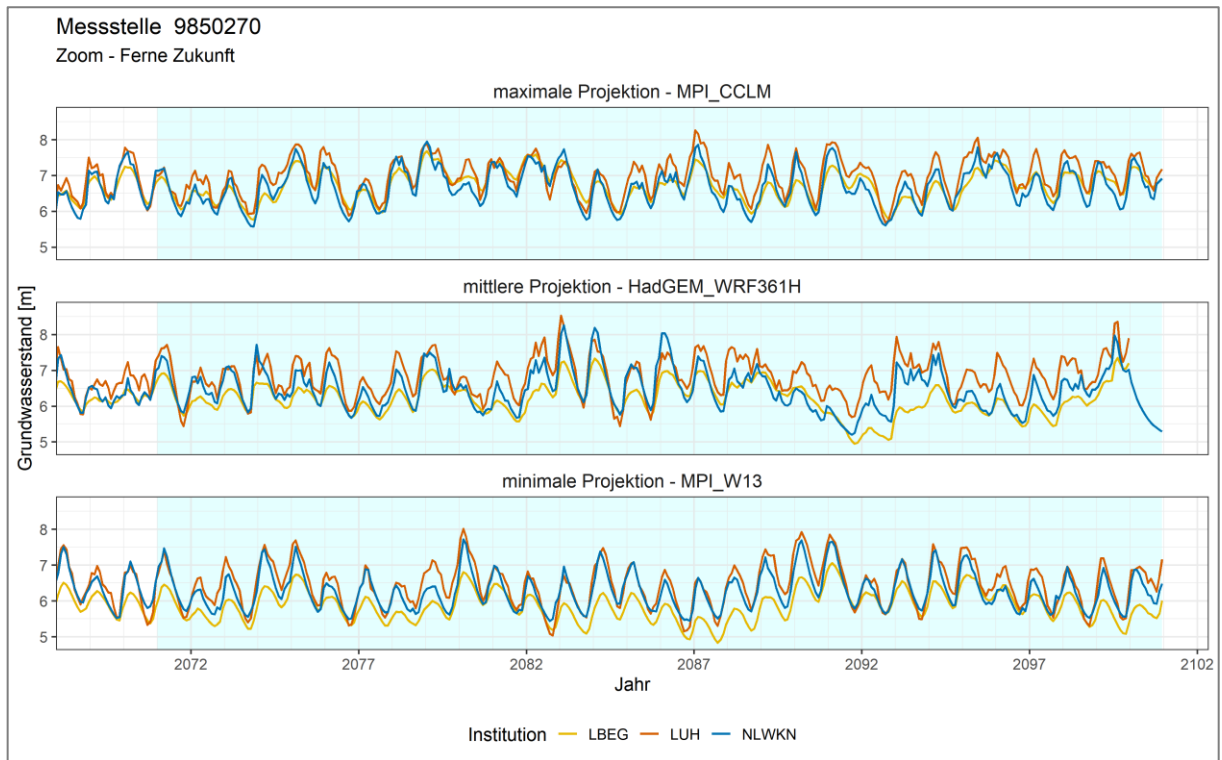


Abbildung 9.8: Zoom auf die ferne Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9850270 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der fernen Zukunft (2071-2100).

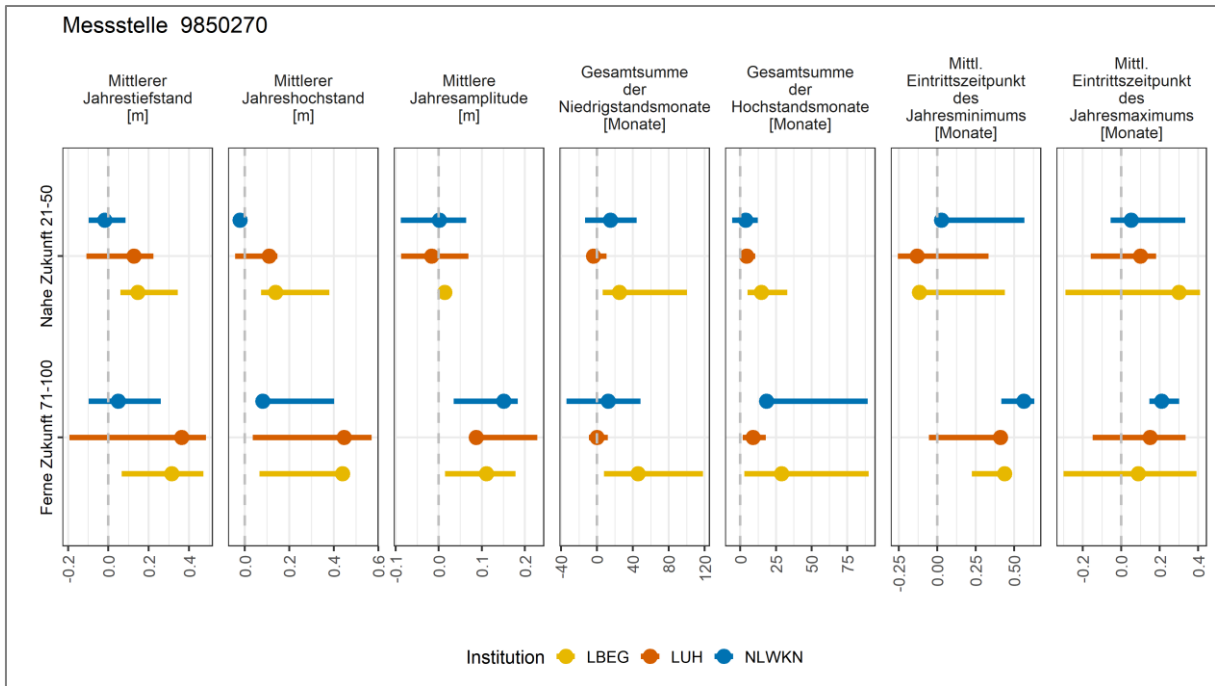


Abbildung 9.9: Bandbreite der Änderungen der Kernindikatoren (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9850270 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf.

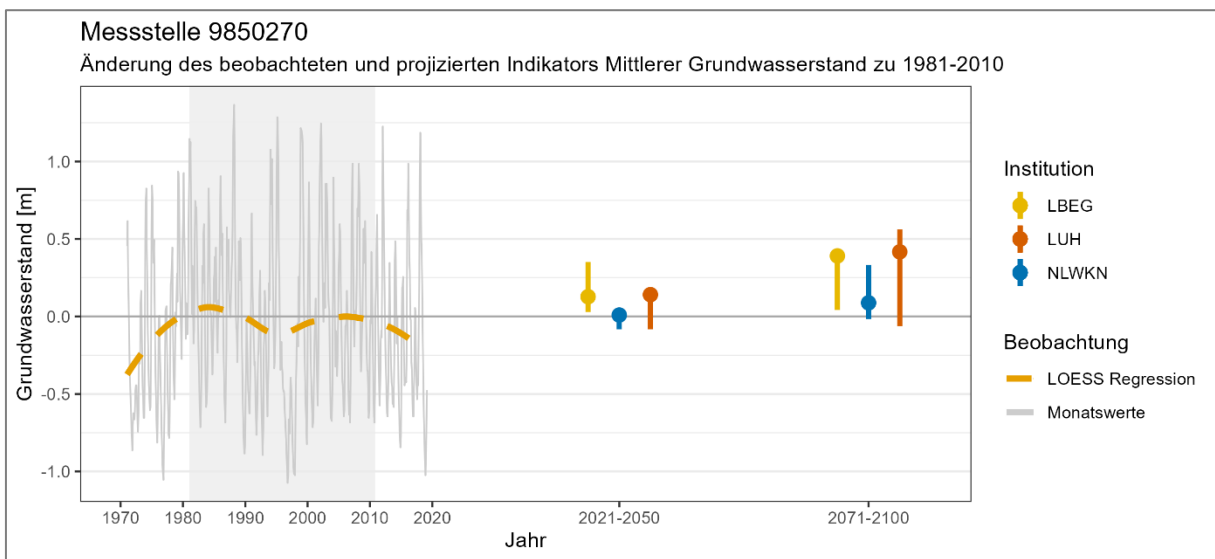


Abbildung 9.10: Änderung des beobachteten (links) und projizierten (rechts) Indikators Mittlerer Grundwasserstand sowie die Bandbreite des Indikators Mittlerer Grundwasserstand je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe (rechts) an der Messstelle 9850270 aus dem Modellgebiet Sandelermöns. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der Referenzzeit (1981-2010).

### 9.3.2 Vörden-Hunteburg

Das Modell Vörden-Hunteburg zeigt für die drei Messstellen „9700133“, „9700234“ und „9700269“ in den Abbildung 9.14, Abbildung 9.19 und Abbildung 9.24 jeweils für die nahe Zukunft keine, eine sehr geringe Abnahme oder ein sehr geringe Zunahme des mittleren Jahrestiefstandes und eine geringe Zunahme der Änderung des mittleren Jahreshochstandes zum Referenzzeitraum für alle Teilprojekte. Alle drei Modelle liefern hier sehr ähnliche Ergebnisse. Daraus resultiert eine geringfügige ( $<0,1$ ) positive Zunahme der mittleren Jahresamplitude. Lediglich die Ergebnisse des Teilprojektes B zeigen für die Messstellen „9700133“ und „9700269“ geringere Änderungen.

Für die ferne Zukunft ergibt sich kein eindeutiges Änderungsverhalten für die drei Messstellen und drei Modelle für den mittleren Jahrestiefstand. Der mittlere Jahreshochstand hingegen zeigt jeweils eine positive Änderung, diese zeigt für Teilprojekt B an zwei Messstellen eine größere Spannbreite als die Änderungen der Teilprojekte A und D.

Die ferne Zukunft ist im Vergleich zur nahen Zukunft im Mittel durch geringfügig höhere Grundwasserstände geprägt (vergleiche Abbildung 9.11, Abbildung 9.12, Abbildung 9.13, Abbildung 9.15, Abbildung 9.16, Abbildung 9.17, Abbildung 9.18, Abbildung 9.20, Abbildung 9.21, Abbildung 9.22, Abbildung 9.23, Abbildung 9.25). In den Abbildung 9.15, Abbildung 9.20 und Abbildung 9.25 zeigt der Vergleich des mittleren Grundwasserstandes ebenfalls dieses Ergebnis. Hier zeigt sich, dass die Ergebnisse der Teilprojekte A und D nahezu keine Bandbreite für den mittleren Grundwasserstand zwischen den drei Modellläufen zeigen, die Ergebnisse von Teilprojekt D hingegen zeigen jeweils eine deutliche Bandbreite.

Für die nahe Zukunft zeigt der Vergleich der Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate (siehe Abbildung 9.14, Abbildung 9.19 und Abbildung 9.24) geringe Änderungen, wobei Teilprojekt B die geringsten Änderungen errechnet, gefolgt von Teilprojekt A und dann D. Für die ferne Zukunft zeichnet sich ein anderes Bild: Teilprojekt B zeigt weiterhin nahezu keine Änderung; Teilprojekt A zeigt eine Erhöhung und größere Bandbreite, bei Teilprojekt D fällt diese Entwicklung noch deutlicher aus.

Auch für die Gesamtsumme der Hochstandsmonate (siehe Abbildung 9.14, Abbildung 9.19 und Abbildung 9.24), zeigt sich zwischen den Modellen der Teilprojekte ein ähnliches Verhalten wie für die Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate. Für die ferne Zukunft ändert sich das Bild und Teilprojekt A weist mit Abstand die größten Änderungen auf. Teilprojekt B hingegen zeigt nahezu keine oder geringfügig geringere Änderungen mit einer geringen Bandbreite. Teilprojekt D zeigt positive Änderungen und eine Zunahme der Bandbreite.

Der mittlere Eintrittszeitpunkt des Jahresminimums ((siehe Abbildung 9.14, Abbildung 9.19 und Abbildung 9.24) zeigt im Vergleich für die nahe Zukunft eine Verspätung für Teilprojekt A und B (mit Ausnahme von Messstelle „9700269“). Teilprojekt D zeigt hier entweder eine sehr geringe Verspätung oder sogar ein früheres Eintreten im Jahr. Für die ferne Zukunft zeigen alle drei Modelle eine Verspätung, dafür zeigt sich jedoch je Teilprojekt und Messstelle kein einheitliches Muster. Der mittlere Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums ((siehe Abbildung 9.14, Abbildung 9.19 und Abbildung 9.24) zeigt für die nahe Zukunft lediglich an Messstelle „9700234“ ein früheres Eintreten bei Teilprojekt A und ein späteres für Teilprojekt B ansonsten, liegen die Ergebnisse nahe des Referenzzeitraums allerdings mit teils großen Bandbreiten. Für die ferne Zukunft zeigen alle drei Teilprojekte eine Verspätung des mittleren Eintrittszeitpunktes des Jahresmaximums mit teilweiser großer Bandbreite.

Die Verschiebung der Niederschläge in das Winterhalbjahr und die Zunahme der Niederschläge zeigen bei diesen Niedersungsmessstellen nur geringe Änderungen für die nahe Zukunft. Der Tiefstand der Grundwasserstände wird sich in der fernen Zukunft zeitlich stärker nach hinten verlagert als in der nahen Zukunft. Ebenso erhält es sich für den mittleren Eintrittszeitpunkt des Jahresmaximums. Generell verspätet sich der Eintrittszeitpunkt bei allen drei Teilprojekten. Auch diese Ergebnisse lassen sich mit der Veränderung und Verlagerung der Niederschläge erklären. Die Auffüllung sowie die Entleerung des Grundwasserreservoirs werden auch in der Niederung zeitlich verlagert.

Im Vergleich performen die Modelle bei den Änderungen der mittleren Jahresamplitude und des mittleren Eintrittszeitpunktes des Jahresminimums in der fernen Zukunft einheitlich (siehe Abbildung 9.14, Abbildung 9.19 und Abbildung 9.24). Für diese Größen liegt die gesamte Bandbreite aller Modelle im positiven Bereich. Für andere Größen sowohl in der nahem als auch in der fernen Zukunft performen die Modelle nicht einheitlich, hierbei zeigen die Ergebnisse des Teilprojektes B in einigen Fällen ein grundsätzlich anderes Verhalten vor Allem bezogen auf die Bandbreite, aber auch bezogen auf die Ausprägung der Ergebnisse



### 9.3.2.1 Messstelle 9700133

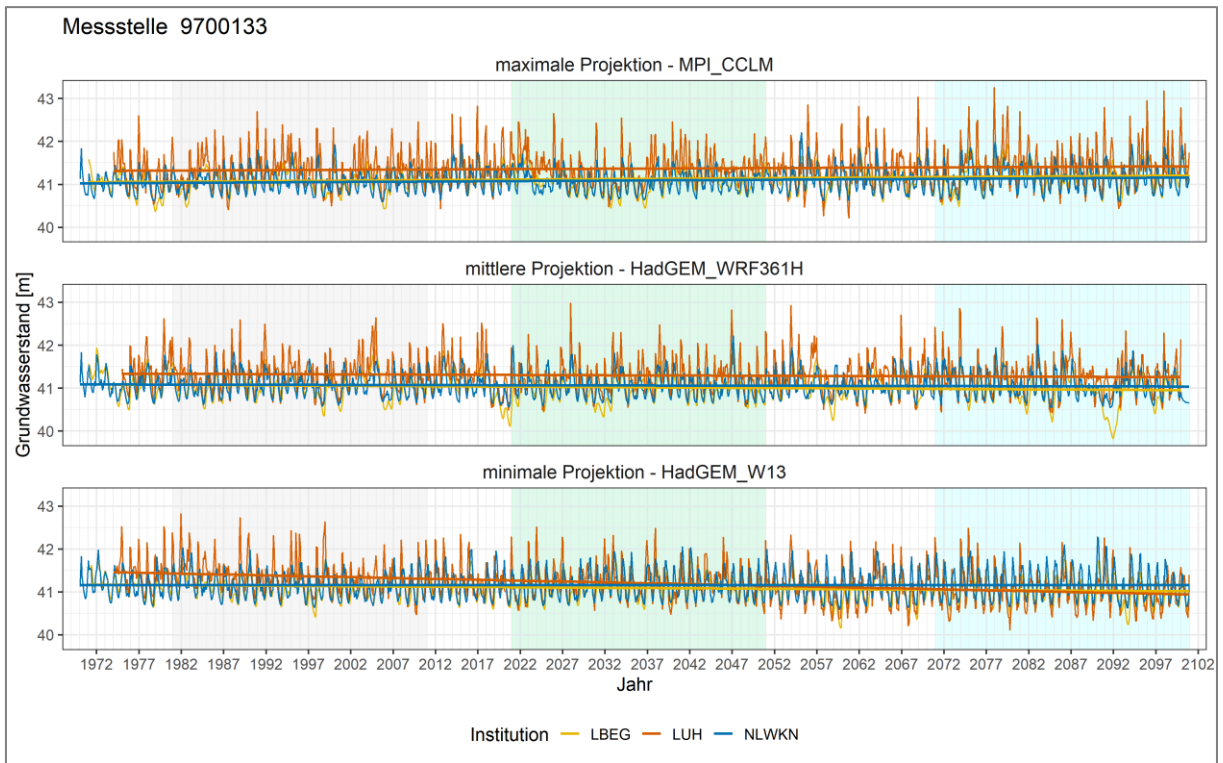


Abbildung 9.11: Modellierter Verlauf der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700133 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Ganglinien decken den gesamten Simulationszeitraum ab, farblich hinterlegt sind die Zeiträume der Referenzzeit (1981-2010) sowie der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 und 2071-2100).

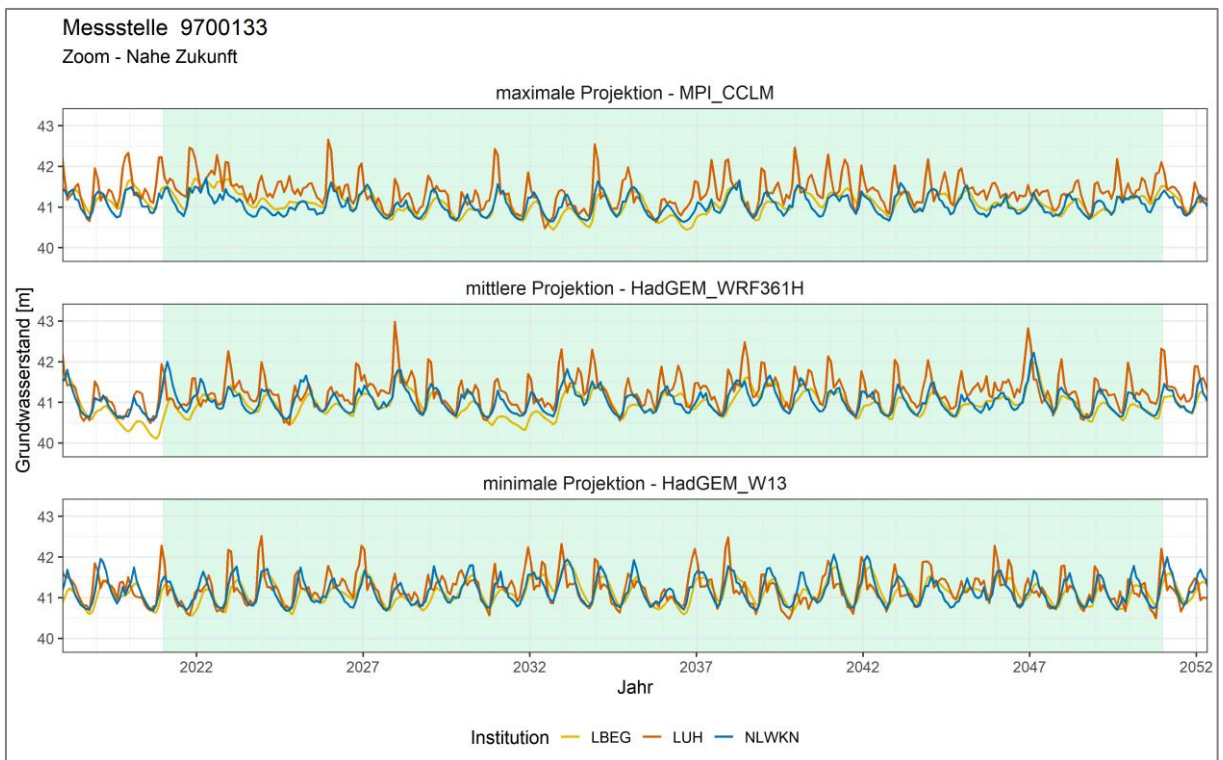


Abbildung 9.12: Zoom auf die nahe Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700133 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der nahe Zukunft (2021-2050).

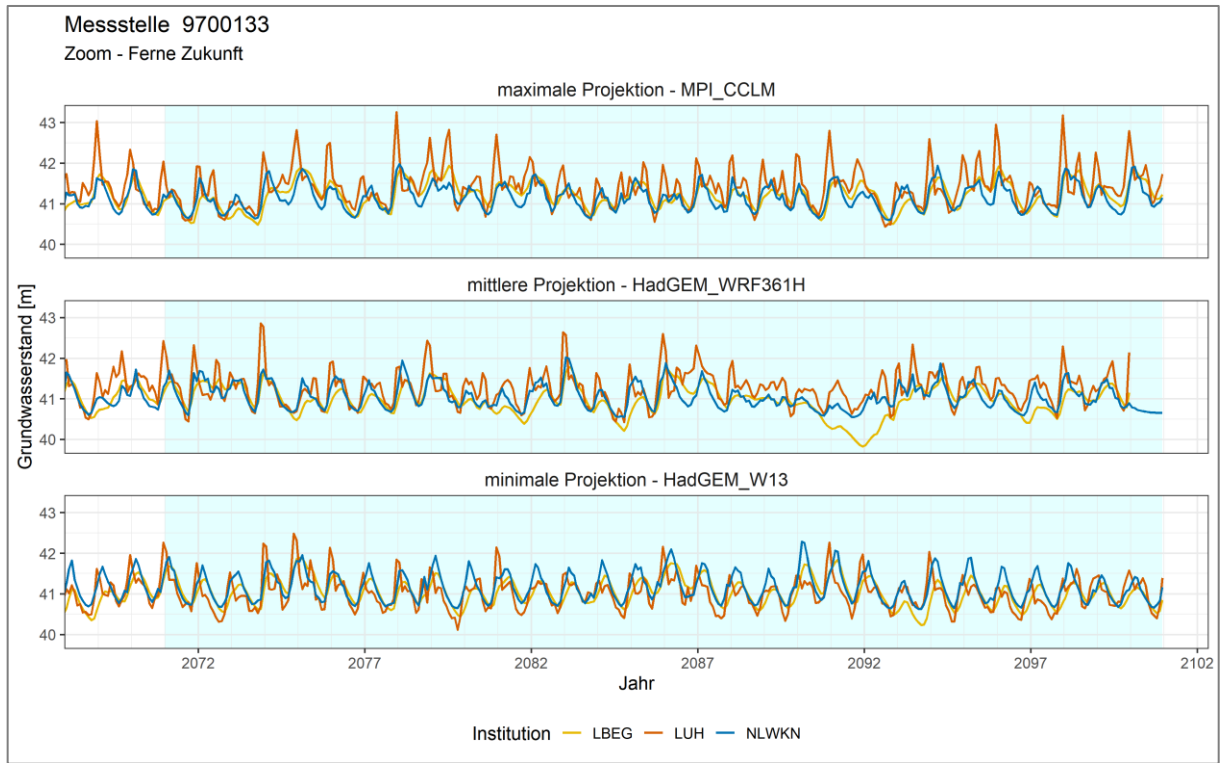


Abbildung 9.13: Zoom auf die ferne Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700133 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der fernen Zukunft (2071-2100).

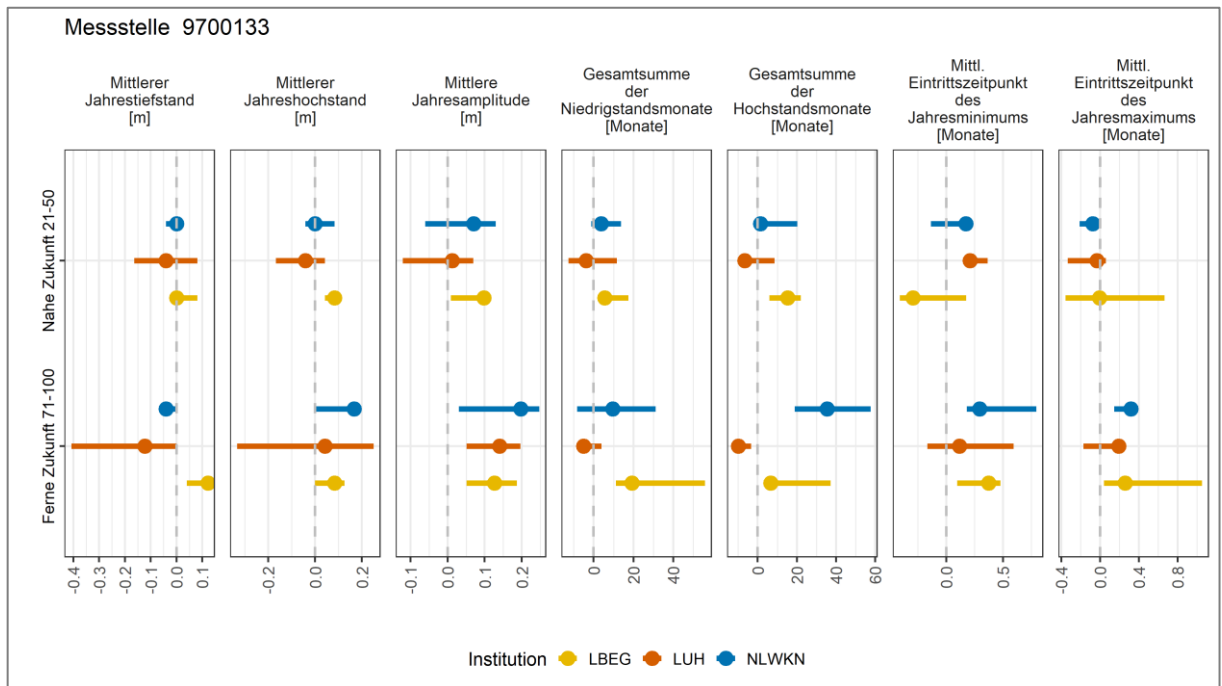


Abbildung 9.14: Bandbreite der Änderungen der Kernindikatoren (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700133 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf.

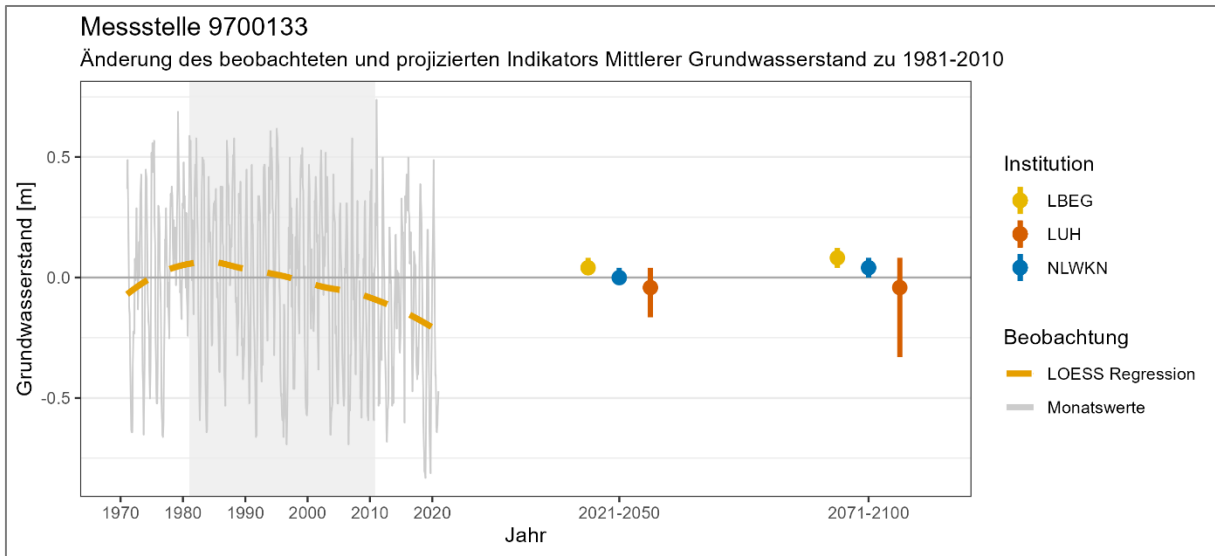


Abbildung 9.15: Änderung des beobachteten (links) und projizierten (rechts) Indikators Mittlerer Grundwasserstand sowie die Bandbreite des Indikators Mittlerer Grundwasserstand je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe (rechts) an der Messstelle 9700133 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der Referenzzeit (1981-2010).

### 9.3.2.2 Messstelle 9700234

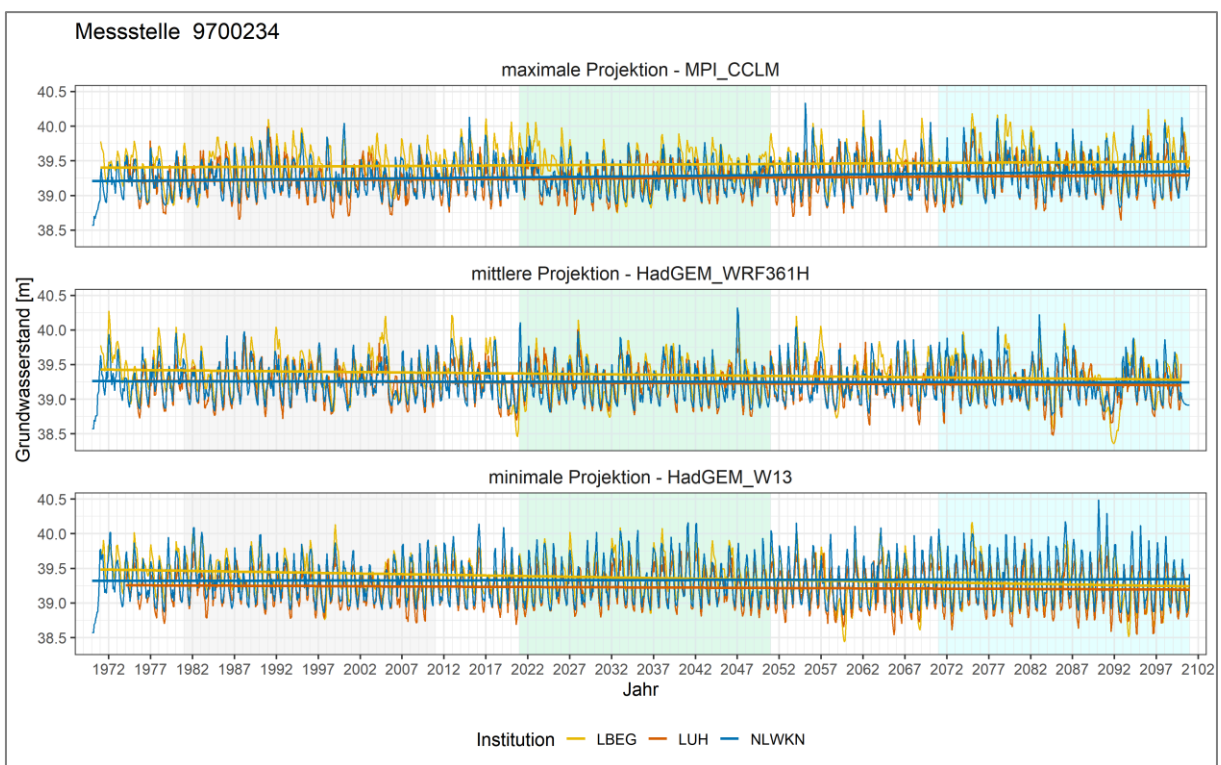


Abbildung 9.16: Modellierter Verlauf der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700234 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Ganglinien decken den gesamten Simulationszeitraum ab, farblich hinterlegt sind die Zeiträume der Referenzzeit (1981-2010) sowie der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 und 2071-2100).

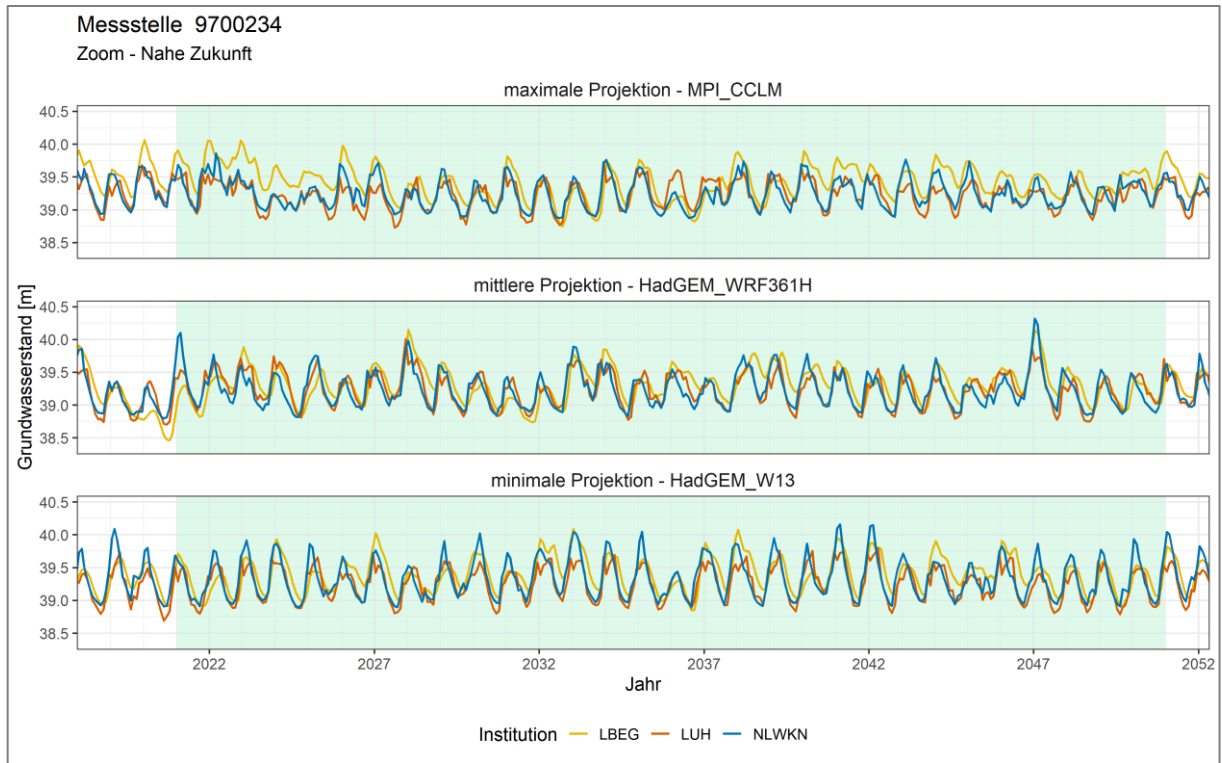


Abbildung 9.17: Zoom auf die nahe Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700234 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der nahen Zukunft (2021-2050).

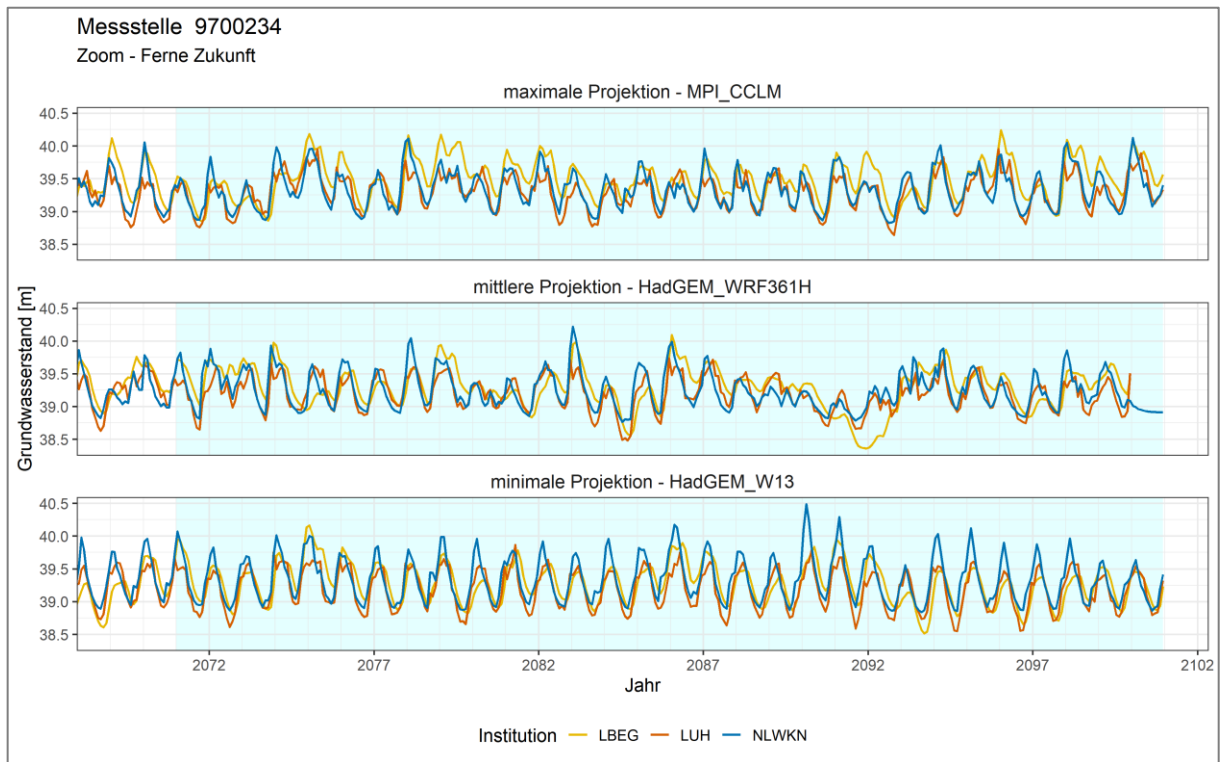


Abbildung 9.18: Zoom auf die ferne Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700234 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der ferneren Zukunft (2071-2100).

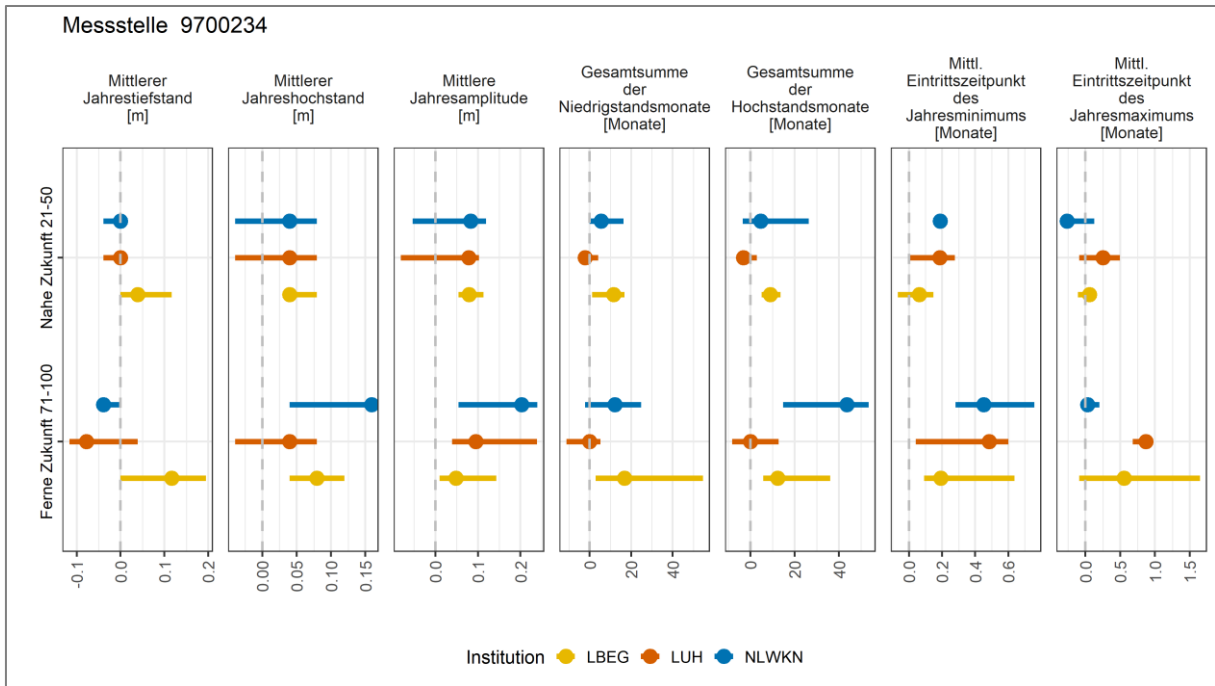


Abbildung 9.19: Bandbreite der Änderungen der Kernindikatoren (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2020) je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700234 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf.

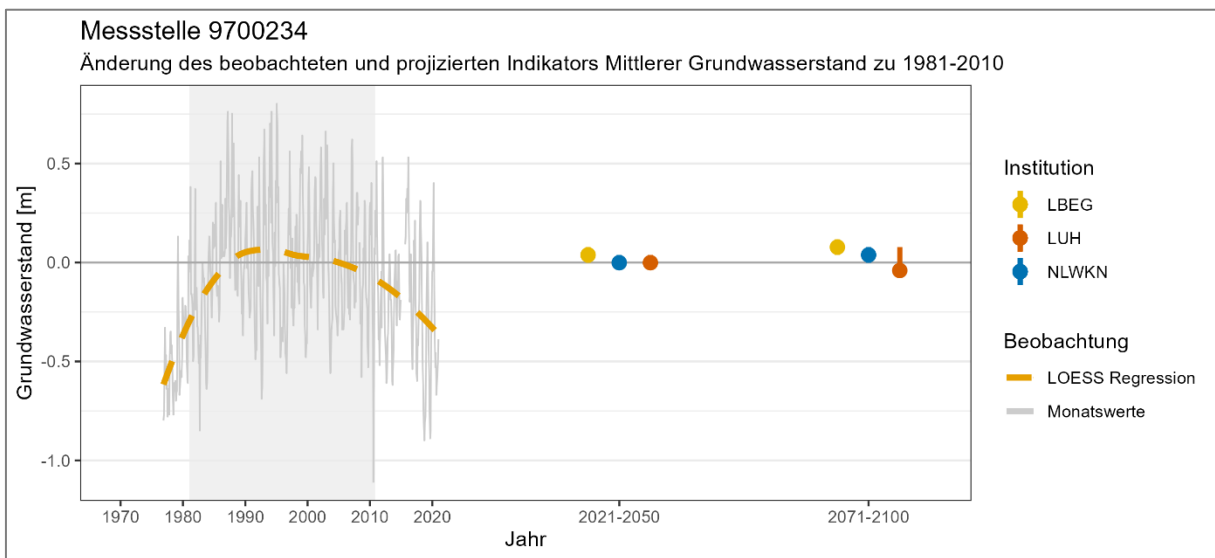


Abbildung 9.20: Änderung des beobachteten (links) und projizierten (rechts) Indikators Mittlerer Grundwasserstand sowie die Bandbreite des Indikators Mittlerer Grundwasserstand je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe (rechts) an der Messstelle 9700234 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der Referenzzeit (1981-2010).

9.3.2.3 Messstelle 9700269

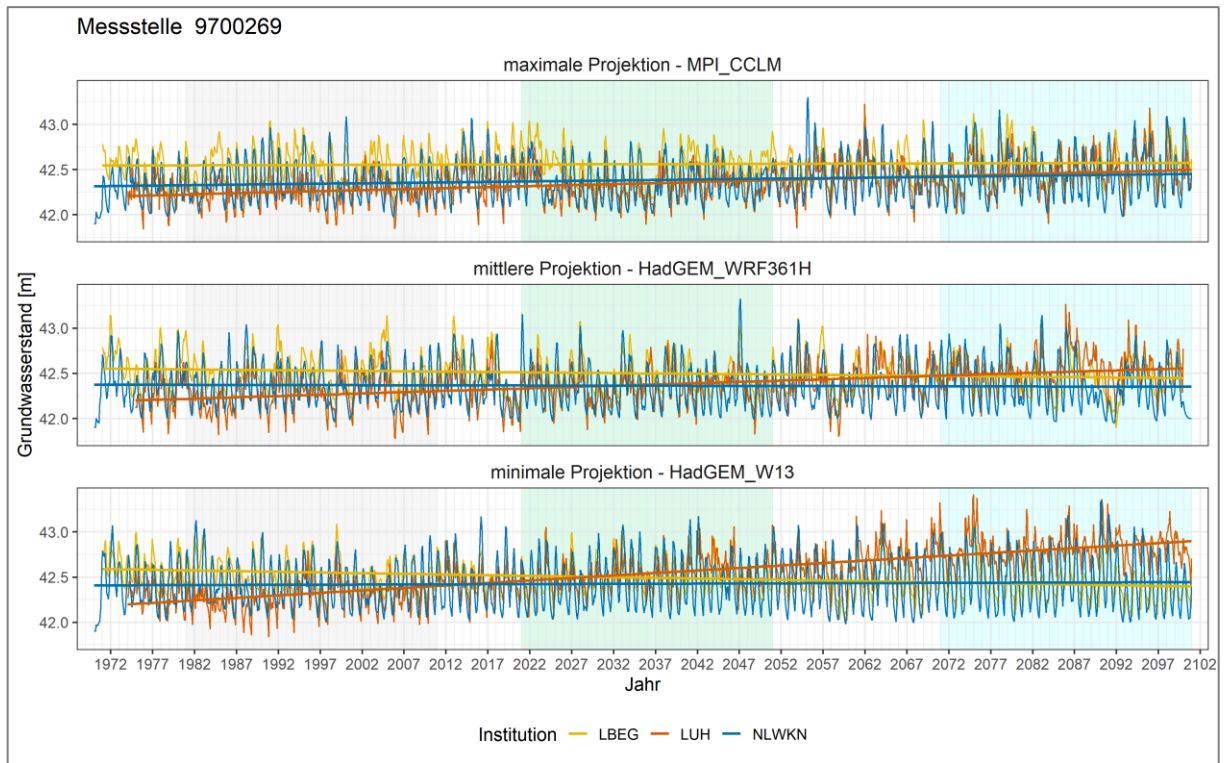


Abbildung 9.21: Modellierter Verlauf der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700269 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Ganglinien decken den gesamten Simulationszeitraum ab, farblich hinterlegt sind die Zeiträume der Referenzzeit (1981-2010) sowie der nahen und fernen Zukunft (2021-2050 und 2071-2100).

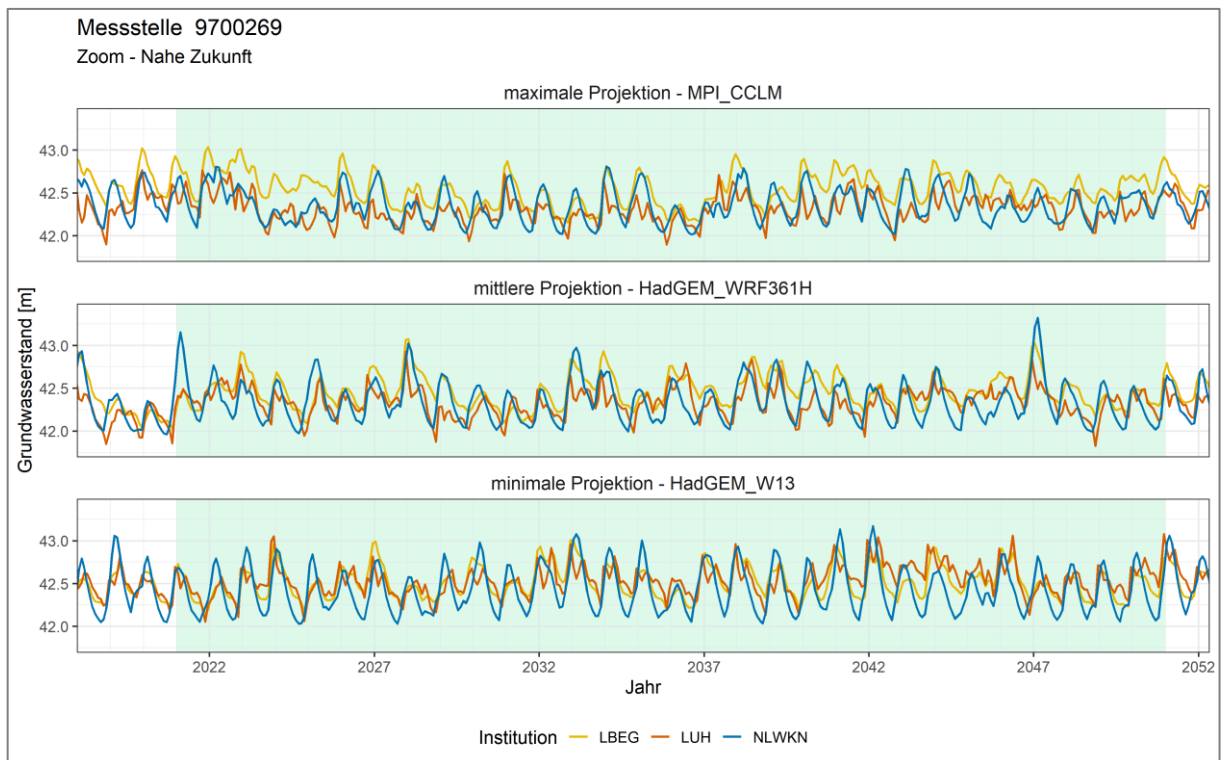


Abbildung 9.22: Zoom auf die nahe Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700269 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der nahen Zukunft (2021-2050).

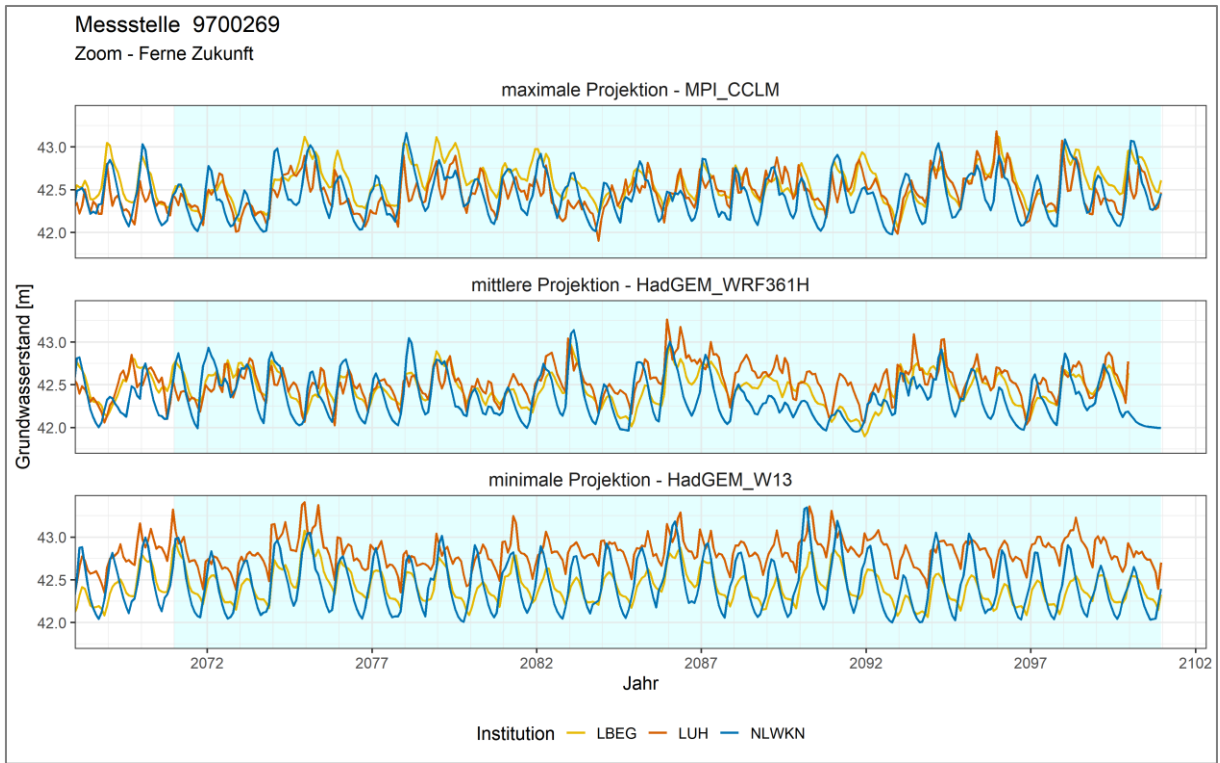


Abbildung 9.23: Zoom auf die ferne Zukunft des modellierten Verlaufs der Grundwasserstände je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700269 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der ferneren Zukunft (2071-2100).

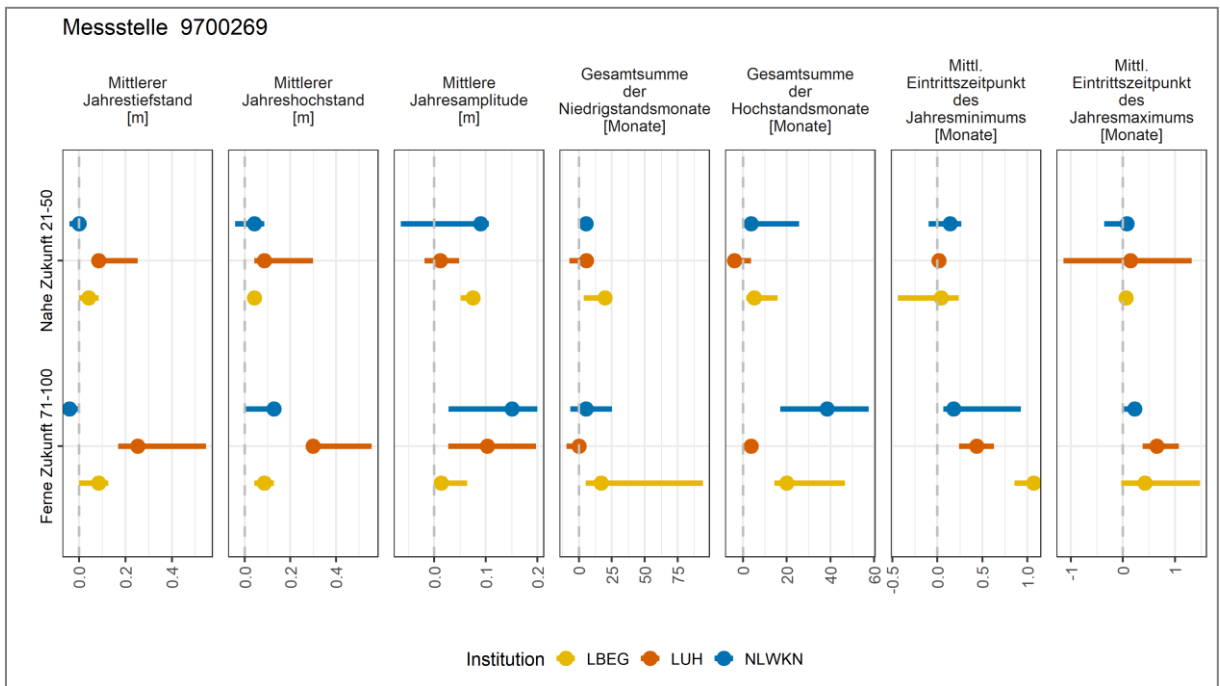


Abbildung 9.24: Bandbreite der Änderungen der Kernindikatoren (gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010) je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe an der Messstelle 9700269 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf.

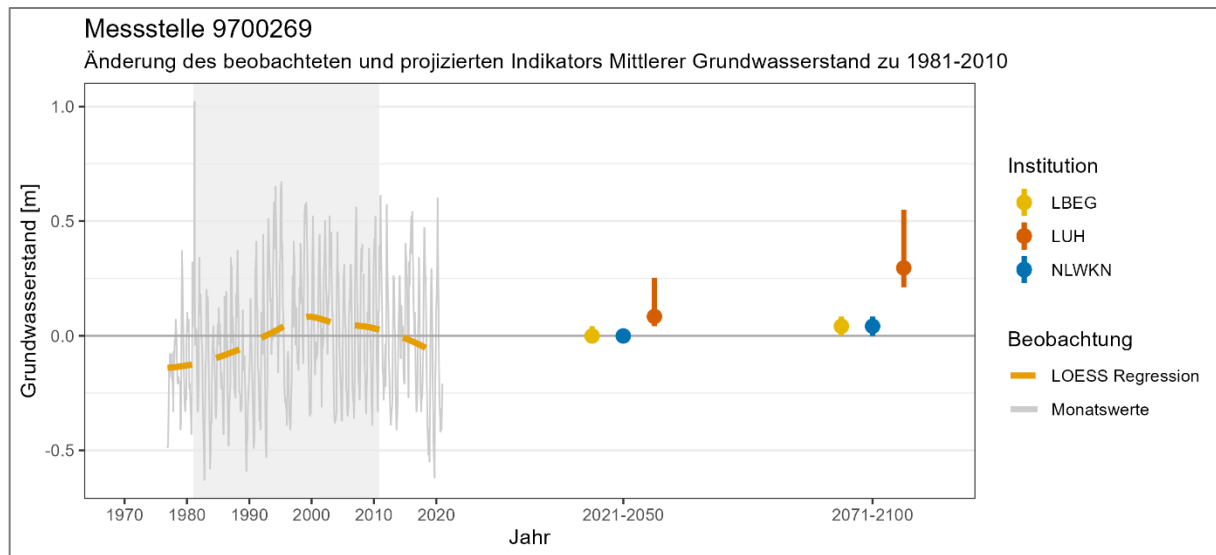


Abbildung 9.25: Änderung des beobachteten (links) und projizierten (rechts) Indikators Mittlerer Grundwasserstand sowie die Bandbreite des Indikators Mittlerer Grundwasserstand je Teilprojekt bzw. Institution für die drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe (rechts) an der Messstelle 9700269 aus dem Modellgebiet Vörden-Hunteburg. Die Punkte zeigen stets den mittleren Klimaprojektionslauf. Farblich hinterlegt ist der Zeitraum der Referenzzeit (1981-2010).

## 9.4 Zusammenfassung

Die Strömungsmodelle Sandelermöns und Vörden-Hunteburg liegen jeweils in unterschiedlichen Regionen. Somit beziehen sich die Aussagen des Detailvergleiches auf zwei verschiedenen Regionen. Der Detailvergleich zeigt für die Messstellen im Gebiet des Strömungsmodell Vörden-Hunteburg, dass das grundsätzliche Verhalten von Grundwasserständen in einer Niederungssituation von allen Modellen abgebildet wird. In der Niederung sind die Schwankungen der beobachteten Grundwasserstände generell nicht so stark ausgeprägt wie in der Geest (vergleiche Abbildung 9.5, Abbildung 9.10, Abbildung 9.15, Abbildung 9.20 und Abbildung 9.25). Dieses grundsätzliche Verhalten zeigt sich ebenfalls in den geringeren projizierten Änderungen für die Niederungsmessstellen für den mittleren Grundwasserstand (siehe Abbildung 9.5, Abbildung 9.10, Abbildung 9.15, Abbildung 9.20 und Abbildung 9.25), den mittleren Jahrestiefstand (siehe Abbildung 9.14, Abbildung 9.19 und Abbildung 9.24) und den mittleren Jahreshochstand (siehe Abbildung 9.14, Abbildung 9.19 und Abbildung 9.24) als in den Geestmessstellen (siehe Abbildung 9.4 und Abbildung 9.9).

Für die Messstellen im Gebiet Sandelermöns zeigt der Detailvergleich, dass das grundsätzliche Verhalten von Grundwasserständen in einer Geestlage von allen Modellen grundsätzlich abgebildet wird, jedoch performen nicht alle Modelle einheitlich bei den einzelnen Größen.

Die größeren Schwankungsbreiten der beobachteten Grundwasserstände auf der Geest (vergleiche Abbildung 9.5, Abbildung 9.10, Abbildung 9.15, Abbildung 9.20 und Abbildung 9.25) werden vom Strömungsmodell detaillierter abgebildet als von den Modellen in Teilprojekt A und B.



# 10 Schlussfolgerung

## 10.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse über die zukünftigen Entwicklungen der Grundwasserstände in Niedersachsen

### Ergebnisse der Teilprojekte A, B und C

Die folgenden Aussagen für Niedersachsen basieren auf drei verschiedenen Ansätzen zur Modellierung der Grundwasserstände (Teilprojekt A, B und C), welche wiederum angetrieben wurden von einem Ensemble aus acht regionalen Klimamodellen (Kern-Ensemble) für ein Klimaszenario ohne nennenswerten Klimaschutz in der Zukunft (Szenario RCP8.5) (vgl. Kapitel 5.2). Jedes Modell bildet die Prozesse und Wechselwirkungen des Systems (Klima bzw. Grundwasser) mittels unterschiedlicher Methoden vereinfacht ab, wodurch unterschiedliche Ergebnisse entstehen können. Aus dieser Unsicherheit resultieren mehr oder weniger Bandbreiten, die die möglichen zukünftigen Veränderungen gegenüber einem Referenzzeitraum (1981-2010) darstellen. Diese grundsätzlichen Tendenzen werden im Folgenden allgemein beschrieben, wobei es regional bzw. lokal auch zu davon abweichenden Verhältnissen kommen kann. Die Ergebnisse zu den Inseln, Marschen, Börden und z.T. auch dem Bergland basieren nur auf wenigen Messstellen und sind daher möglicherweise nicht repräsentativ für die jeweiligen Regionen.

Insgesamt weisen die Ergebnisse auf eine zukünftig im Mittel kaum veränderte Situation der mittleren Jahresminima hin. Während diese im Bereich der Inseln, der Marschen und der Niederungen zumeist Änderungen bis zu +/- 0,1 m erfahren, sind im Bereich der Geest, der Börden und des Berglandes etwas deutlichere Absenkungen in der Größenordnung von bis zu -0,35 m möglich, im Minimum bis etwa -0,5 m. Dabei fallen die Veränderungen in der nahen Zukunft (2021-2050) stets kleiner aus als in der fernen Zukunft (2071-2100).

Auch die mittleren Jahresmaxima verändern sich in der Zukunft nur relativ wenig. Während die Änderungsbeträge fast aller Regionen in der nahen Zukunft den Wert von im Mittel 0,1 m kaum überschreiten, kann es in der fernen Zukunft etwas größere Veränderungen geben, die sich zumeist als Anstieg bemerkbar machen. Vor allem im Bereich von Geest, Börden und Bergland liegen die Änderungsbeträge in der Größenordnung von bis zu 0,3 m.

Die mittleren Jahresamplituden der Grundwasserstände nehmen tendenziell in der Zukunft leicht zu. Die Zunahmen sind in der nahen Zukunft noch relativ schwach ausgeprägt und bewegen sich in der Größenordnung von bis zu 0,1 m (Inseln, Marschen, Niederungen) bzw. bis zu 0,25 m (Geest, Börden, Bergland). In der fernen Zukunft können die Werte

regional auch etwas oberhalb von 0,25 m liegen (Geest, Börden, Bergland).

Die Gesamtzahl der Monate mit Grundwassertiefständen (und damit letztlich auch die mögliche Dauer von Grundwasserdürrephasen) kann sich regional unterschiedlich entwickeln, wobei insgesamt eine tendenzielle Zunahme erkennbar ist. Die Änderungsbeträge sind in der nahen Zukunft etwas schwächer ausgeprägt und liegen im Mittel zumeist unterhalb von 30 Monaten (innerhalb des 30jährigen Betrachtungszeitraumes). In der fernen Zukunft verschiebt sich diese Tendenz mehr Richtung Zunahmen (außer bei Marschen und Inseln) und liegt in einer Spannweite von -20 bis +60 Monaten.

Die Gesamtzahl der Monate mit Grundwasserhochständen zeigt ebenfalls regional uneinheitliche Entwicklungen mit insgesamt leicht zunehmender Tendenz. Während die mittleren Änderungsbeträge in der nahen Zukunft häufig im Bereich bis zu 30 Monaten liegen, nehmen sie in der fernen Zukunft (mit Ausnahme der Börden) etwas stärker zu und liegen bei -10 bis +60 Monaten, auf den Inseln sogar noch höher.

Der Eintrittszeitpunkt der Jahresminima bzw. Jahresmaxima der Grundwasserstände verschiebt sich zukünftig im Mittel geringfügig um einige Tage im Jahr nach hinten. Dabei gibt es kaum regionale Unterschiede. Die Jahresminima können in der nahen Zukunft je nach Region um bis zu etwa eine Woche früher bzw. rund zwei Wochen später eintreten, während die Tendenzen in der fernen Zukunft uneinheitlich erscheinen (+/- zwei Wochen). Lediglich auf den Inseln und in den Marschen kommt es zu einer Verspätung von bis zu drei Wochen. Die Jahresmaxima zeigen ähnliche Veränderungen, wobei sich hier der Eintrittszeitpunkt in der fernen Zukunft in allen Regionen um bis zu drei Wochen verspäten kann, nicht nur auf den Inseln und in den Marschen.

Zusammengefasst kann im Hinblick auf die grundsätzlichen Tendenzen der Grundwasserstände in Niedersachsen festgehalten werden, dass die Projektionen der zukünftigen Entwicklungen eine Akzentuierung des Jahresganges anzeigen. Die Amplitude der Grundwasserstände nimmt tendenziell zu, sowohl durch höhere Maxima als auch niedrigere Minima. Die Veränderung der mittleren Lage des Grundwasserstands ist dabei nicht so eindeutig, erscheint insgesamt aber stabil bis leicht sinkend. Die Dauer von Hoch- und Tiefstandsphasen nimmt zu und es kommt zu einer leichten Verspätung der Eintrittszeitpunkte von Jahresmaxima bzw. -minima. Die größten Veränderungen sind im Bereich der Geest zu erwarten, wobei diese in alle Regionen in der nahen Zukunft geringer ausfallen als in der fernen Zukunft. Zu beachten ist außerdem, dass die Projektionen im Mittel zwar nur relativ geringe Veränderungen aufzeigen, im Bereich der möglichen Bandbreiten diese aber regional deutlicher in Erscheinung treten können.

Die im Modellvergleich der Teilprojekte A, B und C ermittelten Änderungssignale und Bandbreiten können in den Regionen Inseln, Marschen, Börden aufgrund der geringen Messstellenanzahl auch durch die Effekte an einzelnen Messstellen geprägt sein und sind möglicherweise nicht gebietsrepräsentativ. Die Regionen Geest, Niederungen und Bergland werden im Vergleich der Teilprojekte zudem überwiegend von Messstellen im zentralen, nördlichen und westlichen Niedersachsen geprägt, während das östliche und südliche Niedersachsen unterrepräsentiert sind.

Ergänzend wurde nach Projektabschluss ein methodisch identischer Vergleich der Teilprojekte A und B durchgeführt. Dieser Vergleich konnte sich auf insgesamt 708 Messstellen stützen. Dabei konnten vor allem die Region der Marschen sowie das östliche Niedersachsen durch mehr Messstellen repräsentiert werden. Die Ergebnisse stützen im Wesentlichen die zuvor aufgeführten Erkenntnisse. Schwerpunkte der oben beschriebenen Veränderungen zeigen sich hier im Bereich von Geest, Börden und Bergland. Lediglich im Bereich der Inseln erscheinen ergänzende Einzelbetrachtungen aufgrund der nach wie vor geringen Anzahl von Messstellen erforderlich.

### **Ergebnisse des Teilprojekts D im Vergleich**

Im Teilprojekt D wurden mittels zweier Strömungsmodelle für Teilgebiete in den Regionen Geest und Niederung die Grundwasserstände an ausgewählten Messstellen modelliert, um die Ergebnisse denen der anderen Teilprojekte in einem Detailvergleich gegenüberzustellen. In Kapitel 9 sind die entsprechenden Ergebnisse der Teilprojekte A, B und D im direkten Vergleich dargestellt. Die Modellperformance ist im Hinblick auf die Abbildung der gebietsspezifischen Gangliniencharakteristik nicht einheitlich zwischen den drei Modellen, jedoch wird das grundsätzliche Verhalten der Grundwasserstände durch alle Teilprojekte hinreichend genau abgebildet. Unterschiede gibt es dagegen insbesondere bei den größeren Schwankungsbreiten der beobachteten Grundwasserstände auf der Geest, welche vom Strömungsmodell detaillierter abgebildet werden als von den Modellen in Teilprojekt A und B.

Vergleicht man die Ergebnisse für die einzelnen Modellgebiete mit den Regionsergebnissen der einzelnen Teilprojekte, zeigt sich, dass die Ergebnisse des Teilprojektes D für den mittleren Jahrestiefstand und den mittleren Jahreshochstand sowohl für die nahe als auch die ferne Zukunft ansteigende Werte zeigen und diese in der fernen Zukunft jeweils größer sind.

Diese Entwicklungen zeigen sich in den Ergebnissen für die gesamten Regionen von Geest und Niederung auf Basis der anderen Modelle (TP A und B) nur zum Teil, teilweise sind sie auch gegenläufig.

Für die Gesamtsumme der Niedrigstandsmonate und der Gesamtsumme der Hochstandsmonate errechnet das Teilprojekt D für die betrachteten Teilgebiete ebenfalls in beiden Fällen Zunahmen. Die Tendenzen der beiden Regionen auf Basis der Teilprojekte A und B liefern ähnliche Ergebnisse jedoch nur für die ferne Zukunft.

## **10.2 Diskussion**

### **Vergleich Teilprojekt A, B und C**

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse der Teilprojekte trotz unterschiedlicher methodischer Ansätze auf Basis weitestgehend gleicher Eingangsdaten (Klimamodell-Ensemble des Szenarios RCP8.5) im Mittel relativ ähnliche Entwicklungstendenzen im Hinblick auf die betrachteten Kern-Indikatoren in Niedersachsen. Vor allem in Bezug auf die Richtung der zukünftig zu erwartenden Veränderungen (Zunahmen oder Abnahmen der Kern-Indikatoren) decken sich die verschiedenen Modell-Ansätze in vielen Regionen. Wenn die ermittelten Veränderungen nur sehr klein sind (d.h. sich nahe Null bewegen), kann die Tendenz der Verschiebung der Kern-Indikatoren bei den verschiedenen Modell-Ansätzen in unterschiedlicher Richtung (d.h. leichte Zu- oder Abnahme) ausfallen. Deutlichere Unterschiede sind eher in den Änderungsbeträgen und vor allem in den Bandbreiten (minimal bis maximal mögliche Änderung) zu erkennen. Aufgrund dieser relativ einheitlichen Richtungstendenzen können die Aussagen bzgl. der möglichen zukünftigen Veränderungen der betrachteten Indikatoren insgesamt als robust angesehen werden. D.h. es kann davon ausgegangen werden, dass sich die zukünftigen Veränderungen innerhalb der dargestellten Bandbreiten vollziehen.

Gleichwohl zeigen die Ergebnisse bei einigen Indikatoren und/oder Regionen auffällige Bandbreiten, die z.T. auch auf gegensätzliche Entwicklungstendenzen hindeuten. Neben den eigentlichen methodischen Unterschieden zwischen den Ansätzen der Teilprojekte können hierfür verschiedene Ursachen in Betracht kommen.

### **Mögliche Ursachen auftretender Unterschiede**

Ein Grund für die Unterschiede der Ergebnisse ist, dass für jedes Teilprojekt und dessen Modell-Ansatz verschiedene Variablen aus den verfügbaren klimatischen Eingangsdaten ausgewählt wurden. Dabei variiert je nach Teilprojekt sowohl die Auswahl als auch die Anzahl der Variablen.

Weitere mögliche Ursachen sind die Verwendung von unterschiedlichen Kalibrierungsverfahren und verschiedenen Kalibrierungszeiträumen. Die Zeiträume umfassen dabei unterschiedliche Systemzustände. Diese sollten im Idealfall an den betrachteten Messpunkten ausschließlich klimatisch bedingt sein, da nur solche Einflüsse explizit von den methodischen Ansätzen der Teilprojekte in der Vergangenheit berücksichtigt werden.

Allerdings können anthropogene Effekte (z.B. veränderte Landnutzung, wasserbauliche Maßnahmen, Entnahmen) auf die ausgewählten Grundwassermessstellen in der Vergangenheit nicht vollkommen ausgeschlossen werden, da die Vorprüfung der Messstellen auf anthropogene Einflüsse nur Zeiträume ab Ende der 80er Jahre umfasste. Erfolgt eine Kalibrierung der Modelle innerhalb anthropogen beeinflusster Zeiträume, werden entsprechende Veränderung der Systemzustände durch die gewählten Modellansätze als irrtümlich klimagetrieben interpretiert. Dies kann bei zukünftig veränderten Klimabedingungen zu einer Fehleinschätzung der Reaktion des Systems auf die klimatischen Effekte führen.

Ein anderer Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse der Teilprojekte ist die unterschiedliche Berücksichtigung der entsprechenden Wasserhaushaltsgrößen innerhalb der Modelle. So werden zur besseren Näherung der Grundwasserdynamiken zum Beispiel entweder die klimatische Wasserbilanz oder die berechnete Grundwasserneubildung nach der Methode mGrowa18 (ERTL, 2019) verwendet.

Ein weiterer Diskussionspunkt sind die (natürlichen) Drainageeffekte. In Teilprojekt D des LBEG konnten die als Vorflut dienenden Gewässer in das Modell eingebunden werden, während in den anderen Teilprojekten A, B und C diese Effekte nur indirekt über den resultierenden Grundwasserstand berücksichtigt werden.

### **Mögliche Ursachen auftretender Unterschiede zwischen Teilprojekt D und A bis C**

Teilprojekt D stellt im Vergleich eine Besonderheit da, weil einzig in diesem Teilprojekt ein instationäres numerisches Grundwasserströmungsmodell verwendet wird. Dieses bildet die Auswirkungen der Grundwasserneubildungsdynamik deterministisch ab, kann aber im Gegensatz zu den Teilprojekten A, B und C die Grundwasserdynamik auch im Gesamtzusammenhang des betrachteten Grundwassersystems abbilden. Diese Herangehensweise stellt vermutlich den Ansatz mit der größten Realitätsnähe dar. Diese kann jedoch nicht flächendeckend zur Anwendung gebracht werden, weil die erforderlichen umfangreichen Datengrundlagen in entsprechender Qualität bisher nur für kleine Gebiete und wenige Messstellen vorliegen.

Aus den Klimaprojektionen ergibt sich, dass im Mittel in der Zukunft von gleichen bis steigenden Niederschlagsmengen mit einer zunehmenden Verschiebung von Niederschlägen in das Winterhalbjahr auszugehen ist. Gleichzeitig kommt es zu einem Anstieg der Temperaturen und somit der Verdunstung, vor allem im Sommerhalbjahr. Daraus können regional und saisonal unterschiedliche Entwicklungen der Grundwasserneubildungsraten resultieren. Dies entspricht auch den bisherigen Auswertungen zur Grundwasserneubildung des LBEG (LBEG NIBIS 2022). Für

die Grundwasserhydraulik bedeutet dies, dass sich die Hauptphase der Grundwasserneubildung auf die Wintermonate konzentriert und die Jahresmaxima tendenziell später eintreten könnten. Gleichzeitig dürfte die sommerliche Absinkphase aufgrund zunehmender sommerlicher Trockenheit länger andauern und auch zu einer Verspätung der Sommerminima führen. Diese Entwicklungen werden von allen Modellen in ähnlicher Weise dargestellt, auch wenn die zeitlichen Verschiebungen im Mittel gering bleiben und vermutlich aus Abweichungen in Einzeljahren resultieren. Eine verlängerte sommerliche Absinkphase dürfte auch den Absinkbetrag erhöhen, sofern nicht ein Vorfluterniveau erreicht wird. Im Ergebnis ist eine Zunahme der Jahresamplituden zu erwarten.

Die unterschiedlichen Modellansätze der einzelnen Teilprojekte liefern hierzu erste Antworten. Im Sommer kommt es tendenziell zu einer Absenkung der (Jahres)Tiefstände (bei quasi allen Modellen), im Winter zu einer Anhebung der (Jahres)Hochstände (weniger eindeutig zwischen den Modellen).

Einheitlich zeigen die Modelle einen Anstieg der Jahresamplitude. Dies ist ein Hinweis auf eine Akzentuierung der saisonalen Unterschiede. Ursachen können zum einen längere Absinkphase bzw. stärkere Absenkung infolge geringerer Sommerniederschläge und höherer Temperaturen bzw. Verdunstung sein und zum anderen eine höhere Neubildung im Winter, was zu einem markanten Wiederanstieg führt.

Die langfristige Grundwasserstandsentwicklung dürfte wesentlich davon abhängen, ob die Zunahme der Winterniederschläge bzw. der Grundwasserneubildung die sommerliche Absenkung im Mittel zukünftig kompensiert, diese übertrifft oder unterschreitet und somit in der Folge im Mittel zu gleichbleibenden, höheren oder tieferen Grundwasserstands niveaus führt. Zu dieser Frage zeigen die Modelle keine einheitlichen Tendenzen.

### **Empfehlungen zum Umgang mit Erkenntnissen auf Basis von Bandbreiten**

Die oben beschriebenen Bandbreiten der möglichen Veränderungen der Grundwasserstände in der Zukunft erschweren die Entwicklung von Anpassungsstrategien in der Praxis. Wie bereits in Kapitel 6 angedeutet, müssen alle Ergebnisse aus einem Ensemble von Klimaprojektionen zunächst als gleich wahrscheinlich angesehen werden. Dies gilt ebenso prinzipiell für die nachfolgenden Impaktmodellierungen. Je nach Ausprägung der Veränderungen können jedoch unterschiedliche Maßnahmen notwendig sein. An dieser Stelle sollen daher Hinweise aus der fachlichen Perspektive die Entscheidungsfindung in der Praxis unterstützen.

Ein ergänzender wichtiger Aspekt für die Einschätzung zukünftiger Entwicklungen der Grundwasserstände sind

neben den Klimaprojektionen auch die beobachteten Trends der Vergangenheit bis heute. Hier können sich die Auswirkungen eines sich wandelnden Klimas bereits bemerkbar machen (vor allem in langen Beobachtungsreihen) und Effekte offenbaren, die in den Modellen ggf. nicht oder nur unzureichend abgebildet werden. So belegen die Ergebnisse aus den Sonderberichten des NLWKN zur Grundwasserstandsentwicklung (NLWKN, 2022) eine relativ eindeutige Absenkung der mittleren Grundwasserstände im landesweiten Mittel bereits seit Beginn der 2000er Jahre. Verstärkt wurde dieses Phänomen zuletzt durch die Trockenjahre 2018-2020. Gerade diese deutlichen klimatischen Effekte der letzten Jahre werden durch die Klimaprojektionen kaum noch abgebildet. Zwar sind Ergebnisse von Klimaprojektionen grundsätzlich nur über lange Zeiträume (mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte) zu interpretieren und nicht über die nächsten Jahre. Die aktuellen Entwicklungen der beobachteten Grundwasserstände sollten aber in die Bandbreiten der projizierten Werte eingeordnet werden, um im Sinne des Vorsorgeprinzips eine verlässliche Basis für die Einschätzung der zukünftigen Entwicklungen (zumindest innerhalb der nächsten Jahrzehnte) zu ermöglichen. Nach derzeitiger Einschätzung besteht die Möglichkeit, dass sich eine Entwicklung am unteren Rand der Bandbreite mit weiteren Grundwasserabsenkungen in der Zukunft abzeichnet.

Ein weiterer Aspekt für die Wahl von Maßnahmenoptionen auf Basis von Bandbreiten möglicher Entwicklungen sind die absehbaren Konsequenzen bei einer Über- oder Unterschreitung der als Maßstab für die Entscheidungsfindung gewählten zukünftigen Verhältnisse. Hierbei sollte das Prinzip der Vorsorge beachtet werden. In diesem Kontext muss auch das (Rest-)Risiko für betroffene Handlungsfelder wie beispielsweise die Trinkwasserversorgung, die landwirtschaftliche Bewässerung und vor allem die ökologischen Anforderungen abgewogen werden. Idealerweise finden sich Maßnahmen und Strategien, welche auch dann sinnvoll erscheinen, wenn die Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserverhältnisse zukünftig nicht so ausfallen, wie sie sich anhand der aus der Bandbreite abgeleiteten Werte hätten ergeben sollen (Prinzip der No-regret Maßnahmen, z.B. nach Hallegatte, 2009).

# 11 Ausblick

Nach aktuellen Studien (LBEG, 2022 und Forschungszentrum Jülich (FZ) (siehe Herrmann, 2020)) verändert sich die zukünftige Grundwasserneubildung landesweit betrachtet in der Summe nur geringfügig. Aktuell bestehende regionale und saisonale Unterschiede können sich jedoch zukünftig verschärfen. Maßgebend für diese Entwicklung ist eine Zunahme der Niederschläge im Winterhalbjahr. Die Vegetation ist in diesem Zeitraum weniger aktiv und daher können größere Teile des Sickerwassers die Grundwasserkörper erreichen. Das Resultat ist eine erhöhte Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr. Im Sommerhalbjahr nehmen die Niederschläge dagegen ab bzw. fallen häufiger als Starkregen, gleichzeitig steigen die Temperaturen und somit auch die Verdunstung. Das Resultat ist eine Abnahme der Grundwasserneubildung im Sommerhalbjahr bzw. eine verstärkte Grundwasserzehrung in einigen Regionen.

Die Auswirkungen der veränderten Neubildungsdynamik zeigen sich auch in den Ergebnissen von KLBIW7. Allerdings haben sich im Zuge der Analysen z.T. weitergehende Fragestellungen ergeben, die auf Basis der bisherigen Betrachtungen nicht hinreichend beantwortet werden konnten, die aber für eine gesamtheitliche Einschätzung der zukünftigen Situation der Grundwasserstände in Niedersachsen von den Projektbeteiligten als wesentlich angesehen werden.

Die Grundwasserneubildung wird nicht nur von den langfristigen klimatischen Entwicklungstendenzen bestimmt, sondern auch von Witterungsdynamiken. Ein Aspekt ist der zukünftige Einfluss von Extremniederschlägen in den Sommermonaten auf die Bodenfeuchte und Grundwasserneubildung. Zum einen werden zukünftig bei etwa gleicher Niederschlagsgesamtmenge in Niedersachsen größere Einzelereignisintensitäten erwartet, in deren Folge weniger Versickerung in den Boden stattfindet. Zum anderen stellt sich die Frage, ob die Grundwasserneubildung bisher für die Zukunft überschätzt wird, da die in KLBIW 7 verwendeten Klimamodelle bisher keine konvektionserlaubenden Modelle darstellen und Extremereignisse tendenziell unterschätzen. Beide Faktoren wirken sich negativ auf die Grundwasserneubildung aus und führen stattdessen voraussichtlich zu einem verstärkten Oberflächenabfluss.

Ein weiterer Aspekt ist das Auftreten von extremen Trockenjahren. In dieser Projektphase wurde als Indikator lediglich die Gesamtanzahl von Niedrigstandsmonaten ausgewertet, die Häufigkeit einzelner Extremjahre und das Auftreten mehrjähriger Trockenphasen wurden nicht explizit betrachtet. Die Auswirkung von konsekutiven Niedrigstandsmonaten und -jahren ist ein schwer zu ermittelnder Indikator, da von den Klimamodellen des betrachteten Ensembles nur eine Realisation genutzt wurde

und die Auswertungen über einen Zeitraum von jeweils lediglich 30 Jahren reichen. Die Verwendung eines erweiterten Modell-Ensembles (LBEG, 2021 -> AR5-NI v2.1) sowie die Modifikation der Analysemethoden, z.B. in Anlehnung an die Auswertungsmethodik für seltene Extremereignissen im Zuge der Klimawirkungs- und Risikoanalyse des Bundes (UBA, 2021), könnte hierzu weitere Erkenntnisse liefern. In gleicher Weise wären auch die Auswirkungen des Auftretens extremer Feuchttjahre auf die Grundwasserstandsdynamik zu betrachten.

In dieser Arbeit wurden Messstellen betrachtet, die zurzeit noch anthropogen wenig beeinflusst sind. Der Klimawandel wird den Nutzungsdruck auf die Grundwasserressourcen jedoch erhöhen, u.a. durch die zunehmende Feldberegnung und den erhöhten Bedarf in der öffentlichen Trinkwasserversorgung. Gleichzeitig ist auch damit zu rechnen, dass sich im Zuge des Klimawandels die Landnutzungsformen verändern werden (z.B. Waldumbau, Änderung der Sortenwahl bzw. Fruchtfolgen auf Ackerflächen). So geht beispielsweise das Wasserversorgungskonzept des Landes Niedersachsen davon aus, dass Grundwasserentnahmen bis 2050 um 400 Mio. m<sup>3</sup>/a von rund 1,3 Mrd. m<sup>3</sup>/a auf 1,7 Mrd. m<sup>3</sup>/a zunehmen könnten (MU 2022). Die Wirkung anthropogener Einflüsse auf die zukünftigen Grundwasserhältnisse wurde in KLBIW 7 nicht berücksichtigt, sie besitzen aber ebenfalls das Potenzial, Grundwasserstände zu verändern und die rein klimatischen Wirkungen zu überlagern. Die Betrachtung derartiger Veränderungen erfordert die Anwendung geeigneter numerischer Modelle und kann mit den in Teilprojekt A, B und C verwendeten Ansätzen nicht abgebildet werden.

Klimamodelle werden kontinuierlich weiterentwickelt, gleichzeitig nimmt auch das Verständnis um die Prozesse und Wechselwirkungen im Klimasystem stetig zu. Dies erlaubt mit der Zeit eine Verbesserung bestehender Erkenntnisse und im besten Fall immer präzisere Aussagen über zukünftige Klimafolgen. Nach wie vor gibt es Prozesse (z. B. Einfluss von Wolkendecke) im Klimasystem, die sehr komplex und daher trotz erheblicher Berechnungsleistung von Computern schwer abzubilden sind. Daher ist die Weiterentwicklung der Klimamodelle ein wichtiger Bestandteil für die Vergegenwärtigung der Zusammensetzung der Atmosphäre. Die schnellere Rechenkapazität ermöglicht eine feinere Auflösung der Modelle und damit eine genauere Darstellung der Erdoberfläche, eine detailliertere Darstellung von atmosphärischen Phänomenen sowie eine genauere Approximation der nicht auflösbaren Prozesse, die bisher parametrisiert werden müssen. Das bedeutet, dass vorliegende Ergebnisse mit jeder neuen Modellgeneration ggf. wieder hinterfragt werden müssen.

Modellunsicherheiten in Klimamodellen, u.a. bedingt durch fehlende Kenntnisse über die komplexen Prozesse im Klimasystem sowie methodisch unterschiedliche Umsetzung

der bekannten Größen und Wechselwirkungen, führen zu Bandbreiten in den Modellergebnissen. Diese setzen sich bei der anschließenden Impaktmodellierung fort bzw. können sogar durch die Nutzung unterschiedlicher klimatischer Eingangsparameter (z.B. Klimatische Wasserbilanz vs. Grundwasserneubildung) und Kalibrierungsstrategien (z.B. Zeiträume für Kalibrierung und Validierung) noch verstärkt werden. Daher sollten diese zwischen den verwendeten Modellen soweit möglich vereinheitlicht werden, um eine Reduzierung der datenseitig bedingten Unterschiede zu erreichen.

Die beobachtete Witterungs- und Grundwasserstandsentwicklung der letzten Jahre ist nicht mehr Bestandteil der Modellbetrachtung in KLBIW7. Die beobachteten Grundwasserstandsniveaus bewegen sich insbesondere in den Geestregionen, Börden und Bergregionen bereits seit 2010 auf einem mittleren bis unterdurchschnittlichen Niveau. Die Trockenjahre 2018 und 2019 haben zu einer markanten Absenkung der Grundwasserstände geführt. Seitdem bewegen sich die Grundwasserstände in vielen Regionen Niedersachsens auf einem extrem niedrigen Niveau. Geringfügige zwischenzeitliche Erholungen 2020/2021 wurden 2022 durch ein erneutes Dürrejahr wieder aufgehoben.

Diese Entwicklungen sind unter anderem in den Sonderberichten des NLWKN (NLWKN, 2019b, 2020, 2021b, 2022) dokumentiert. In den Berichten zeigen sich die größte Variabilität und die höchsten Veränderungen für die Geestbereiche, Börden und Gebirgsregionen, während die Niederungen und Marschen eher stabile Grundwasserstandsverhältnisse mit geringer Variabilität aufweisen. Diese beobachteten regionalen Unterschiede lassen sich auch in den Aussagen des KLBIW7-Projektes nachvollziehen. Sie begründen sich im Wesentlichen auf geologische Einflussfaktoren, wie Unterschiede im Grundwasserflurabstand, Beschaffenheit der Deckschichten, die Dichte des Gewässernetzes und die Lage der Messstellen in Bezug auf Vorfluter und regionale Grundwasserscheiden.

Festzuhalten ist, dass die Witterungssituation der letzten Jahre inklusive extremer Trockenjahre die Grundwasserstandssituation im Vergleich zum KLBIW7-Referenzzeitraum 1981-2010 deutlich verändert hat. In Unkenntnis der sich real entwickelnden Witterungssituation der kommenden Jahre ist unklar, inwiefern sich die Grundwasserstände wieder auf frühere mittlere Niveaus regenerieren oder längerfristig bis dauerhaft auf einem niedrigen Niveau abgesenkt bleiben.

Diese Entwicklung der letzten Jahre hat zunächst zwar keine direkten Konsequenzen für die in KLBIW7 ermittelten Änderungssignale als solche, da diese ein Klimaänderungssignal widerspiegeln und nicht die Wirkung von Extremereignissen in einem realen Witterungskontext. Im Sinne einer Projektion der Änderungssignale auf absolute Grundwasserstände (m NHN oder als Flurabstand) ist das

jedoch von großer Bedeutung, da der Referenzzeitraum 1981-2010 ohne Berücksichtigung der jüngsten Veränderungen möglicherweise nicht mehr als sinnvolle Bezugsbasis für die Betrachtung zukünftiger Grundwasserstände angesehen werden kann. Daher sollten die projizierten Entwicklungen der Grundwasserstände auch in den Kontext der beobachteten Trends gesetzt werden.

Ebenso ist unklar, inwiefern die aktuelle Trockenphase (mit mehrfach auftretenden extremen Trockenjahren) seit 2010 noch als temporäre Trockenphase mit Extremereignissen gelten kann oder als Ausdruck dauerhafter Veränderungen des Wasserhaushalts einzuschätzen ist und die Witterungsdynamik ggf. einem – in diesem Falle ungünstigen - definierten Entwicklungspfad in der Spanne der betrachteten Klimaprojektionen folgt.

Auch erschwert das Problem der regionalen (Unter-)Repräsentanz in Teilen die Interpretierbarkeit der vorliegenden Ergebnisse. Ein denkbarer Ansatz in diesem Zusammenhang wäre unter Einbeziehung auch von kürzeren Messreihen (< 20 Jahre) repräsentative Messstellen für einzelne (Unter-)Regionen zu definieren und die zukünftige Entwicklung an diesen repräsentativen Messstellen abzuschätzen. Dabei wäre jedoch auch eine Berücksichtigung unterschiedlicher Ganglinientypen erforderlich.

Aus diesen Überlegungen heraus ergibt sich die Notwendigkeit das Thema der zukünftigen Grundwasserverhältnisse in Niedersachsen weiter zu verfolgen und die bisher vorliegenden Projektaussagen mit ggf. auch verbesserten Datengrundlagen und Modellansätzen regelmäßig zu aktualisieren und zu vertiefen.

# 12 Glossar

## Berechnungsgrundlagen

### Bias

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{n} [m]$$

mit  $Y_i^{obs}$ : Beobachteter Wert an i-ter Stelle,  $Y_i^{sim}$ : Simulierter Wert an i-ter Stelle, n: Anzahl der Beobachtungen

### BIC

Bayessches Informations-Kriterium: Vergleich von Modellen unter Abwiegen von Anpassungsgüte und Parameteranzahl.

$$BIC = 2 * \ln(\hat{L}) + k * \ln(m)$$

mit:  $\hat{L}$ : Maximum-Likelihood-Funktion,  $k$  : Parameteranzahl,  $m$ : Beobachtungsanzahl

### NBIAS

$$NBIAS = 100 * \frac{Bias}{s(Y_i^{obs})} [\%]$$

mit:  $Y_i^{obs}$ : Beobachteter Wert an i-ter Stelle,  $s(x)$ : Standardabweichung

### RMSE

Der RMSE (Root Mean Squared Error) ist ein absolutes Fehlermaß. Er nimmt einen Wertebereich von 0 bis  $\infty$  in der Dimension der betrachteten Variablen an.

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

mit P=berechneter Wert, O=beobachteter Wert, i = Index der Beobachtung, n= Anzahl der Beobachtungen.

### NRMSE

$$NRMSE = 100 * \frac{RMSE}{s(Y_i^{obs})} [\%]$$

mit:  $Y_i^{obs}$  - Beobachteter Wert an i-ter Stelle,  $s(x)$  – Standardabweichung

### NSE Nash Sutcliffe Efficiency

Die "Nash-Sutcliffe-Efficiency" (NSE) ist ein Index zur Beschreibung der Anpassungsgüte von Modellen. Die NSE ist dimensionslos und nimmt einen Wertebereich von  $-\infty$  bis +1 an.

Die Berechnung erfolgt nach:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

mit P=berechneter Wert, O=beobachteter Wert, i = Index der Beobachtung, n= Anzahl der Beobachtungen.

## OLS

Ordinary Least Squares: Bestimmung der Parameter in einem linearen Regressionsmodell durch Minimierung der Summe der quadrierten Abweichung zwischen der Schätzung und der Beobachtung.

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - x_{1,i}\beta_1 + \dots + x_{k,i}\beta_k)^2 \rightarrow \text{Min}$$

mit:  $y$  : abhängige Variable,  $x$  : unabhängigen Variablen,  $\beta$  : Regressionsparameter

## IOAR Refined Index of Agreement (Willmott et al. 2012)

Der "refined Index of Agreement" (IOAR) ist ein Index zur Beschreibung der Anpassungsgüte von Modellen. Er stellt eine Weiterentwicklung von Willmott's Index of Agreement aus den 80er Jahren dar. Der IOAR ist dimensionslos und nimmt einen Wertebereich von -1 bis +1 an.

Die Berechnung erfolgt nach:

$$IOAR = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{c \cdot \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|} & \text{when } \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \leq c \cdot \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \\ \frac{c \cdot \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|} - 1 & \text{when } \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| > c \cdot \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \end{cases}$$

mit P=berechneter Wert, O=beobachteter Wert, i = Index der Beobachtung, n= Anzahl der Beobachtungen.

## RangeRatio (Wunsch et al. 2019)

Das Feature RangeRatio betrachtet das Verhältnis der mittleren jährlichen Spannweite ( $\overline{rng_y}$ ) zur maximalen Spannweite ( $rng_{max}$ ) der Grundwasserstandszeitreihe. Primärer Zweck dieses Features ist die Unterscheidung von Ganglinien mit und ohne überlagerndes langperiodisches Signal.

Die Berechnung erfolgt nach:

$$RangeRatio = \frac{\overline{rng_y}}{rng_{max}}$$

Neben langperiodischen Schwankungen führen auch deutliche Ausreißer oder abschnittsweise Absenkungen/Erhöhungen zu niedrigen RangeRatio-Werten.

## VIF

Varianzinflationsfaktor: Maß dafür, wie viel der Varianz eines Regressors durch die anderen Regressoren erklärt werden kann.

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2}$$

mit:  $R^2$  : Bestimmtheitsmaß



## Verwendete Begriffe

**ATKIS:** Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (Landnutzungsdaten)

**Bias-Adjustierung:** Empirisch-statistisches Verfahren zur Minimierung des systematischen Fehlers (d.h. Abweichungen) von Klimamolldaten in Bezug auf einen Referenzzeitraum und einen Referenzdatensatz (z.B. Beobachtungsdaten). Die Bias-Adjustierung kann für einen (univariat) oder mehrere Ausgabeparameter gleichzeitig (multivariat) eines Klimamodells durchgeführt werden.

**Ferne Zukunft (auch Z3):** Zeitraum 2071-2100

**GW:** Grundwasser

**GWMST:** Grundwassermessstelle

**GWNB:** Grundwasserneubildung

**Nahe Zukunft (auch Z2):** Zeitraum 2021-2050

**RCP8.5:** Ein Szenario der Entwicklung von anthropogen bedingten Treibhausgasemissionen bzw. -konzentrationen, unter der Annahme, dass global gesehen so gut wie keine Maßnahmen zum Klimaschutz umgesetzt werden und die Energiegewinnung zukünftig weiterhin im Wesentlichen auf fossilen Energieträgern beruht (Szenario ohne Klimaschutz).

**Referenzperiode (auch Z1):** Zeitraum 1981-2010

# 13 Literatur

- Abadi, M., Agarwal, A., Barham, P., Brevdo, E., Chen, Z., Citro, C., Corrado, G., & Davis, A. (2015). TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4724125>
- Akademien der Wissenschaften Schweiz (2016): Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. Swiss Academies Reports 11 (5) S.39
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1995): Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, FAO, Rom.
- Ardia D, Boudt K, Carl P, Mullen KM, Peterson BG (2011). "Differential Evolution with DEoptim: An Application to Non-Convex Portfolio Optimization." R Journal, 3(1), 27–34. doi:10.32614/RJ-2011-005.
- Bidwell V.J., Morgan, M.J. (2002): The eigenvalue approach to groundwater modelling for resource evaluation at regional scale. ModelCARE 2002
- Bidwell, V. J (2005): Realistic Forecasting of Groundwater Level, Based on the Eigenstructure of Aquifer Dynamics. Mathematics and Computers in Simulation 69 (1-2), 12-20
- Bucher, B. (1999): Die Analyse von Grundwasserganglinien mit dem Wiener-Mehrkanal-Filter. Grundwasser 4 (3), 113-118
- DHI (2020): FEFLOW® Finite-Element Simulation System for Subsurface Flow and Transport Processes. V.7.4 – 64 bit Version (November 2020). © 1979-2020, DHI.
- DHI (2021): FEFLOW® Finite-Element Simulation System for Subsurface Flow and Transport Processes. V.7.5 – 64 bit Version (November 2021). © 1979-2021, DHI.
- DHI-WASY (2014): FEFLOW® Finite-Element Simulation System for Subsurface Flow and Transport Processes. V.6.2 – 64 bit Version. © 1979-2014, DHI-WASY GmbH.
- DVGW – DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES E. V. (2016): Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten, Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW W 107 (A); Bonn.
- DWD - Deutscher Wetterdienst (2018): Klimareport Niedersachsen; Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 52 Seiten.
- DWD - Deutscher Wetterdienst: Potentielle Evapotranspiration: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100652&lv3=100772>, Zugriff: 12.05.2023, Braunschweig
- ELBRACHT, J., MEYER, R. & REUTTER, E. (2016): Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen – GeoBerichte 3: 3. Aufl., 118 S., 42 Abb.; Hannover (LBEG), [DOI 10.48476/geober\_3\_2016].
- Ernst, P. und Loeper, E.G. (1976): Temperaturentwicklung und Vegetationsbeginn auf dem Grünland. D. Wirtschaftseigene Futter 22, 5 – 11.
- ERTL, G., BUG, J., ELBRACHT, J., ENGEL, N. & HERRMANN, F. (2019): Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen. Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18. – GeoBerichte 36: 54 S., 20 Abb., 9 Tab.; Hannover (LBEG), [DOI 10.48476/geober\_36\_2019].
- Ertl, G.; Bug, J.; Elbracht, J.; Engel, N.; Herrmann, F. (2019): Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen. Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.
- Grossmann, J., Skowronek, F. (2005): Quantifizierung anthropogener Veränderungen der Grundwasserstände mit dem Wiener-Mehrkanal-Filter. Grundwasser 10 (3), 157-166
- Haberland, U., van der Heijden, S., Verworn, A., Dietrich, J. (2010): Regionalisierung der Klimabeobachtungsdaten für Niedersachsen als Grundlage für mittel- bis großskalige Modellierungen. Dokumentation KLIBIW/KLIFF-Projekt, Hannover.
- Haberlandt, U.; Van der Heijden, S.; Verworn, A.; Berndt, C.; Dietrich, J.; Wallner, M.; Krause, F. (2015): Regionalisierung von Klimabeobachtungsdaten und WETTREG-Szenarien für Niedersachsen als Grundlage für mittel- bis großskalige Modellierungen. Bericht zu den Forschungsprojekten KliBiW und KLIFF.
- HAJATI, M., HARDERS, D., PETRY, U., ELBRACHT, J. & ENGEL, N. (2022): Dokumentation der niedersächsischen Klimaprojektionsdaten AR5-NI v2.1 – Geofakten 39: 15 S., 1 Abb., 4 Tab.; Hannover (LBEG), [DOI 10.48476/geofakt\_39\_1\_2022].
- Hallegatte, S. (2009): Strategies to adapt to an uncertain climate change. Global Environmental Change, Volume 19, Issue 2, 240-247. DOI 10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003
- HERRMANN, F., WENDLAND, F., WOLTERS, T., BERGMANN, S., EISELE, M. (2020): Projektionen der

- Grundwasserneubildung unter dem Einfluss des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen. Aachen.
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. G. (2013): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 8. Aufl., 438 S.; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Hübener, H., K. Bülow, C. Fooker, B. Früh, P. Hoffmann, S. Höpp, K. Keuler, C. Menz, V. Mohr, K. Radtke, H. Ramthun, A. Spekat, C. Steger, F. Toussaint, K. Warrach-Sagi and M. Woldt (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht. DOI: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe\_Ergebnisbericht
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- IPCC (2013/2014): Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Deutsche Übersetzungen durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim, Bonn/Wien/Bern, 2016.
- Jackson, C.R. (2012): Future Flows and Groundwater Levels: R-Groundwater model summary. British Geological Survey, Environmental Science Centre, Keyworth, Nottingham. NG12 5GG
- Jacob, D., Bülow, K., Kotova, L., Moseley, C., Petersen, J., Rechid, D. Schriftenreihe CSC-Report 6 (Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung), 2014 (Erstveröffentlichung 2012).
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B. et al. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* 14, 563–578 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jordahl, K., Van den Bossche, J., Fleischmann, M., Wasserman, J., McBride, J., & Gerard, J. (2020). *geopandas/geopandas*: v0.8.1. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3946761>
- Krähenmann, S., Walter, A., Klippel, L., 2021: Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Downscaling und multivariate Bias-Adjustierung – Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerkes entwickelte Verfahren zum Postprocessing von Klimamodelldaten.
- Berichte des Deutschen Wetterdienstes 254, 25 S., Offenbach am Main, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.
- Kreienkamp F., A. Spekat, P. Hoffmann (2017): Empirisch-statistisches Downscaling – Eine Übersicht ausgewählter Methoden: *promet*, Heft 99 („Regionale Klimamodellierung I“), 20-28, Deutscher Wetterdienst (Hrsg.)
- LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2010): Hinweise zur Erstellung und Beurteilung von Grundwassermodellen im Altlastenbereich. LANUV-Arbeitsblatt 12; Recklinghausen.
- LATIF, M. (2009): Klimawandel und Klimadynamik.
- LBEG – LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGE (2021): Ermittlung eines minimalen, maximalen und mittleren Klimaprojektionslaufs pro Grundwasserkörper anhand des Änderungssignals der Klimatischen Wasserbilanz für die ferne Zukunft aus dem Klimaprojektionsensemble AR5-NI v2.0. [Unveröffentlichte Auswertung]; Hannover.
- LBEG – LANDESAMT FÜR BERGBAU ENERGIE UND GEOLOGE (2022): Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser - [https://www.lbeg.niedersachsen.de/startseite/boden\\_grundwasser/klimawandel/auswirkungen\\_auf\\_grundwasser/auswirkungen-des-klimawandels-auf-das-grundwasser-177245.html](https://www.lbeg.niedersachsen.de/startseite/boden_grundwasser/klimawandel/auswirkungen_auf_grundwasser/auswirkungen-des-klimawandels-auf-das-grundwasser-177245.html), Zugriff 30.12.2022; Hannover.
- LeCun, Y., Y. Bengio und G. Hinton (2015). Deep Learning. In: *Nature* 521.7553, S. 436–444. issn: 0028-0836, 1476-4687. doi: 10.1038/nature14539.
- LGLN (2019): Auszug aus den Geobasisdaten des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen, © 2019.
- Linke, C. et al. (2017): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Essen, Stand Okt. 2017
- KLIWA (2022): Broschüre: Zu viel, Zu wenig – Extreme meistern, Extreme begegnen – Folgen für Wasserwirtschaft
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology. American meteorological society, Boston, USA.
- MENGLING, H. (1994): Erläuterungen zu Blatt Nr. 3515 Hunteburg, Geologische Karte von Niedersachsen 1:25000. - Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 189 S., 57 Abb., 11 Tab., 7 Kt.; Hannover.
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures

and evaluation criteria. Transactions of the ASABE, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>

Mosbrugger, V., Brasseur, G., Schaller, M., Stribny, B. (2014): Klimawandel und Biodiversität – Folgen für Deutschland. 2. Auflage.

MU – MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2019): Klimawirkungsstudie Niedersachsen. – wissenschaftlicher Hintergrundbericht, 187 S.; Hannover

MU – MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2022): Wasserversorgungskonzept Niedersachsen. 99 S., Hannover

MU – MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE UND KLIMASCHUTZ: Grundwasserkörper [https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht\\_niedersachsen/nutzung\\_schutz\\_und\\_uberwachung/hydrogeologischer\\_uberblick/grundwasserkorper/grundwasserkoerper-105236.html](https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht_niedersachsen/nutzung_schutz_und_uberwachung/hydrogeologischer_uberblick/grundwasserkorper/grundwasserkoerper-105236.html), Zugriff: 12.05.2023, Braunschweig

Mueller B., Hauser, M., Iles, C., Rimi, R.H., Zwiers, F.W., Wan, H. (2015): Lengthening of the growing season in wheat and maize producing regions. Weather and Climate Extremes 9, 47–56.

Mullen K, Ardia D, Gil D, Windover D, Cline J (2011). "DEoptim: An R Package for Global Optimization by Differential Evolution." Journal of Statistical Software, 40(6), 1–26. doi:10.18637/jss.v040.i06.

NASH, J. E. & SUTCLIFFE, J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology 10 (3), S. 282-290.

NIBIS@-KARTENSERVER IM NIEDERSÄCHSISCHEN BODENINFORMATIONSSYSTEM (2022a): Hydrogeologische Karte von Niedersachsen 1:50 000 - Lage der Grundwasseroberfläche; Hannover (LBEG).

NIBIS@-KARTENSERVER IM NIEDERSÄCHSISCHEN BODENINFORMATIONSSYSTEM (2022b): 3D-Modelle des Lockergesteins in Niedersachsen - 3D-Modell Vörden-Hunteburg; Hannover (LBEG).

NIBIS@-KARTENSERVER IM NIEDERSÄCHSISCHEN BODENINFORMATIONSSYSTEM (2022c): - <http://nibis.lbeg.de/cardomap3/>; Hannover (LBEG).

NLWKN (2015): Globaler Klimawandel. Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland - Abschlussbericht Phase 3, Niedrigwasser. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz [Hrsg.]. In: NLWKN-Schriftenreihe Oberirdische Gewässer, Band 36, Norden.

NLWKN (2017): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland – Gesamtbericht des Projektes KliBiW, Themenbereich Hochwasser. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz [Hrsg.]. In: NLWKN-Schriftenreihe Oberirdische Gewässer, Bd. 41, Norden.

NLWKN (2019a): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland – Gesamtbericht des Projektes KliBiW, Themenbereich Niedrigwasser. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz [Hrsg.]. In: NLWKN-Schriftenreihe Oberirdische Gewässer, Bd. 42, Norden.

NLWKN (2019b): Grundwasserbericht Niedersachsen - Sonderausgabe zur Grundwasserstandssituation im Trockenjahr 2018. NLWKN Schriftenreihe Grundwasser 36, Norden.

NLWKN (2020): Grundwasserbericht Niedersachsen - Sonderausgabe zur Grundwasserstandssituation in den Trockenjahren 2018 und 2019. NLWKN Schriftenreihe Grundwasser 41, Norden.

NLWKN (2021a): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland – Abschlussbericht des Projektes KliBiW Phase 6, Vertiefende Hochwasseranalysen. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz [Hrsg.]. In: NLWKN-Schriftenreihe Oberirdische Gewässer, Bd. 45, Norden.

NLWKN (2021b): Grundwasserbericht Niedersachsen - Sonderausgabe zur Grundwasserstandsentwicklung im Jahr 2020. NLWKN Schriftenreihe Grundwasser 48, Norden.

NLWKN (2022): Grundwasserbericht Niedersachsen - Sonderausgabe zur Grundwasserstandsentwicklung im Jahr 2021. NLWKN Schriftenreihe Grundwasser 54, Norden.

NLWKN - NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (2022): - <https://www.pegelonline.nlwkn.niedersachsen.de/Pegel/Binnenpegel/Name/Schäferhof>, Zugriff 04.05.2022.

NLWKN - NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ: Grundwassersteckbriefe: <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserrahmenrichtlinie/grundwasser/steckbriefe/grundwasserkorpersteckbriefee-2015-179409.html>, Zugriff: 12.05.2023, Braunschweig

Nogueira, Fernando (2014). Bayesian Optimization: Open source constrained global optimization tool for Python.

- Reback, J. e. a. (2020). pandas-dev/pandas: Pandas 1.4.2. <https://zenodo.org/record/6702671#.YwEQwHZBzt8>.
- REUTTER, E. (2011): Hydrostratigrafische Gliederung Niedersachsens – Geofakten 21: 2. Aufl., 11 S., 5 Abb., 2 Tab.; Hannover (LBEG), [DOI 10.48476/geofakt\_21\_2\_2011].
- Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes. Offenbach am Main
- SCHLINSOG, T. (2015): Beschreibung und Quantifizierung der Salz-/Süßwasser-Interaktion in einem norddeutschen Trinkwassergewinnungsgebiet mit Hilfe einer dichtegetriebenen 3D-Grundwassermodellierung [Unveröffentlichte Masterarbeit]. Technische Universität Braunschweig.
- Schwarz, G. E. (1978): Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics* 6 (2):461–464.
- Sen, P. K. (1968): Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association* 63 (324): 1379-1389.
- Theil, H. (1950a): A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, I. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen* 53: 386–392.
- Theil, H. (1950b): A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, II. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen* 53: 521–525.
- Theil, H. (1950c): A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, III. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen* 53: 1397–1412.
- Van Der Walt, S., Colbert, S. C., & Varoquaux, G. (2011). The NumPy array: A structure for efficient numerical computation. *Computing in Science and Engineering*, 13(2). <https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.37>.
- Vicente-Serrano S.M., Begueria S., Lopez-Moreno J.I. (2010): A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23:1696-1718.
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Vázquez-Baeza, Y. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>.
- WD (2021): Klimavorhersagen und Klimaprojektionen; Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 36 Seiten. S8.
- Weidlich, S. (2020): Anpassung an die Folgen des Klimawandels - Rechtliche Steuerung bei unsicheren Wissensgrundlagen, Volume 14, S. 53.
- Willmott, C.J., Robeson, S.M., Matsuura, K. (2012): A refined index of model performance. *Int. J. Climatol.* 32, 2088-2094
- Wriedt, G. (2017): Verfahren zur Analyse klimatischer und anthropogener Einflüsse auf die Grundwasserstandsentwicklung. *Grundwasser*, 22(1), 41-53, DOI 10.1007/s00767-016-0349-5
- Wunsch, A., Liesch, T. (2019): Entwicklung und Anwendung von Algorithmen zur Berechnung von Grundwasserständen an Referenzmessstellen auf Basis der Methode Künstlicher Neuronaler Netze Zwischenbericht Arbeitspaket 1: Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Identifizierung von Referenzmessstellen. KIT, Karlsruhe.
- Wunsch, A., Liesch, T. & Broda, S. (2022): Deep learning shows declining groundwater levels in Germany until 2100 due to climate change. - *Nat Commun* 13, 1221. doi: 10.1038/s41467-022-28770-2

# 14 Anhang

## 14.1 Anhang zu Teilprojekt A

Tabelle 14.1: Änderung der Kernindikatoren in Teilprojekt A nach Region (im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981-2010).

Indikator/Region	Nahe Zukunft 21-50			Ferne Zukunft 71-100		
	mittlere Änderung	minimale Änderung	maximale Änderung	mittlere Änderung	minimale Änderung	maximale Änderung
<b>Mittleres Jahresminimum <sup>1)</sup></b>						
Inseln	0,00	-0,06	0,06	0,01	-0,06	0,08
Marschen	-0,01	-0,06	0,03	-0,01	-0,07	0,03
Niederungsgebiete	-0,01	-0,09	0,07	0,00	-0,09	0,07
Geestgebiete	-0,01	-0,16	0,17	0,04	-0,10	0,18
Börden	-0,02	-0,14	0,18	-0,02	-0,13	0,14
Bergland	-0,03	-0,19	0,12	-0,02	-0,19	0,12
Niedersachsen	-0,01	-0,13	0,12	0,02	-0,10	0,12
<b>Mittleres Jahresmaximum <sup>1)</sup></b>						
Inseln	0,02	-0,03	0,12	0,09	0,02	0,17
Marschen	0,01	-0,03	0,11	0,05	-0,01	0,15
Niederungsgebiete	0,00	-0,08	0,14	0,10	-0,03	0,21
Geestgebiete	0,00	-0,15	0,24	0,15	-0,04	0,31
Börden	0,00	-0,19	0,27	0,06	-0,13	0,27
Bergland	0,02	-0,15	0,31	0,18	-0,07	0,38
Niedersachsen	0,00	-0,12	0,19	0,12	-0,04	0,26
<b>Mittlere Jahresamplitude <sup>1)</sup></b>						
Inseln	0,02	-0,03	0,07	0,09	0,02	0,15
Marschen	0,01	-0,03	0,04	0,06	-0,01	0,12
Niederungsgebiete	0,02	-0,08	0,11	0,13	0,00	0,25
Geestgebiete	0,01	-0,09	0,10	0,12	-0,03	0,25
Börden	0,03	-0,10	0,11	0,12	-0,09	0,26
Bergland	0,05	-0,15	0,23	0,24	0,02	0,44
Niedersachsen	0,02	-0,08	0,11	0,12	-0,02	0,25

<b>Monate mit Grundwassertiefstand <sup>2)</sup></b>						
Inseln	3	-23	29	-1	-27	38
Marschen	6	-16	38	8	-15	44
Niederungsgebiete	8	-25	43	5	-20	40
Geestgebiete	15	-47	75	-9	-45	42
Börden	21	-51	100	19	-28	91
Bergland	10	-21	48	15	-12	54
Niedersachsen	12	-36	59	-2	-33	41

<b>Monate mit Grundwasserhochstand <sup>2)</sup></b>						
Inseln	7	-22	37	40	-2	107
Marschen	5	-15	24	26	-3	62
Niederungsgebiete	2	-21	27	26	-9	56
Geestgebiete	5	-39	55	41	-12	98
Börden	1	-43	62	20	-23	81
Bergland	3	-21	28	27	-9	70
Niedersachsen	4	-30	41	34	-10	78

<b>Mittlerer Eintrittszeitpunkt Jahresminimum <sup>3)</sup></b>						
Inseln	0,2	-0,2	0,6	0,3	-0,1	0,7
Marschen	0,2	-0,3	0,7	0,3	-0,1	0,7
Niederungsgebiete	0,1	-0,3	0,6	0,2	-0,2	0,7
Geestgebiete	0,1	-0,3	0,6	0,2	-0,3	0,7
Börden	0,1	-0,5	0,5	0,2	0,0	0,6
Bergland	0,1	-0,3	0,6	0,2	-0,1	0,6
Niedersachsen	0,1	-0,3	0,6	0,2	-0,2	0,7

<b>Mittlerer Eintrittszeitpunkt Jahresmaximum <sup>3)</sup></b>						
Inseln	0,1	-0,2	0,5	0,1	-0,2	0,8
Marschen	0,1	-0,2	0,5	0,2	-0,2	0,8

Niederungsgebiete	0,1	-0,3	0,4	0,1	-0,5	0,5
Geestgebiete	0,1	-0,3	0,5	0,1	-0,5	0,6
Börden	0,1	-0,5	0,4	-0,1	-0,9	0,6
Bergland	0,1	-0,3	0,4	0,1	-0,7	0,5
Niedersachsen	0,1	-0,3	0,5	0,1	-0,5	0,6

<sup>1)</sup> Änderung in Meter

<sup>2)</sup> Änderung als Summe der Monate in 30 Jahren

<sup>3)</sup> Änderung in Monaten

Tabelle 14.2: Änderung der sonstigen Indikatoren in Teilprojekt A nach Region (im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981-2010).

Indikator/Region	Nahe Zukunft 21-50			Ferne Zukunft 71-100		
	mittlere Änderung	minimale Änderung	maximale Änderung	mittlere Änderung	minimale Änderung	maximale Änderung
<b>Mittlerer Grundwasserstand <sup>1)</sup></b>						
Inseln	0,01	-0,05	0,08	0,05	-0,02	0,12
Marschen	-0,09	-0,74	0,04	-0,04	-0,46	0,05
Niederungsgebiete	0,00	-0,09	0,10	0,04	-0,06	0,12
Geestgebiete	0,00	-0,17	0,21	0,09	-0,06	0,23
Börden	-0,02	-0,19	0,21	0,02	-0,13	0,16
Bergland	-0,01	-0,19	0,21	0,06	-0,12	0,24
Niedersachsen	-0,01	-0,16	0,15	0,06	-0,08	0,17
<b>Minimaler Grundwasserstand <sup>1)</sup></b>						
Inseln	0,02	-0,04	0,07	0,01	-0,05	0,08
Marschen	0,01	-0,08	0,07	-0,02	-0,09	0,07
Niederungsgebiete	0,01	-0,08	0,11	-0,01	-0,10	0,10
Geestgebiete	0,02	-0,12	0,20	0,05	-0,13	0,23
Börden	-0,04	-0,14	0,10	-0,06	-0,15	0,06
Bergland	0,03	-0,17	0,21	-0,04	-0,22	0,16
Niedersachsen	0,02	-0,10	0,15	0,02	-0,11	0,17
<b>Maximaler Grundwasserstand <sup>1)</sup></b>						
Inseln	0,06	-0,20	0,31	0,18	-0,07	0,42



Marschen	0,01	-0,22	0,17	0,07	-0,19	0,24
Niederungsgebiete	0,05	-0,21	0,36	0,22	-0,06	0,51
Geestgebiete	0,05	-0,38	0,56	0,27	-0,18	0,77
Börden	0,06	-0,42	0,46	0,29	-0,26	1,14
Bergland	0,06	-0,42	0,63	0,37	-0,16	1,12
Niedersachsen	0,05	-0,30	0,46	0,24	-0,13	0,64

#### Gesamtamplitude <sup>1)</sup>

Inseln	0,04	-0,21	0,32	0,21	-0,09	0,48
Marschen	0,02	-0,13	0,21	0,13	-0,02	0,26
Niederungsgebiete	0,05	-0,26	0,46	0,31	-0,04	0,75
Geestgebiete	0,03	-0,41	0,47	0,30	-0,21	1,06
Börden	0,12	-0,43	0,62	0,44	-0,10	1,48
Bergland	0,06	-0,54	0,82	0,50	-0,24	1,49
Niedersachsen	0,04	-0,33	0,46	0,30	-0,13	0,89

#### Standardabweichung <sup>1)</sup>

Inseln	0,01	-0,01	0,04	0,04	0,01	0,07
Marschen	0,00	-0,01	0,02	0,03	0,00	0,04
Niederungsgebiete	0,01	-0,04	0,04	0,06	-0,01	0,11
Geestgebiete	0,01	-0,09	0,07	0,06	-0,04	0,18
Börden	0,01	-0,09	0,13	0,07	-0,05	0,26
Bergland	0,01	-0,07	0,07	0,11	-0,01	0,22
Niedersachsen	0,01	-0,06	0,06	0,06	-0,02	0,15

#### Jahre mit mind. einem Niedrigstandsmonat <sup>2)</sup>

Inseln	0,7	-5,9	8,1	-0,4	-9,4	9,8
Marschen	1,4	-4,6	8,5	1,6	-5,3	9,1
Niederungsgebiete	1,4	-5,1	7,9	0,8	-5,0	7,8
Geestgebiete	1,5	-7,8	10,1	-1,3	-8,5	7,4
Börden	1,9	-9,7	13,1	2,1	-5,9	14,0
Bergland	1,4	-4,8	8,0	2,3	-3,8	9,0
Niedersachsen	1,4	-6,4	9,1	-0,2	-6,8	7,7

**Jahre mit mind. einem  
Hochstandsmonat <sup>2)</sup>**

Inseln	1,6	-3,9	6,9	6,8	1,4	18,1
Marschen	0,3	-4,2	6,8	5,9	-0,9	15,3
Niederungsgebiete	-0,5	-6,5	8,2	5,1	-2,0	13,6
Geestgebiete	-0,5	-6,9	8,5	5,1	-1,5	12,6
Börden	-1,2	-9,2	7,4	2,8	-5,6	13,0
Bergland	0,2	-7,3	9,4	6,6	-1,7	21,0
Niedersachsen	-0,5	-6,6	8,3	5,2	-1,7	13,3

<sup>1)</sup> Änderung in Meter

<sup>2)</sup> Änderung als Anzahl der Jahre in 30 Jahren

# Änderung mittlerer Grundwasserstand

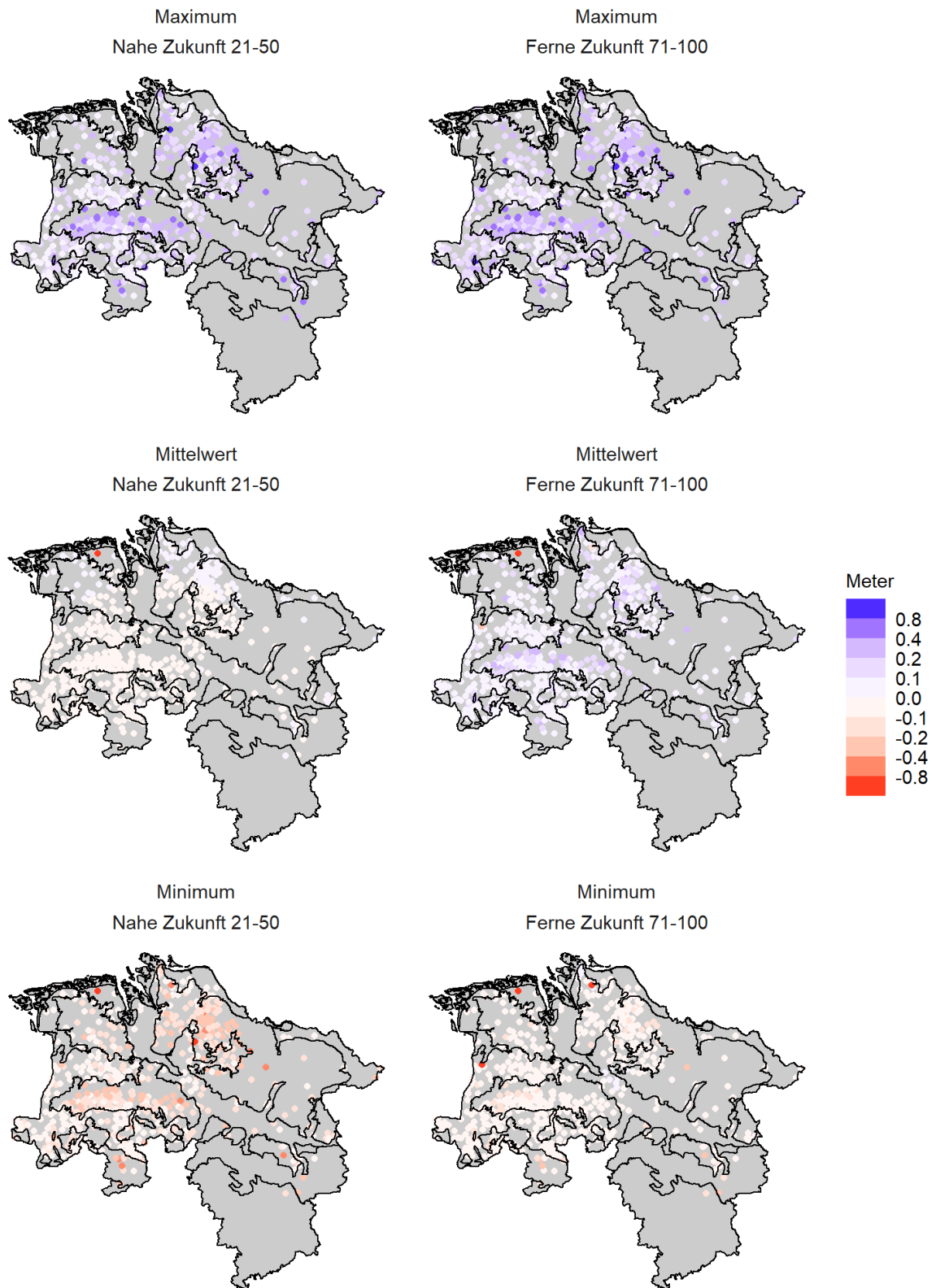


Abbildung 14.1: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des mittleren Grundwasserstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010

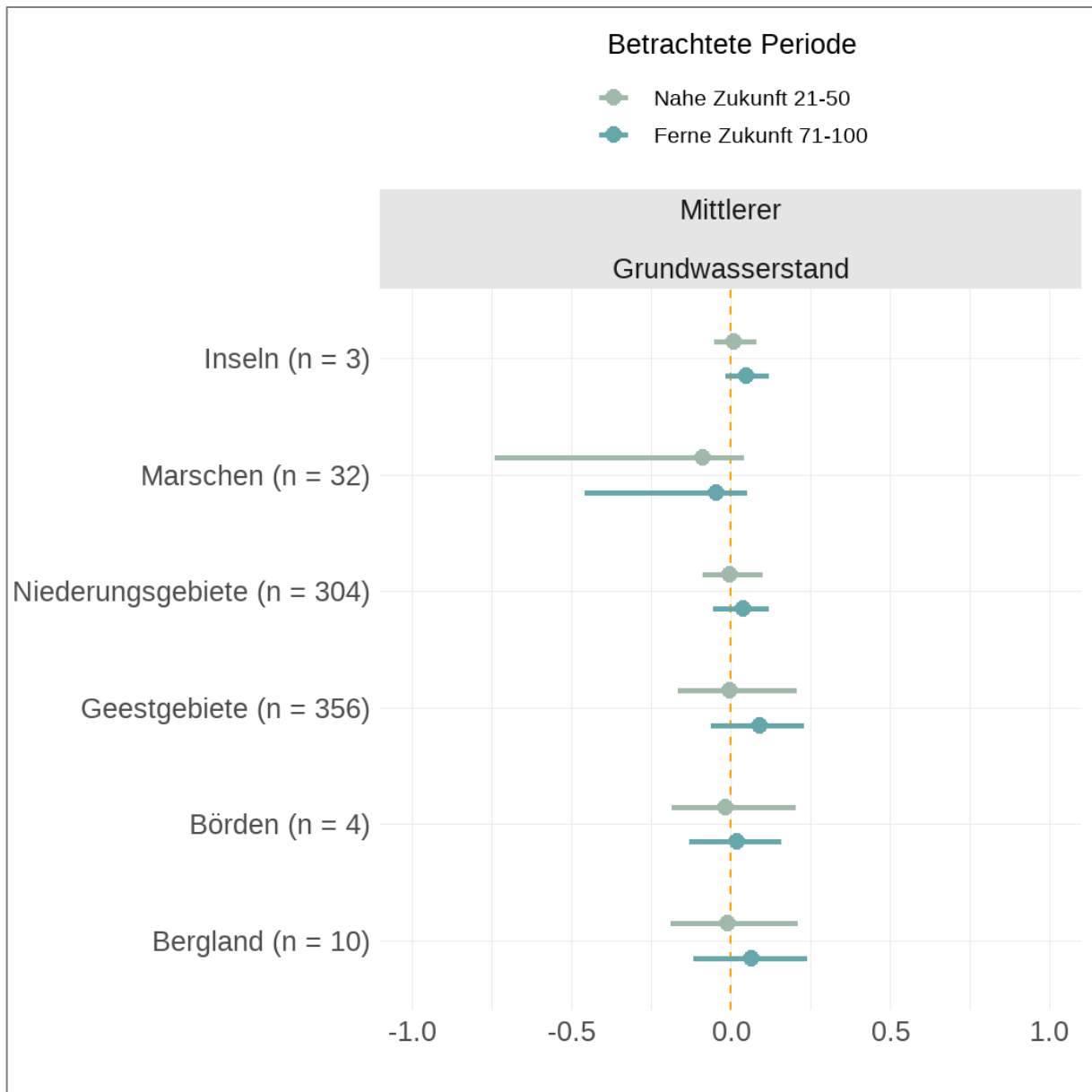


Abbildung 14.2: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung des Mittleren Grundwasserstands (in m)

# Änderung minimaler Grundwasserstand

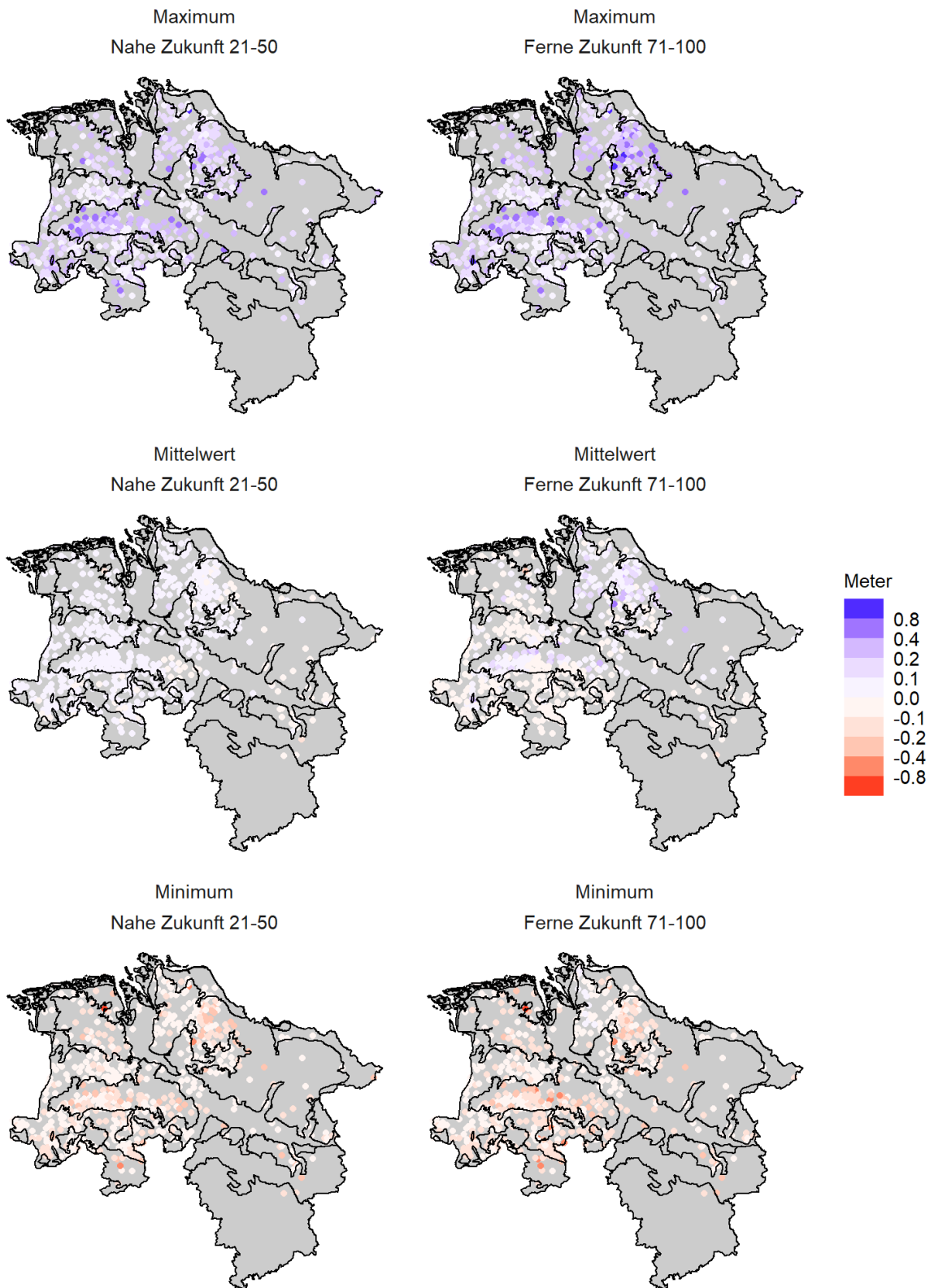


Abbildung 14.3: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des minimalen Grundwasserstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010

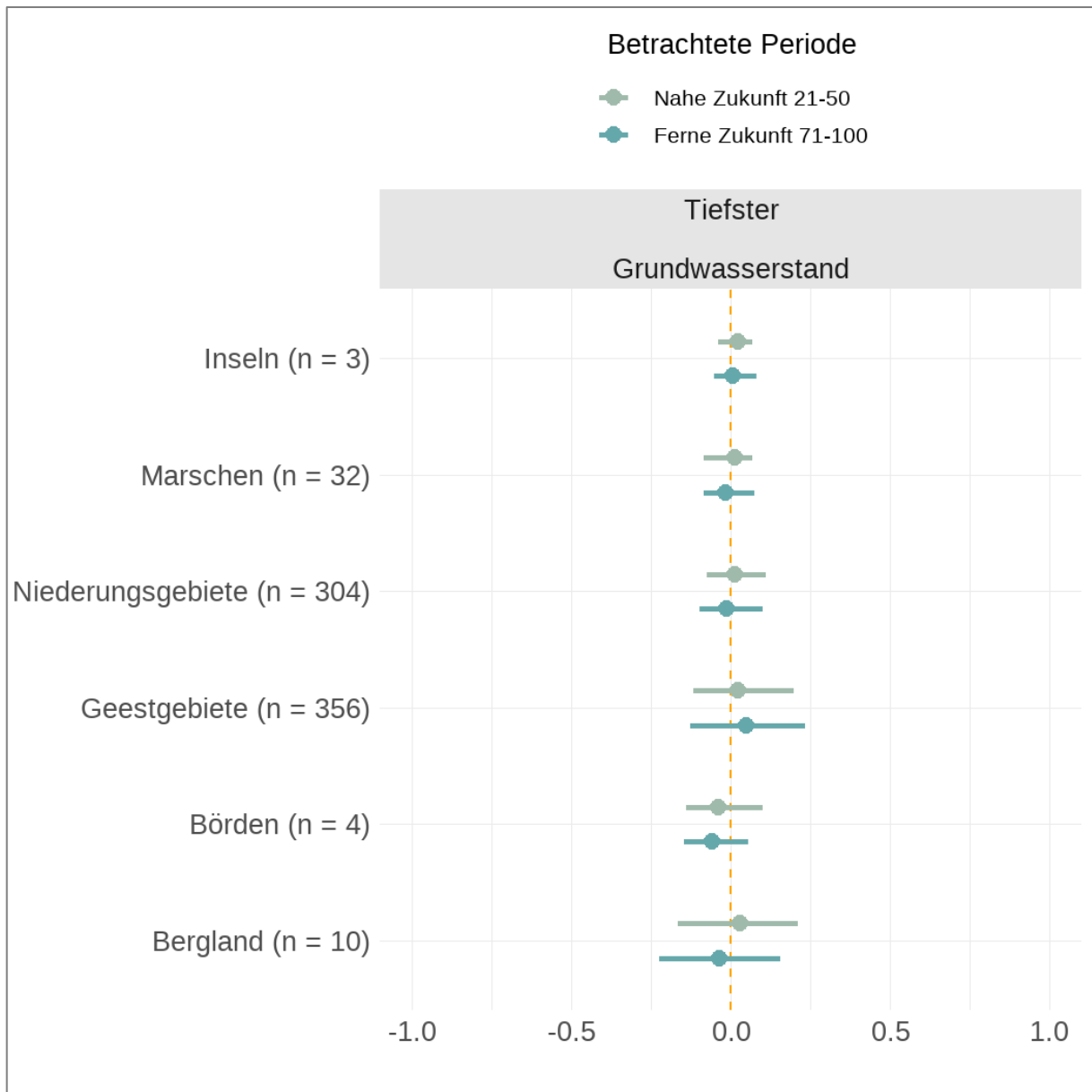


Abbildung 14.4: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung tiefster Grundwasserstand (in m).

# Änderung maximaler Grundwasserstand

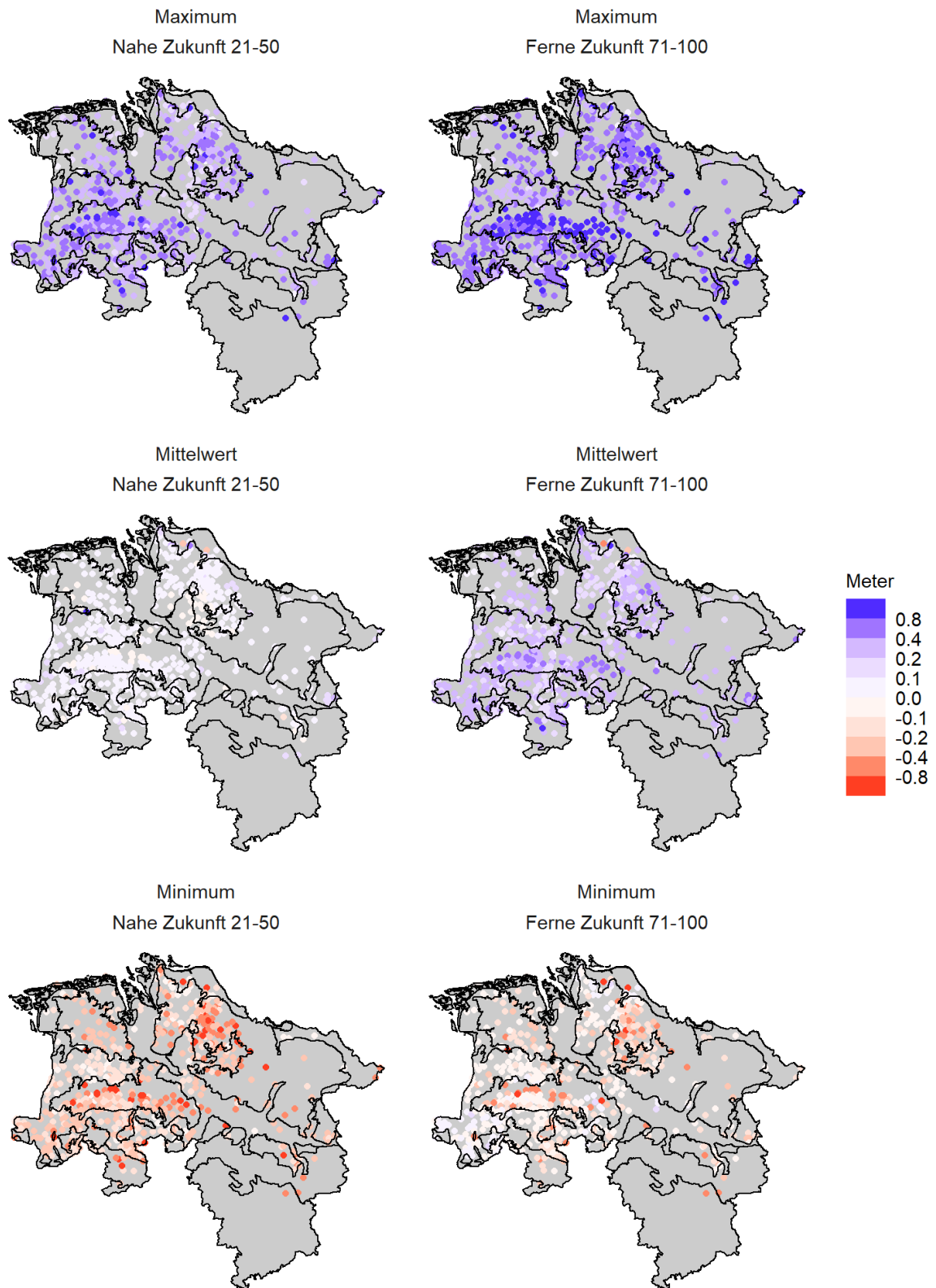


Abbildung 14.5: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung des maximalen Grundwasserstands gegenüber der Referenzperiode 1981-2010

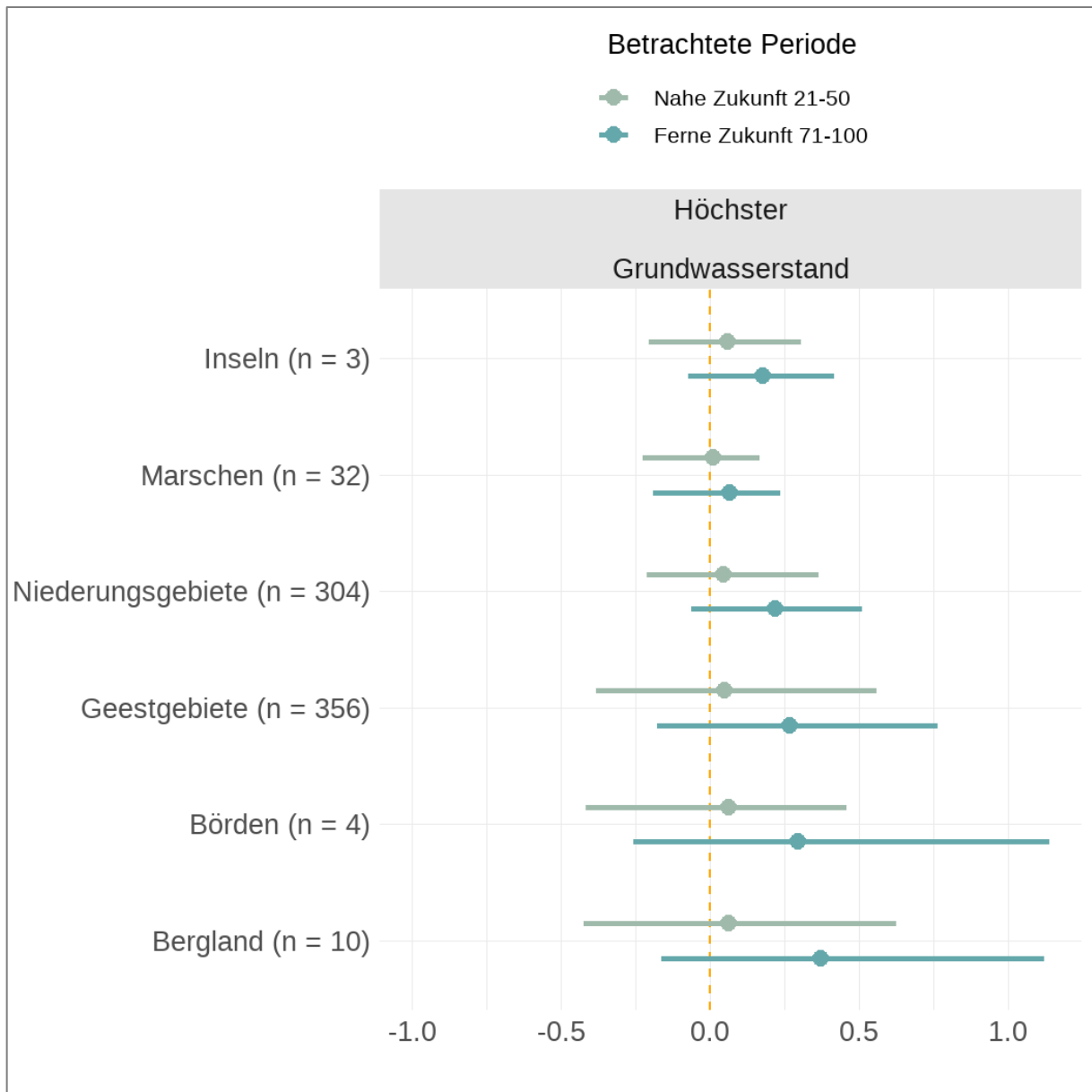


Abbildung 14.6: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung höchster Grundwasserstand (in m)



# Standardabweichung

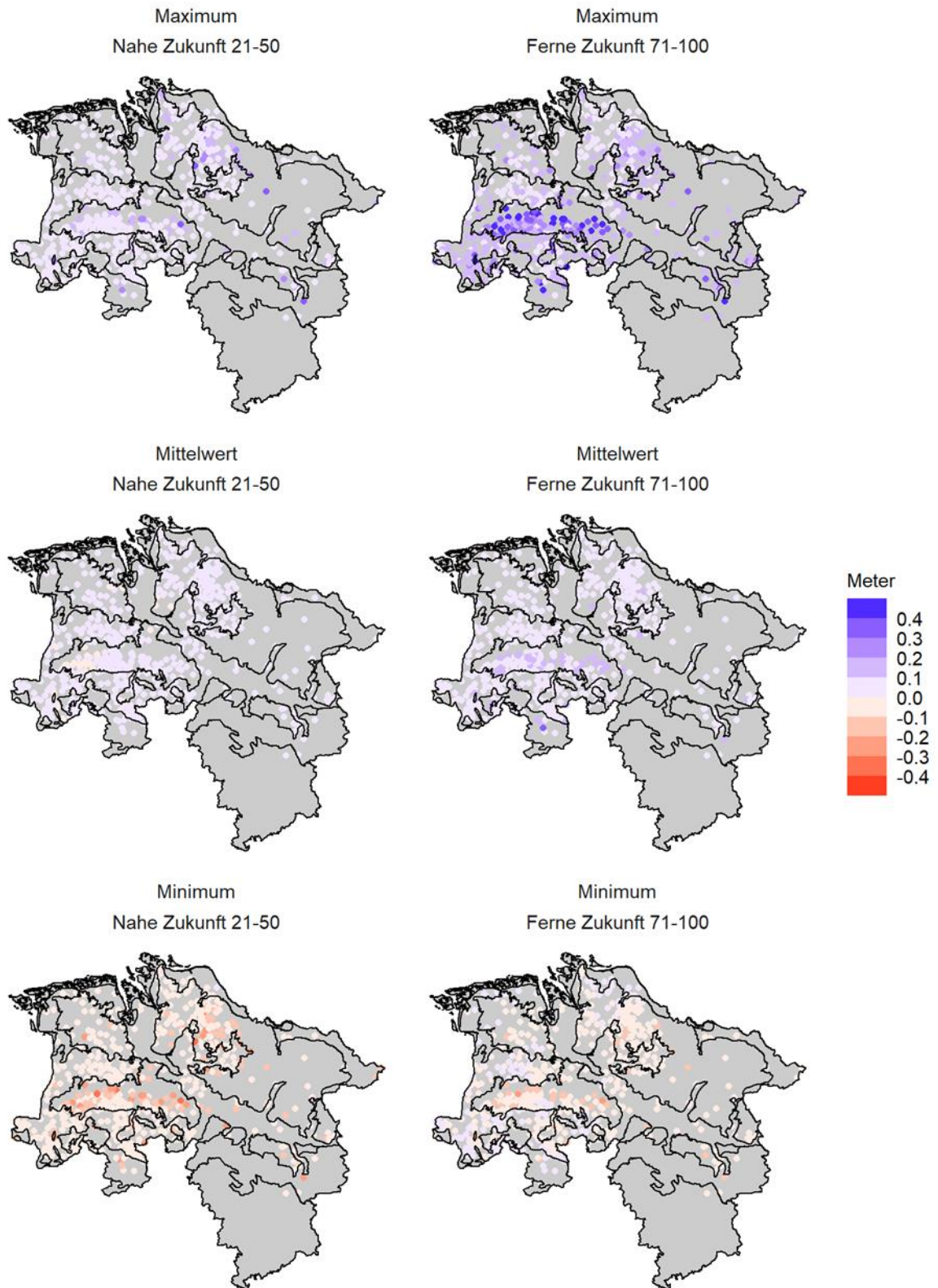


Abbildung 14.7: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der Standardabweichung gegenüber der Referenzperiode 1981-2010

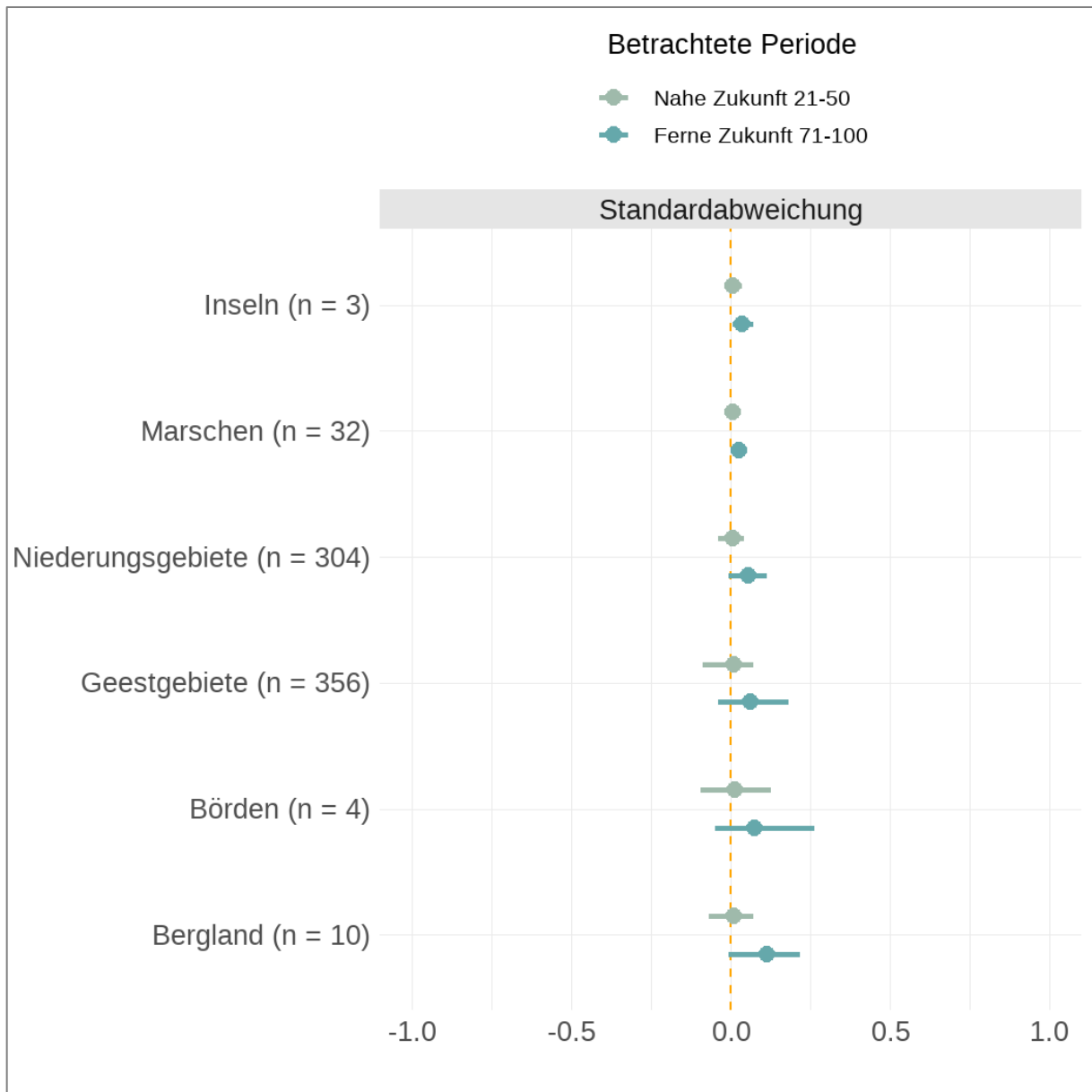


Abbildung 14.8: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung Standardabweichung (in m)

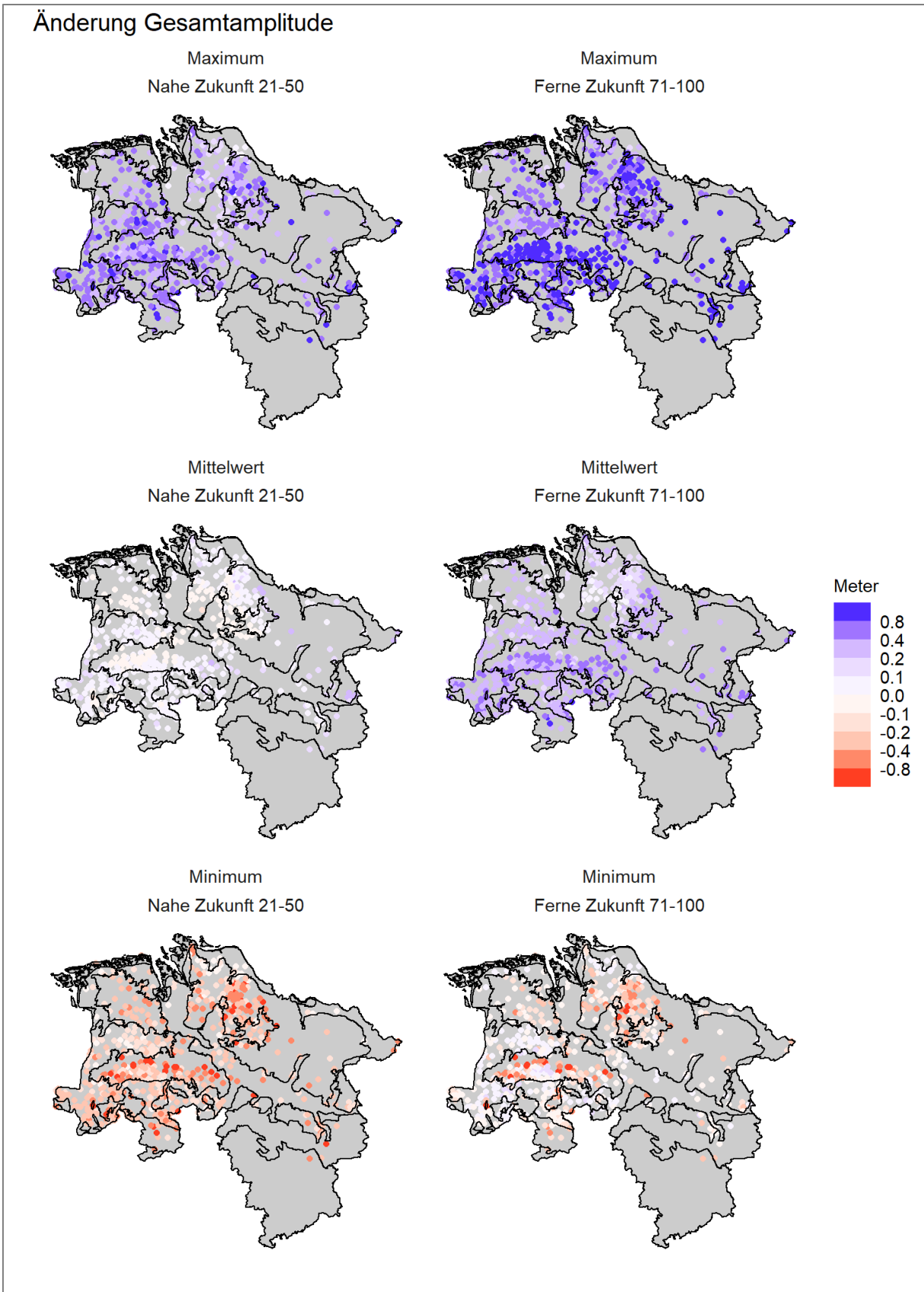


Abbildung 14.9: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der Gesamtamplitude gegenüber der Referenzperiode 1981-2010

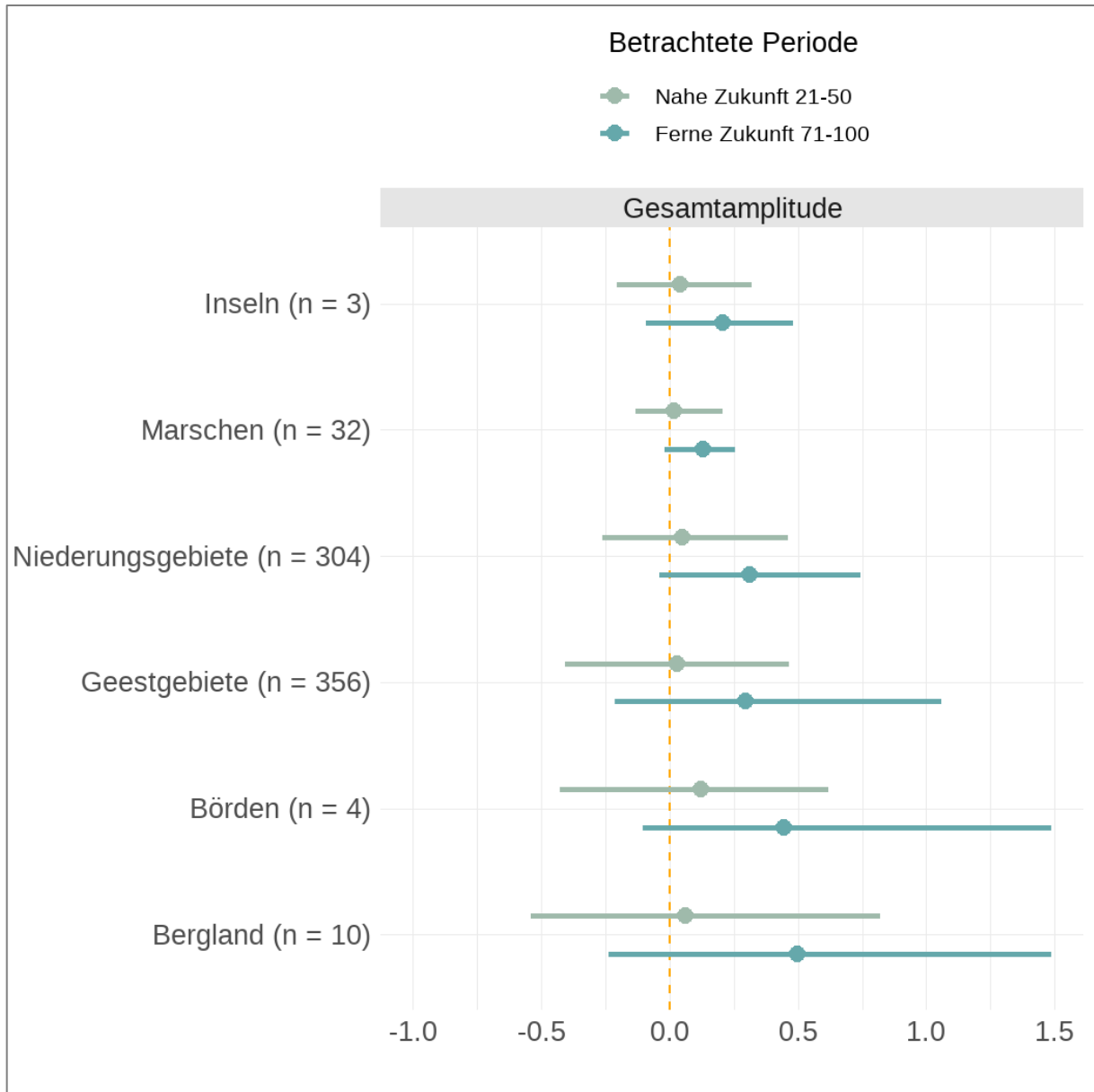


Abbildung 14.10: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung der Gesamtamplitude (in m).

# Änderung Anzahl Jahre mind. ein Niedrigstandsmonat

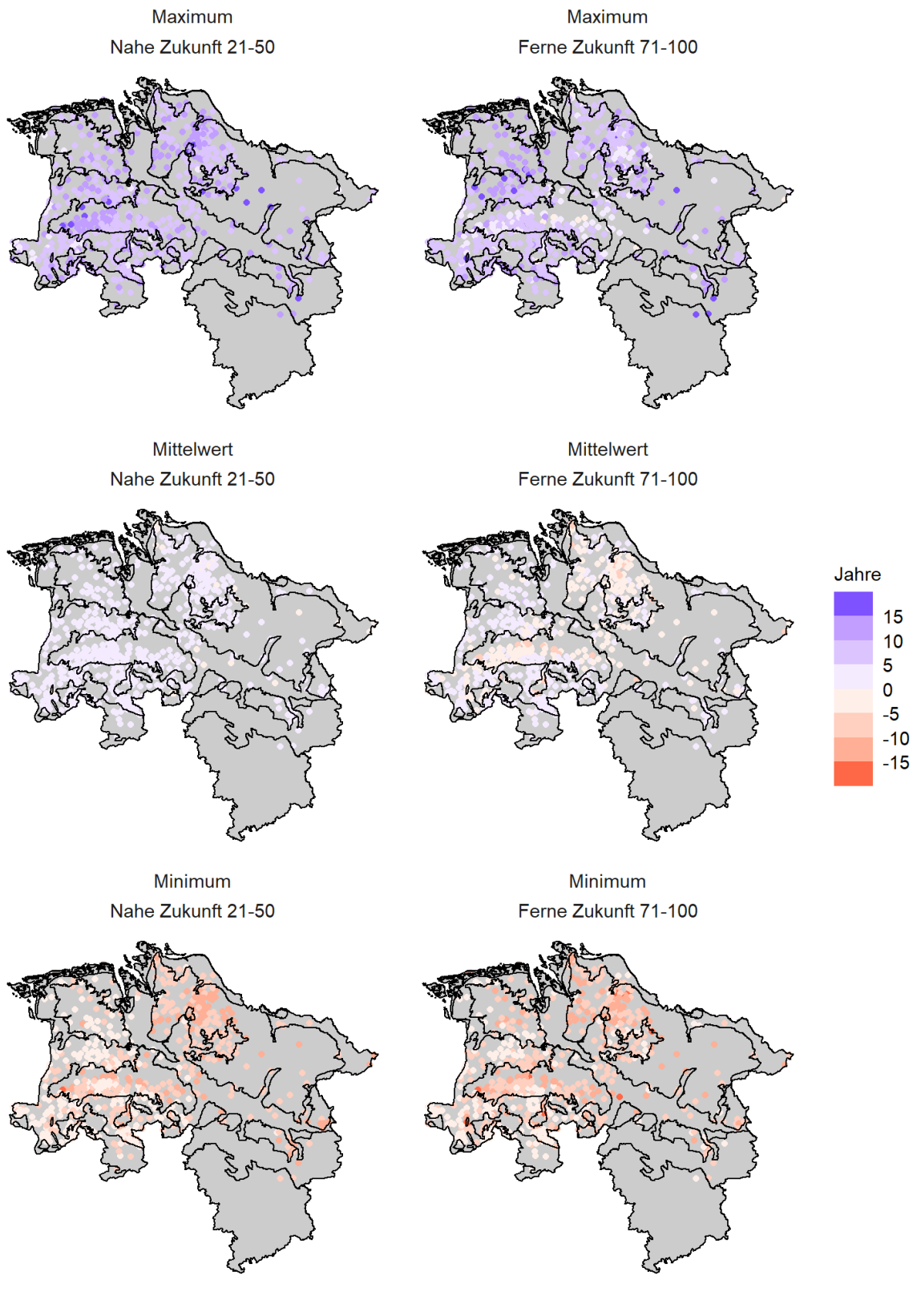


Abbildung 14.11: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der Anzahl der Jahre mit mindestens einem Niedrigstandsmonat gegenüber der Referenzperiode 1981-2010

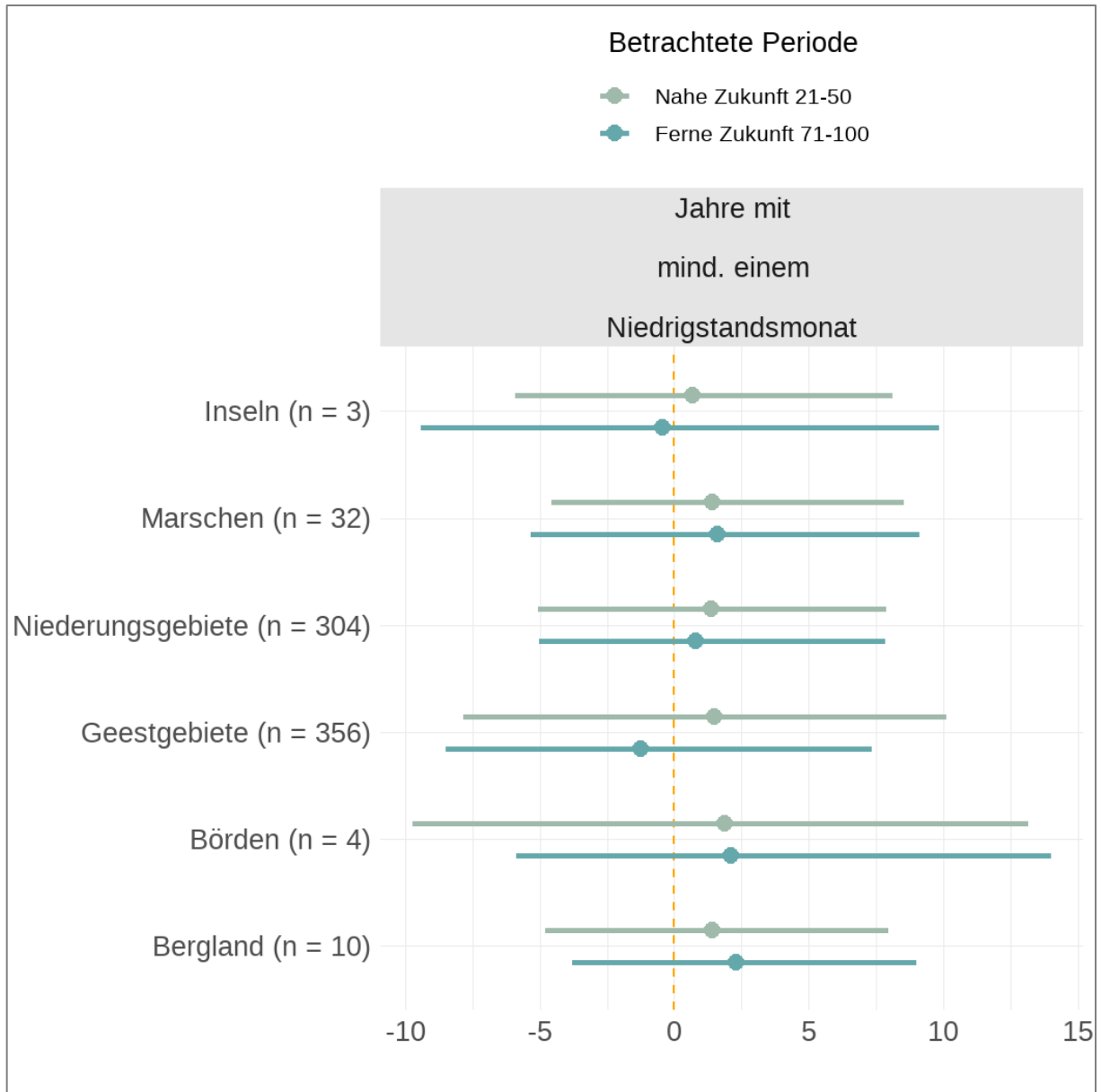


Abbildung 14.12: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung Jahre mit mind. einem Niedrigstandsmonat (innerhalb des 30-Jahre-Zeitraums)

# Änderung Anzahl Jahre mind. ein Hochstandsmonat

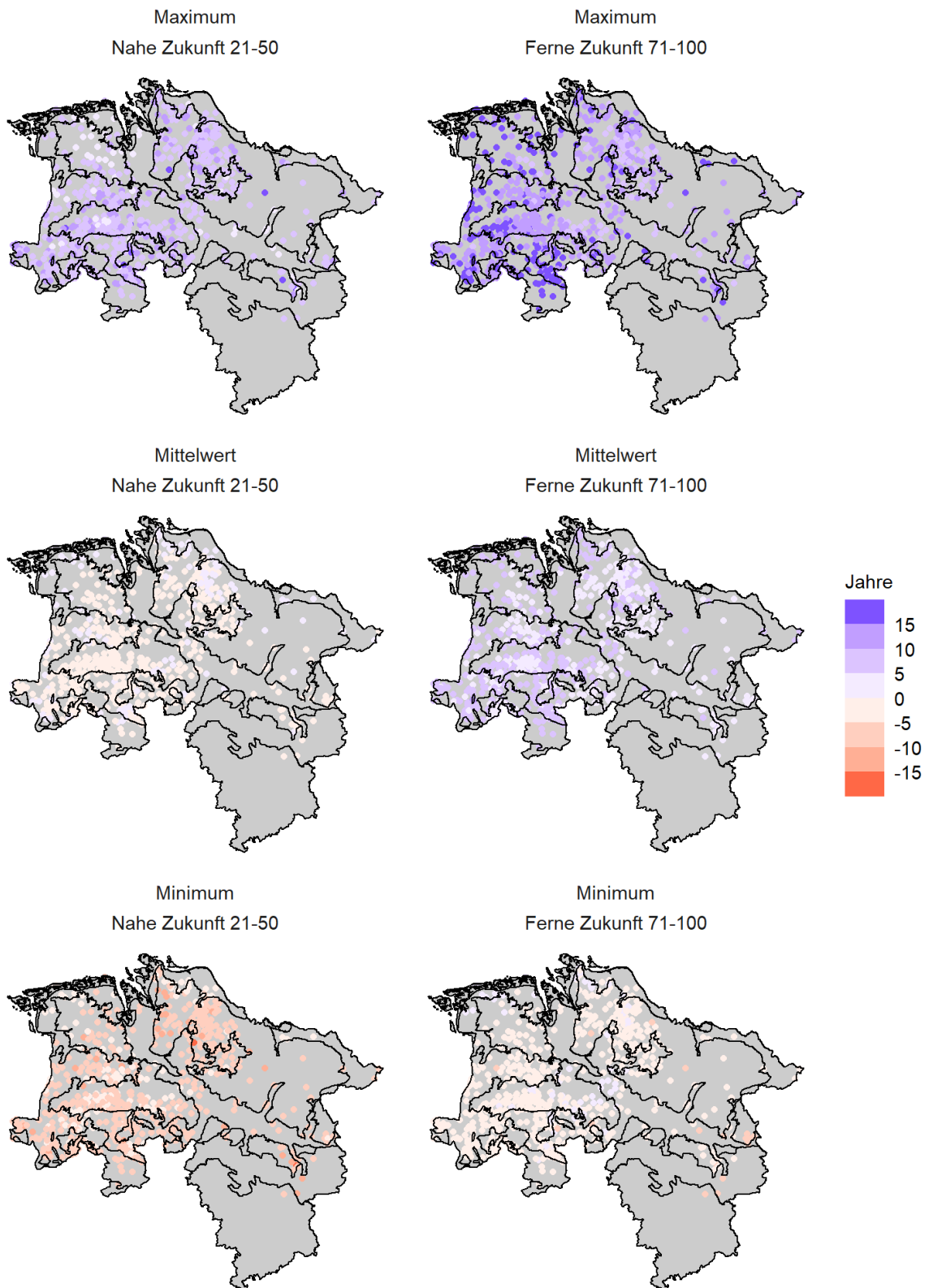


Abbildung 14.13: Kartendarstellung der Änderungssignale der Messstellen - Änderung der Anzahl der Jahre mit mindestens einem Hochstandsmonat gegenüber der Referenzperiode 1981-2010

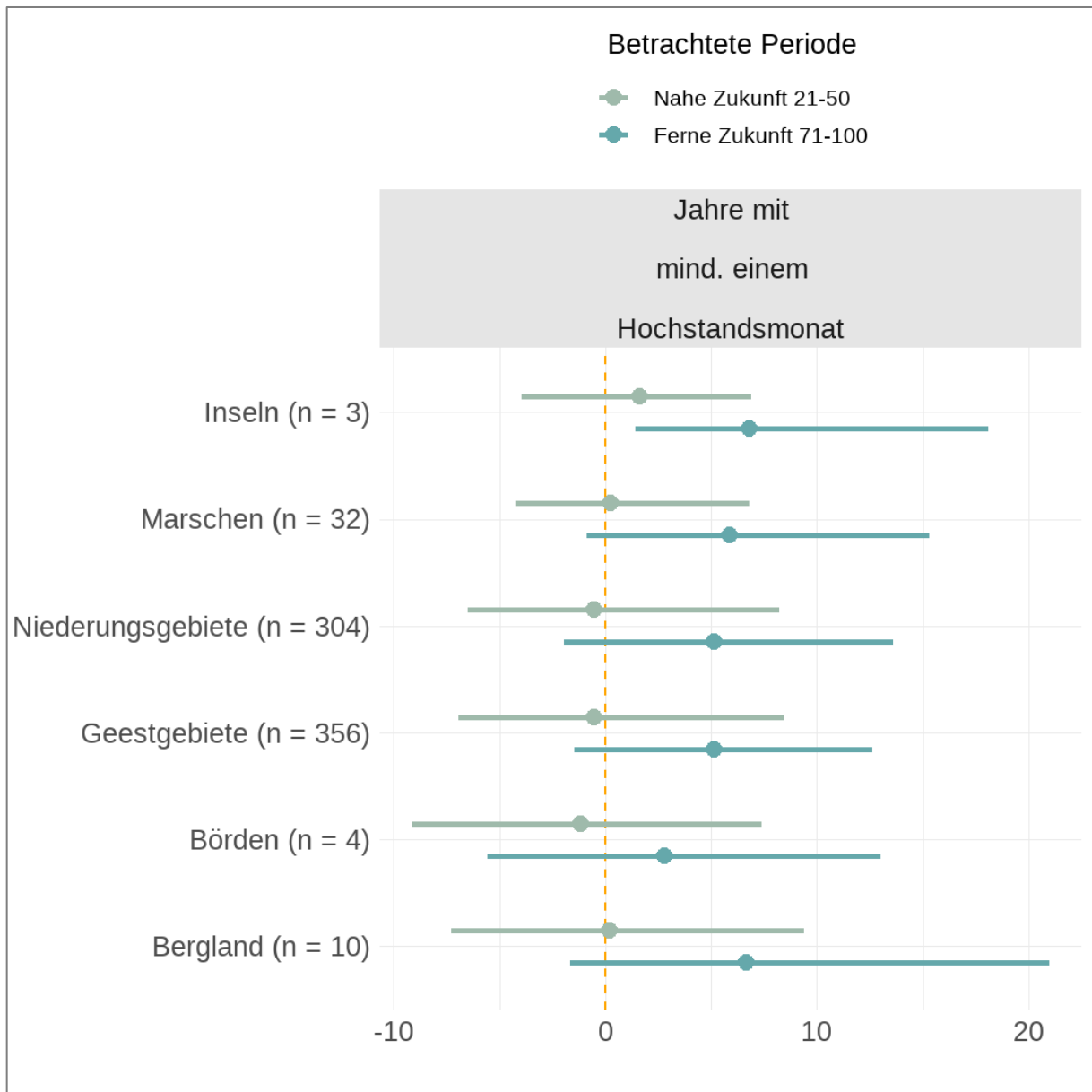


Abbildung 14.14: Balkendarstellung der Änderungssignale nach Region - Änderung Jahre mit mind. einem Hochstandsmonat (innerhalb des 30-Jahre-Zeitraums)



## 14.2 Anhang zu Teilprojekt C

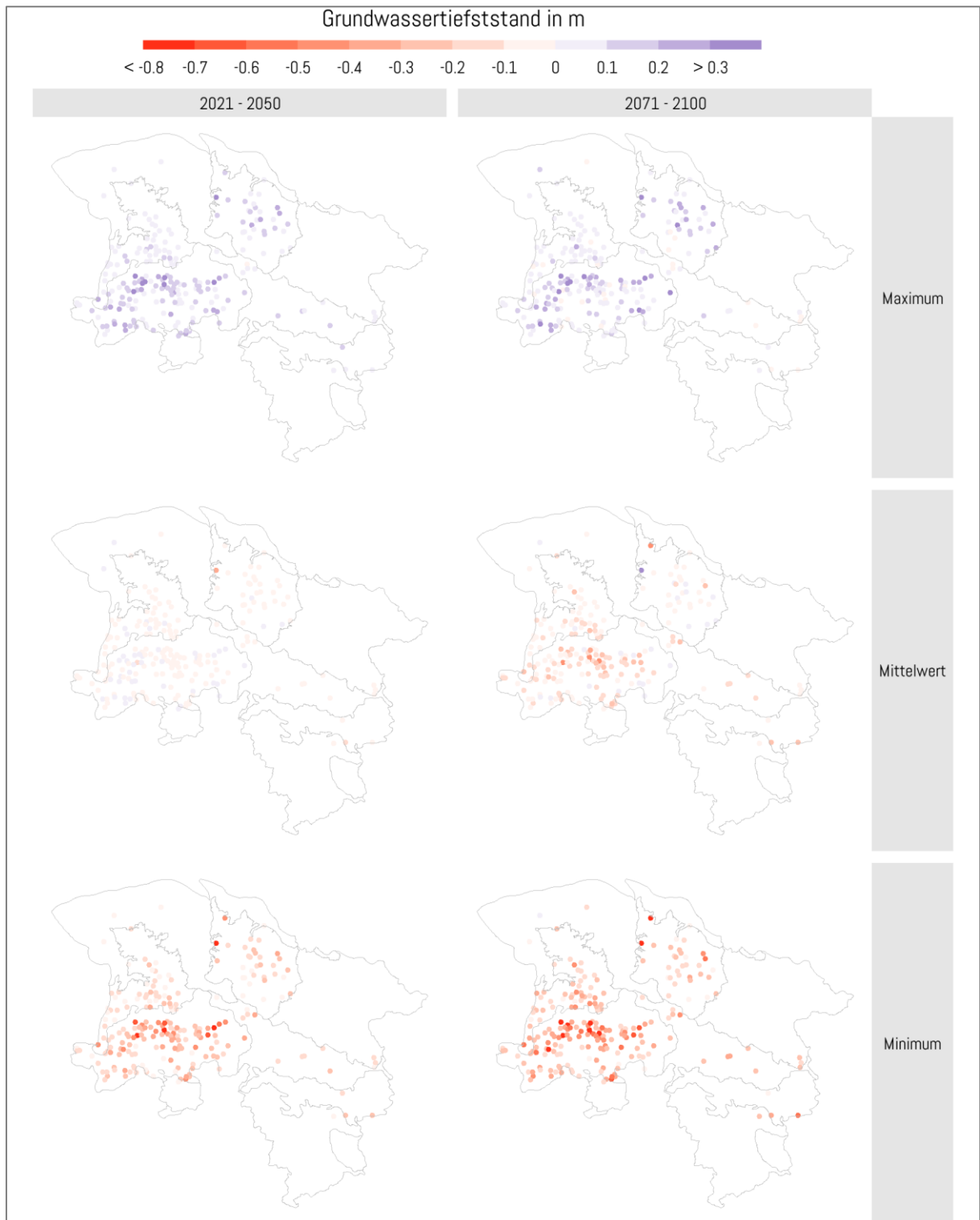


Abbildung 14.15: : Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den Grundwassertiefststand gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle.

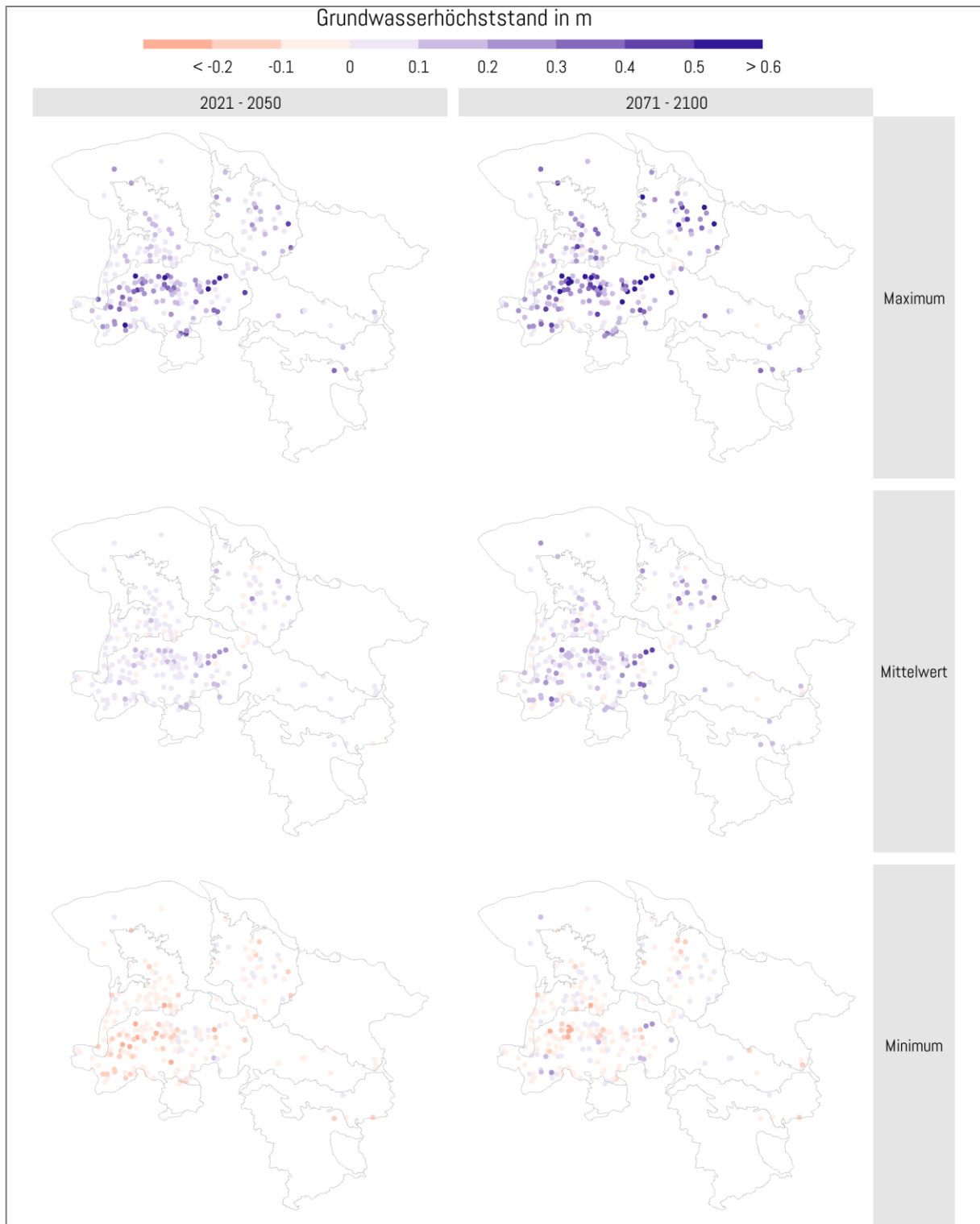


Abbildung 14.16: : Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für den Grundwasserhöchststand gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle.

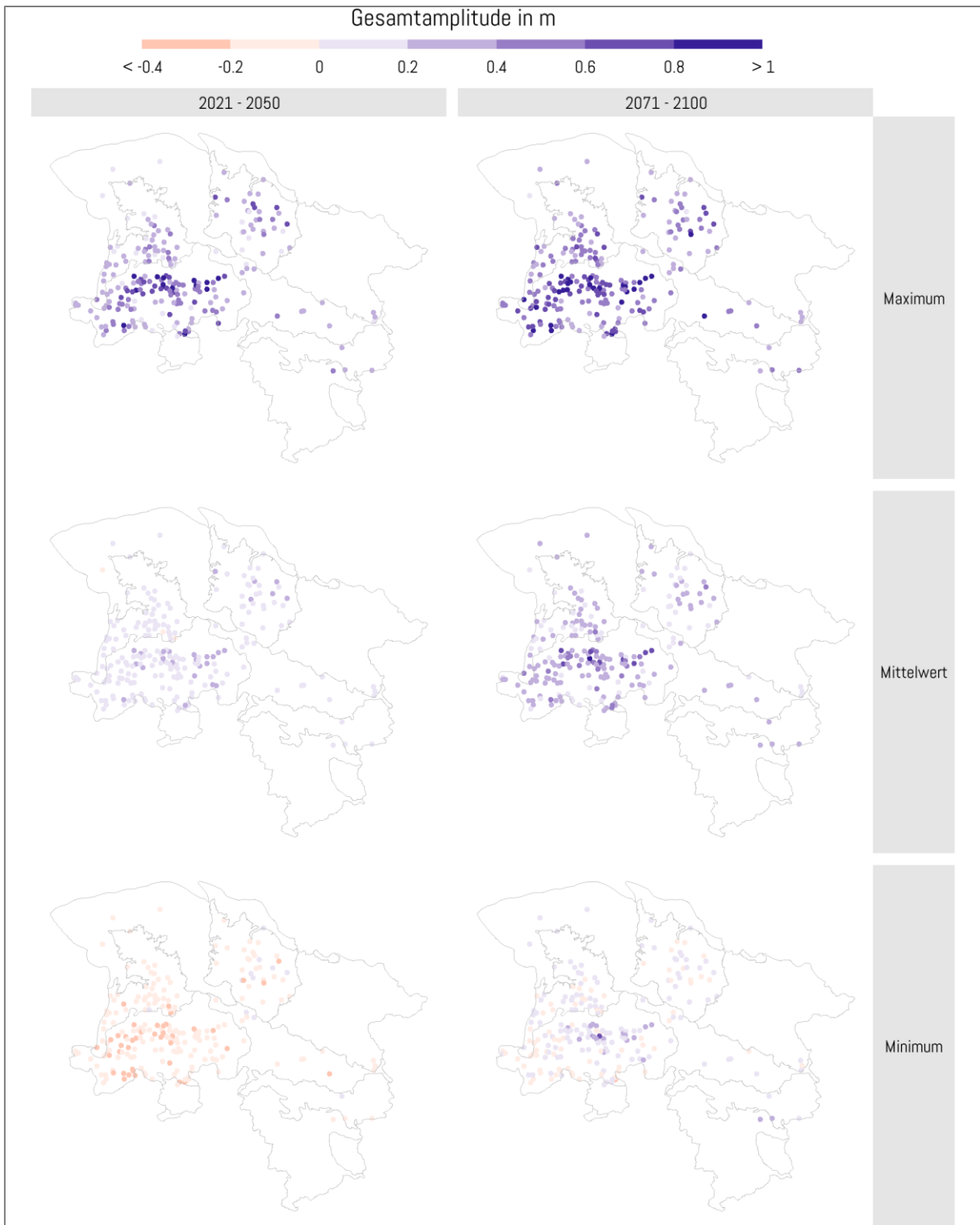


Abbildung 14.17: : Räumliche Verteilung der absoluten Änderung für die Gesamtamplitude gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 dargestellt für Minimum, Mittelwert und Maximum der Bandbreite der Projektionen auf Basis der Klimamodelle.

### 14.3 Anhang zu Teilprojekt D

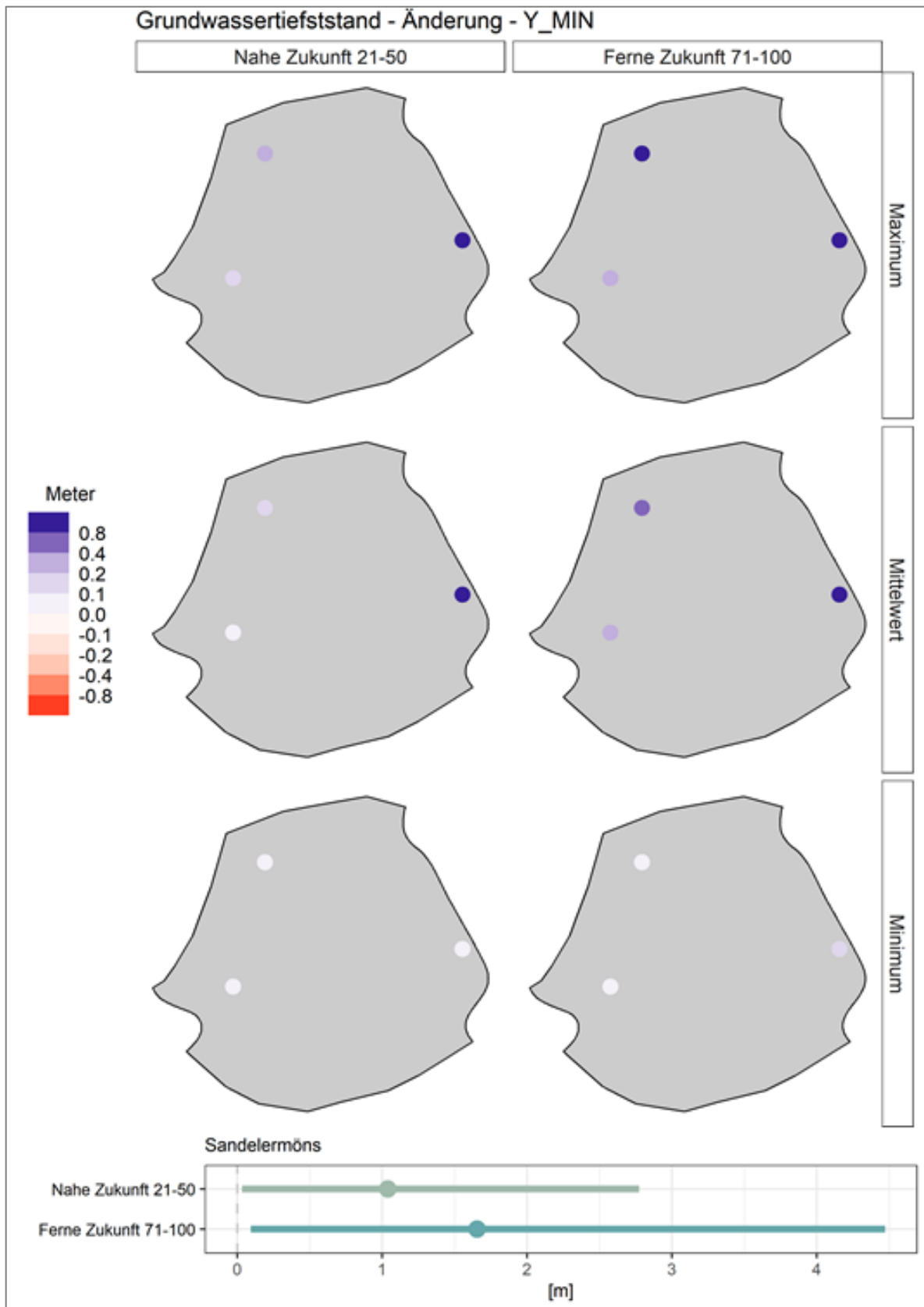


Abbildung 14.18: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Indikators Grundwassertiefststand im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

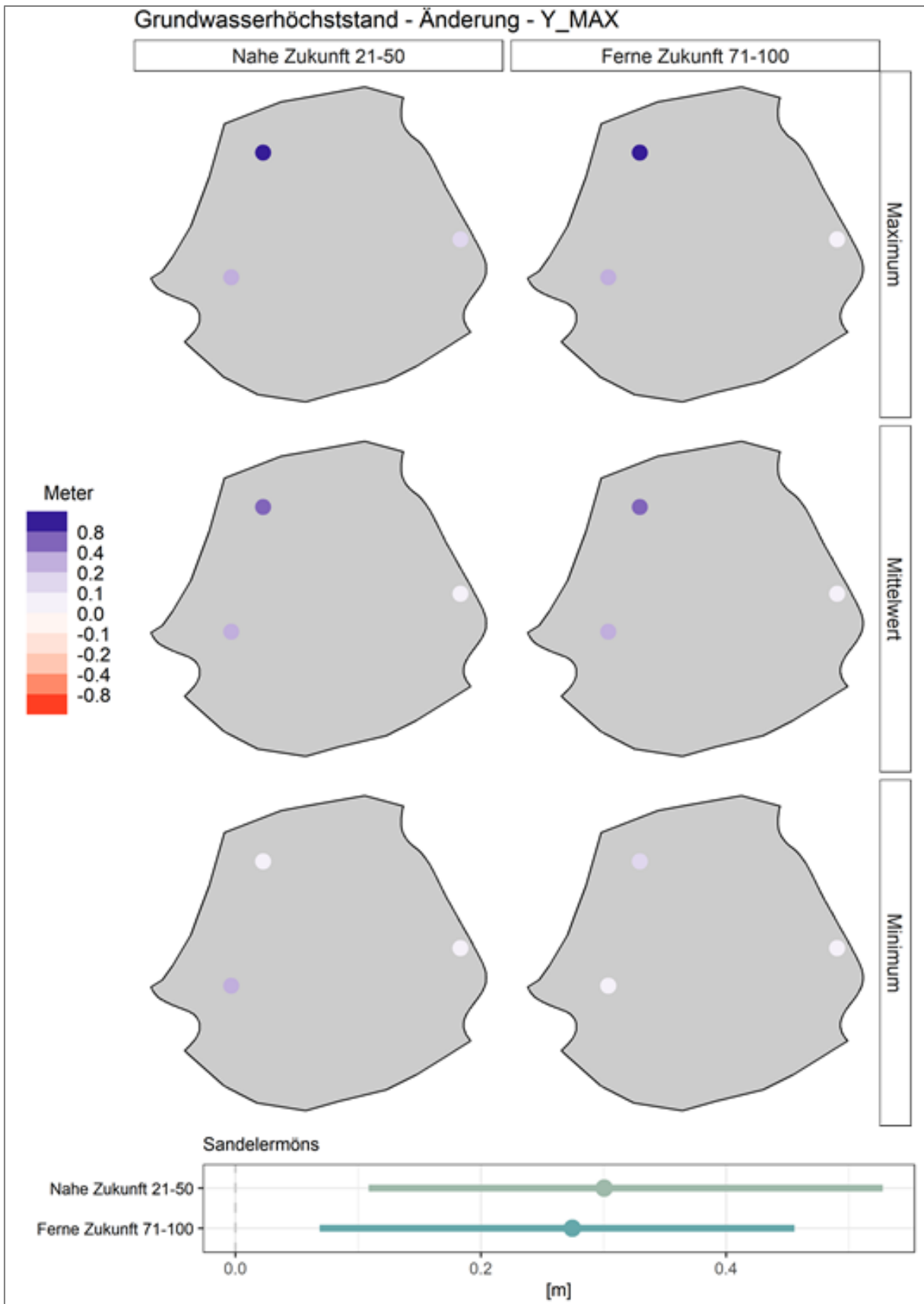


Abbildung 14.19: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Indikators Grundwasserhöchststand im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

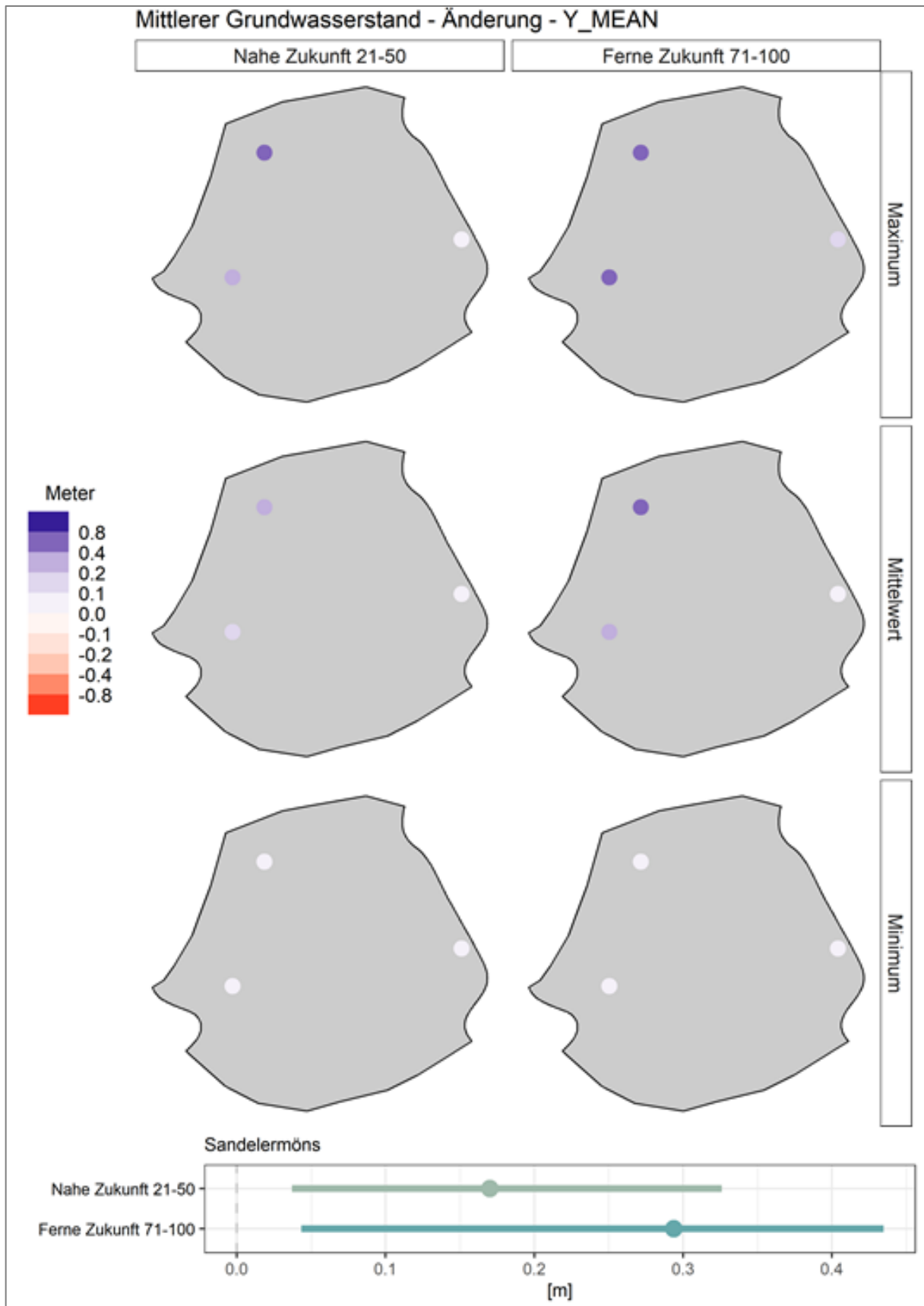


Abbildung 14.20: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Indikators Mittlere Grundwasserstand im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

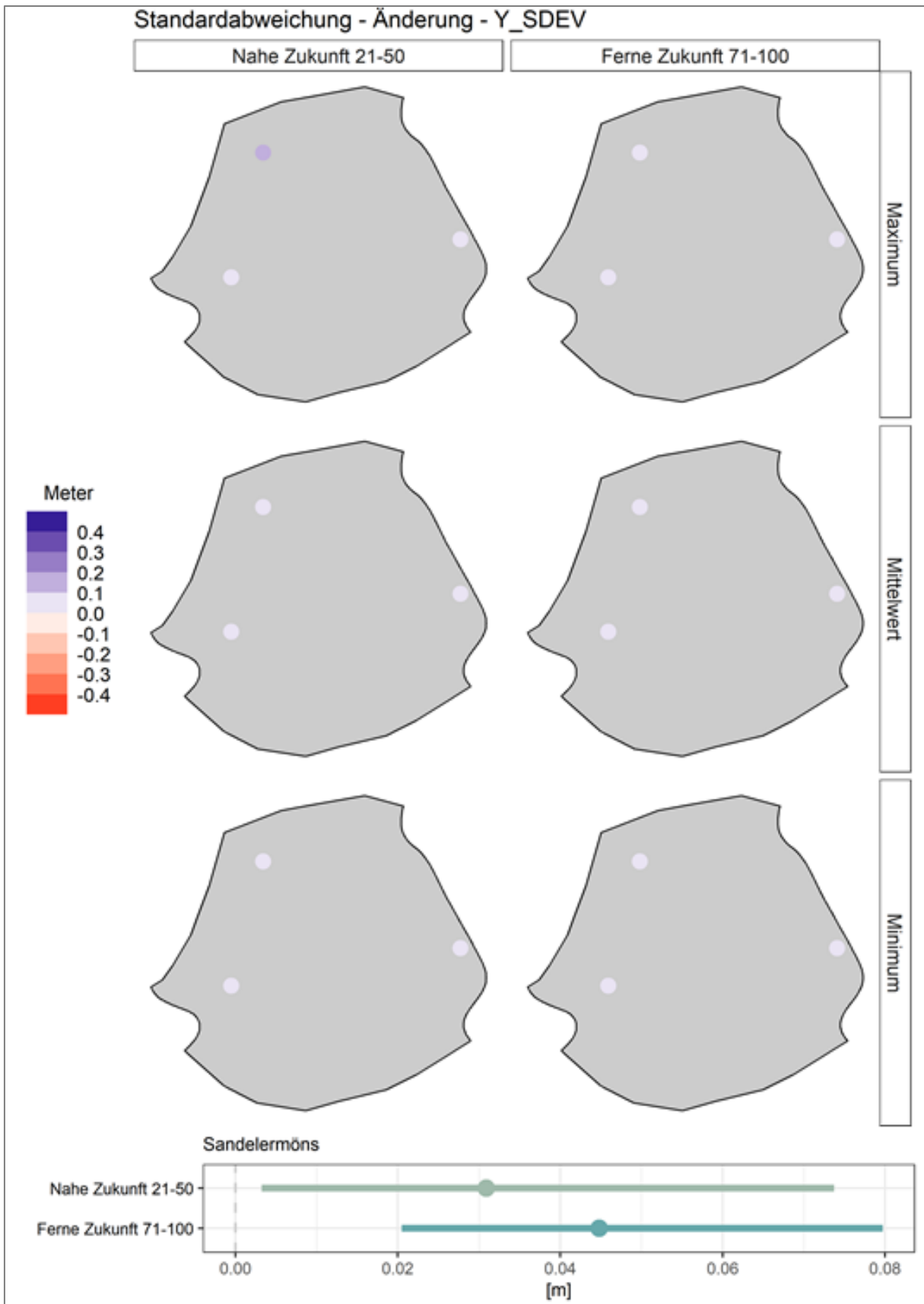


Abbildung 14.21: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Indikators Standardabweichung im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010

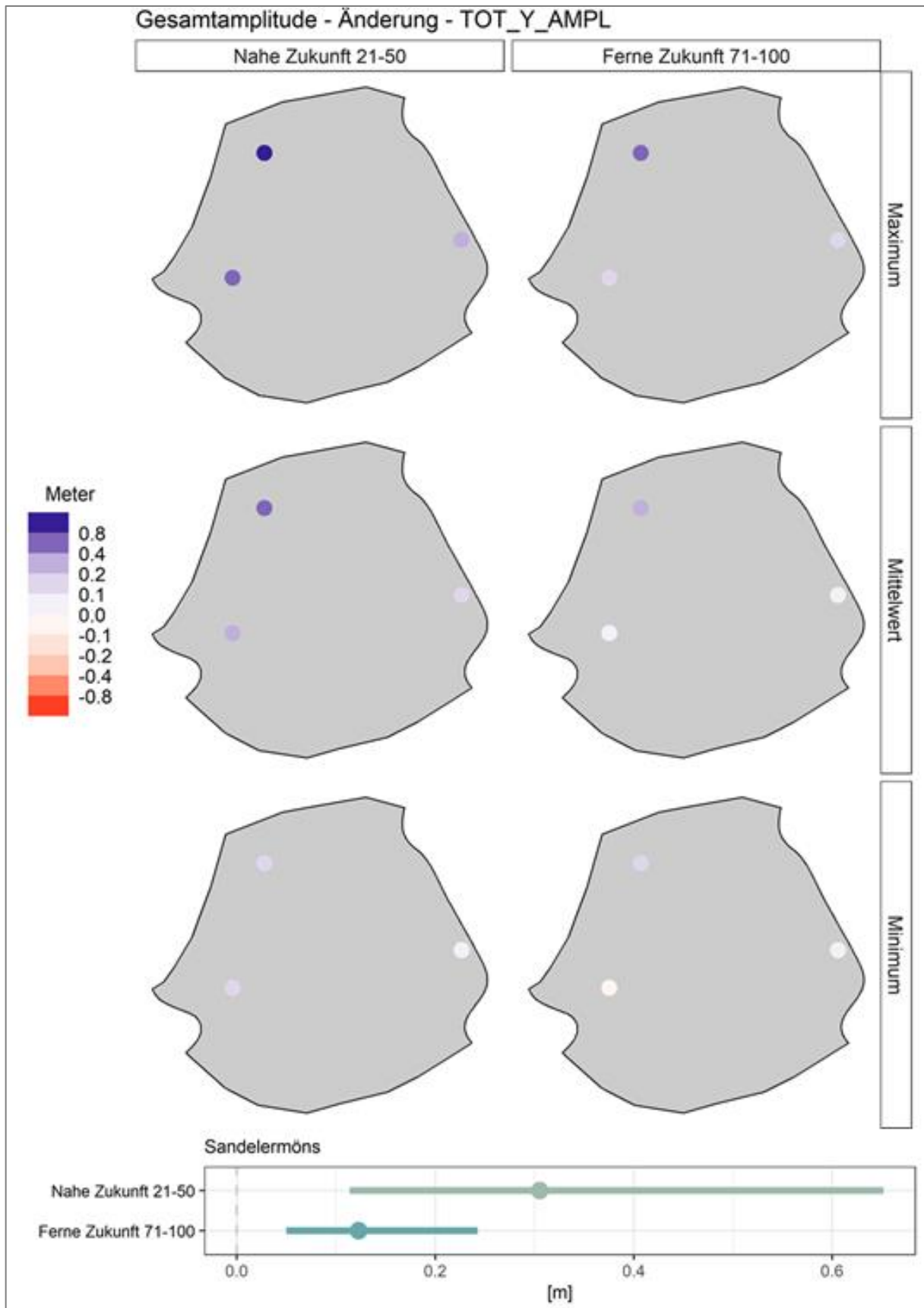


Abbildung 14.22: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Indikators Gesamtamplitude im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.



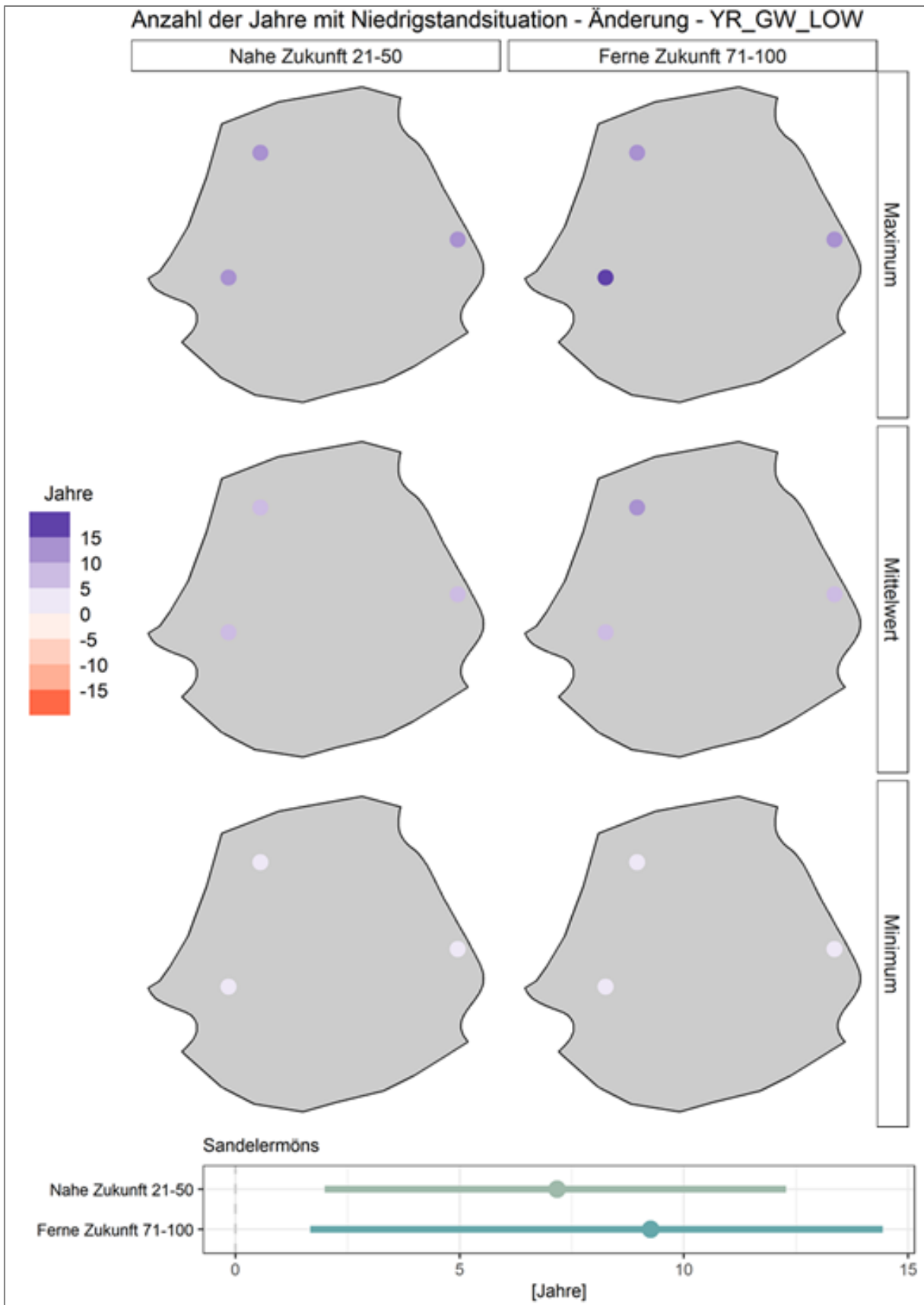


Abbildung 14.23: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Indikators Anzahl der Jahre mit Niedrigstandsituation im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

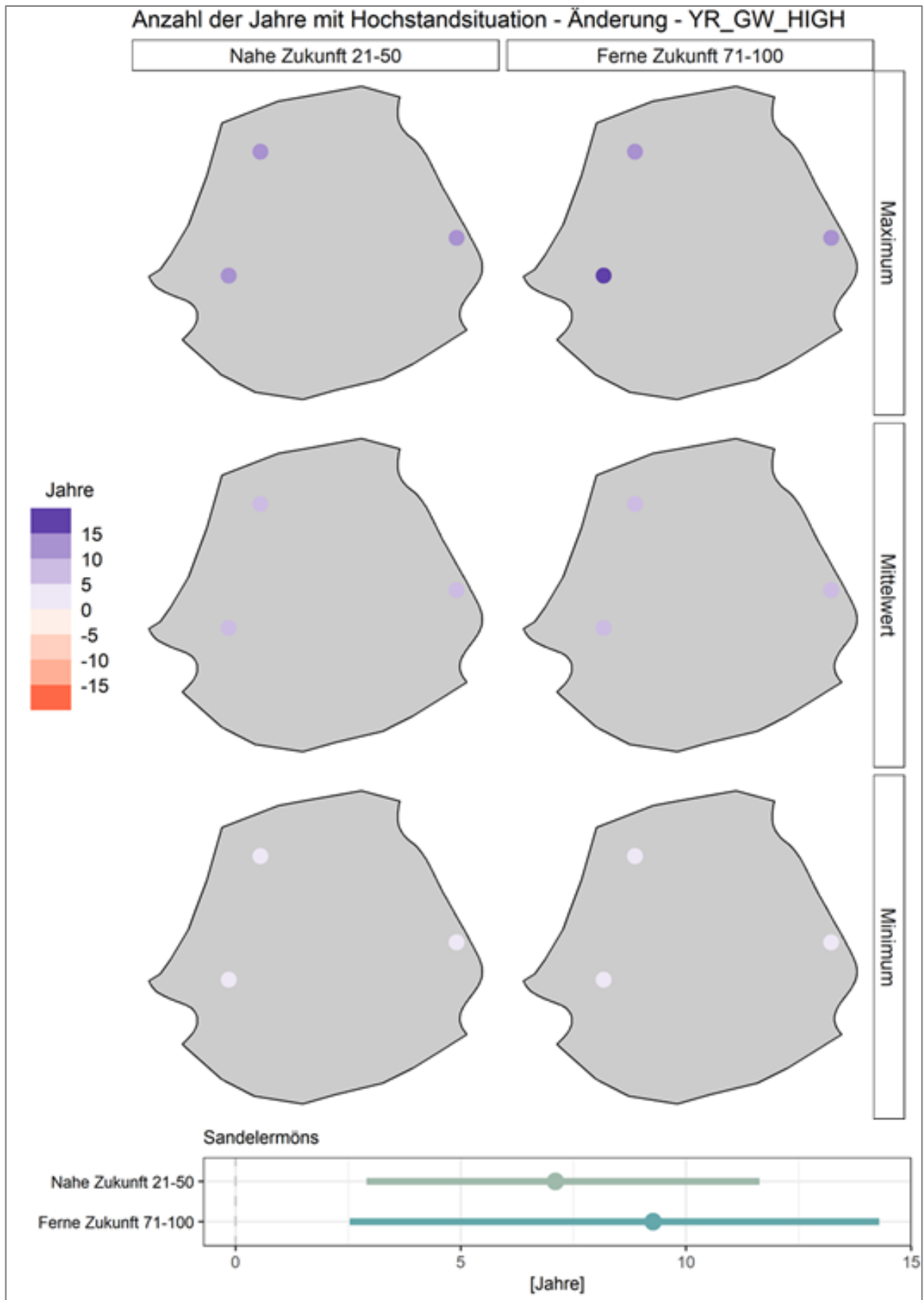


Abbildung 14.24: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Indikators Anzahl der Jahre mit Hochstandsituation im Modellgebiet Sandelermöns anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

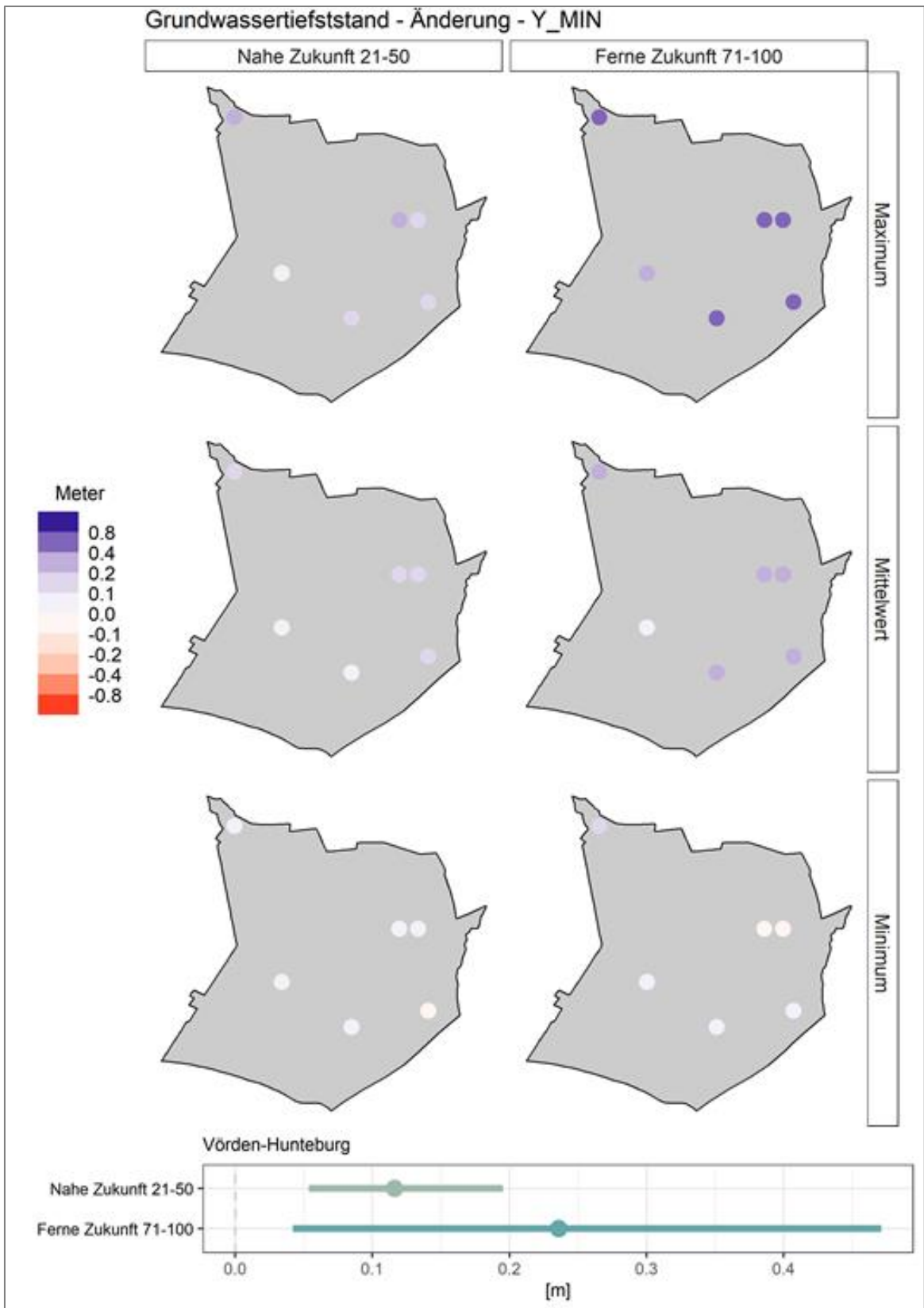


Abbildung 14.25: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Grundwassertiefststand im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

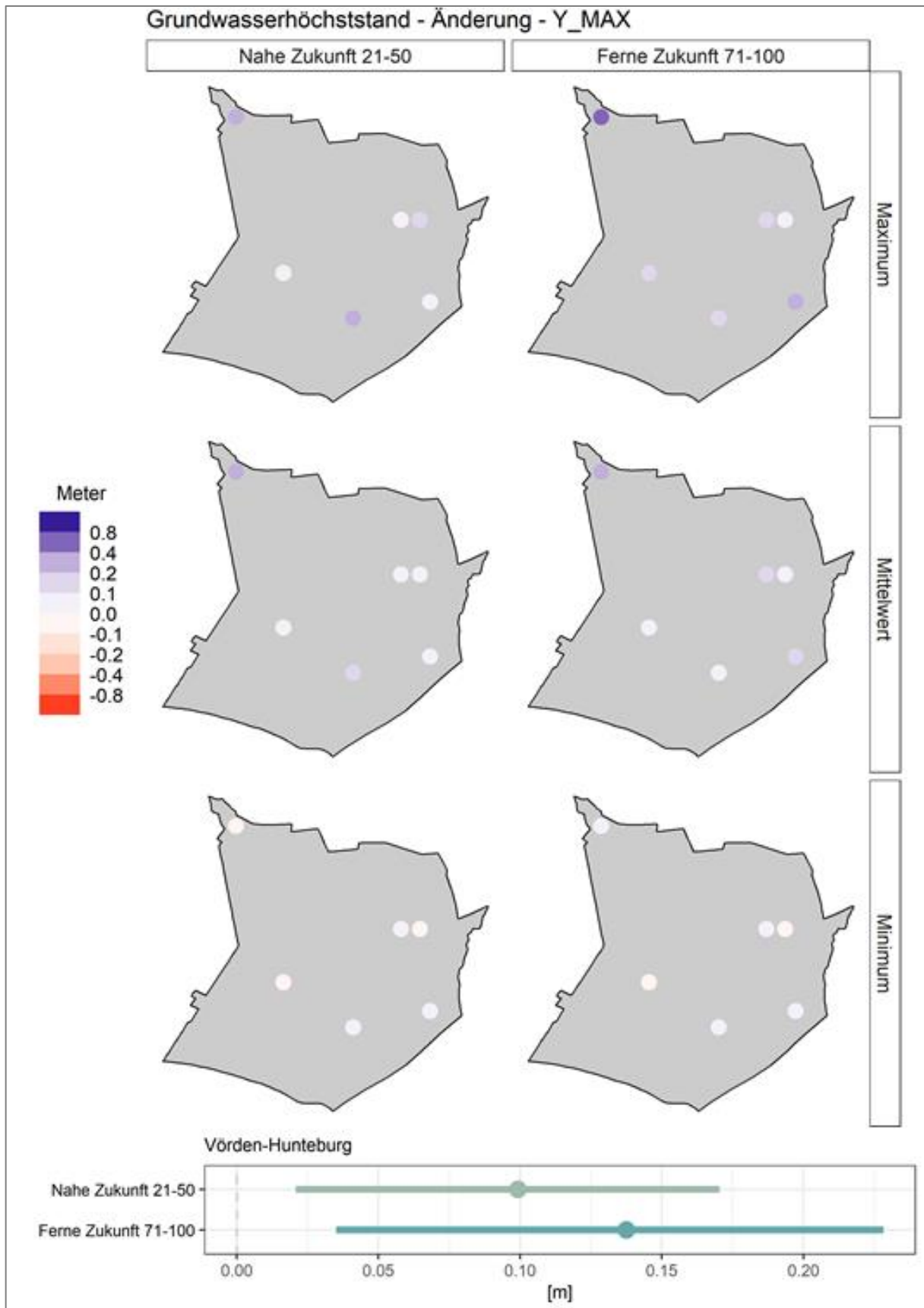


Abbildung 14.26: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindicators Grundwasserhöchststand im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

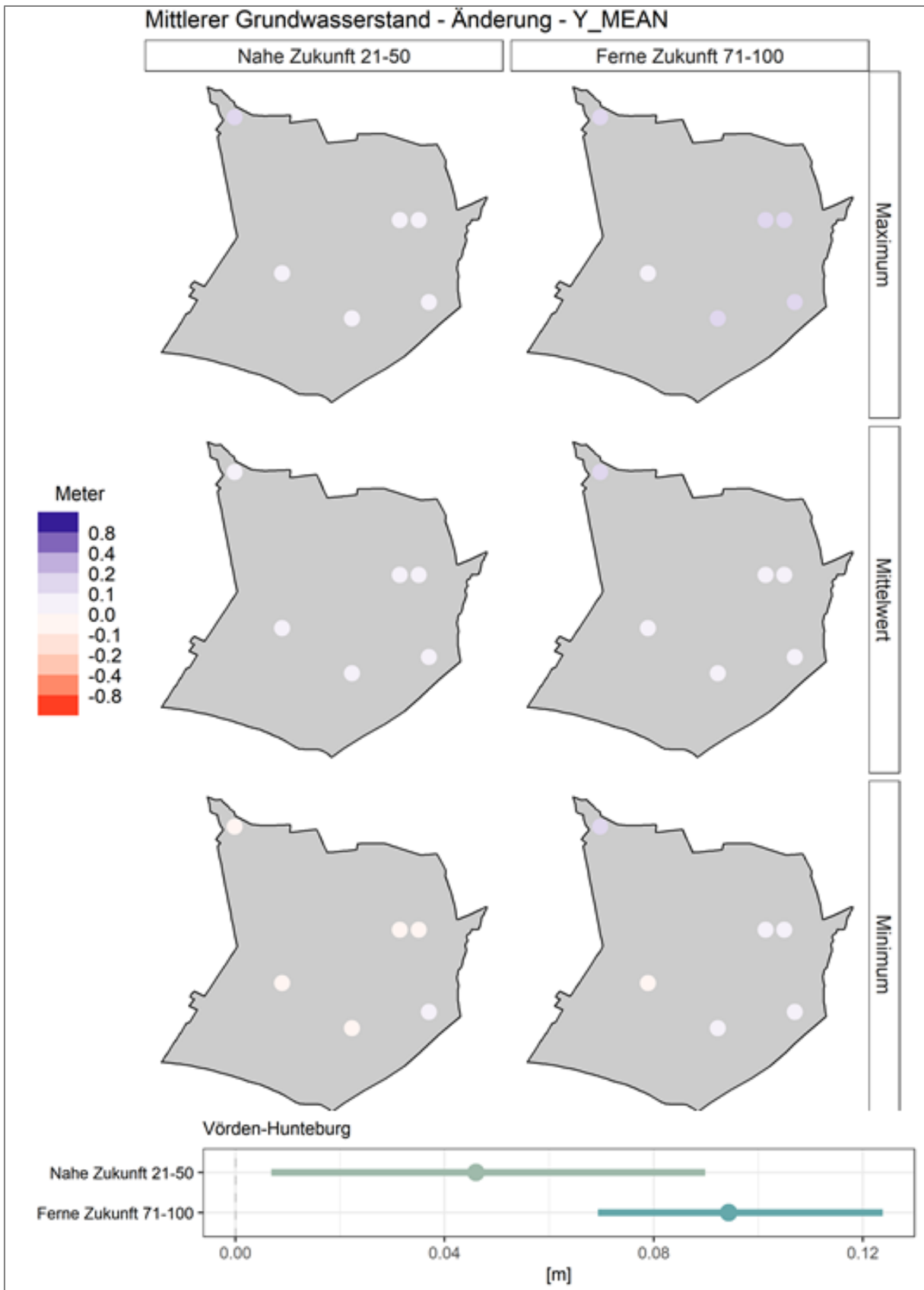


Abbildung 14.27: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Mittlerer Grundwasserstand im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

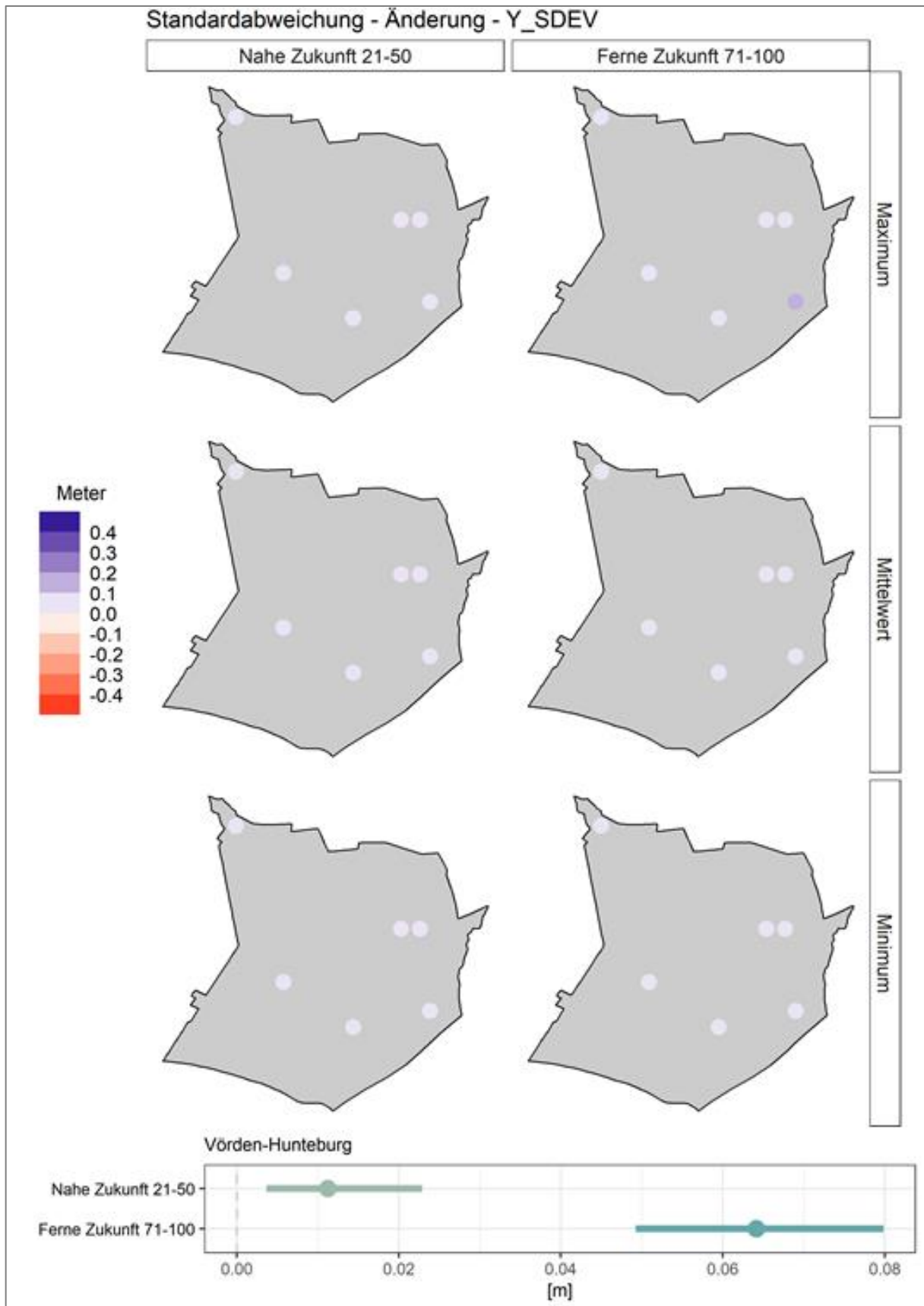


Abbildung 14.28: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Standardabweichung im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

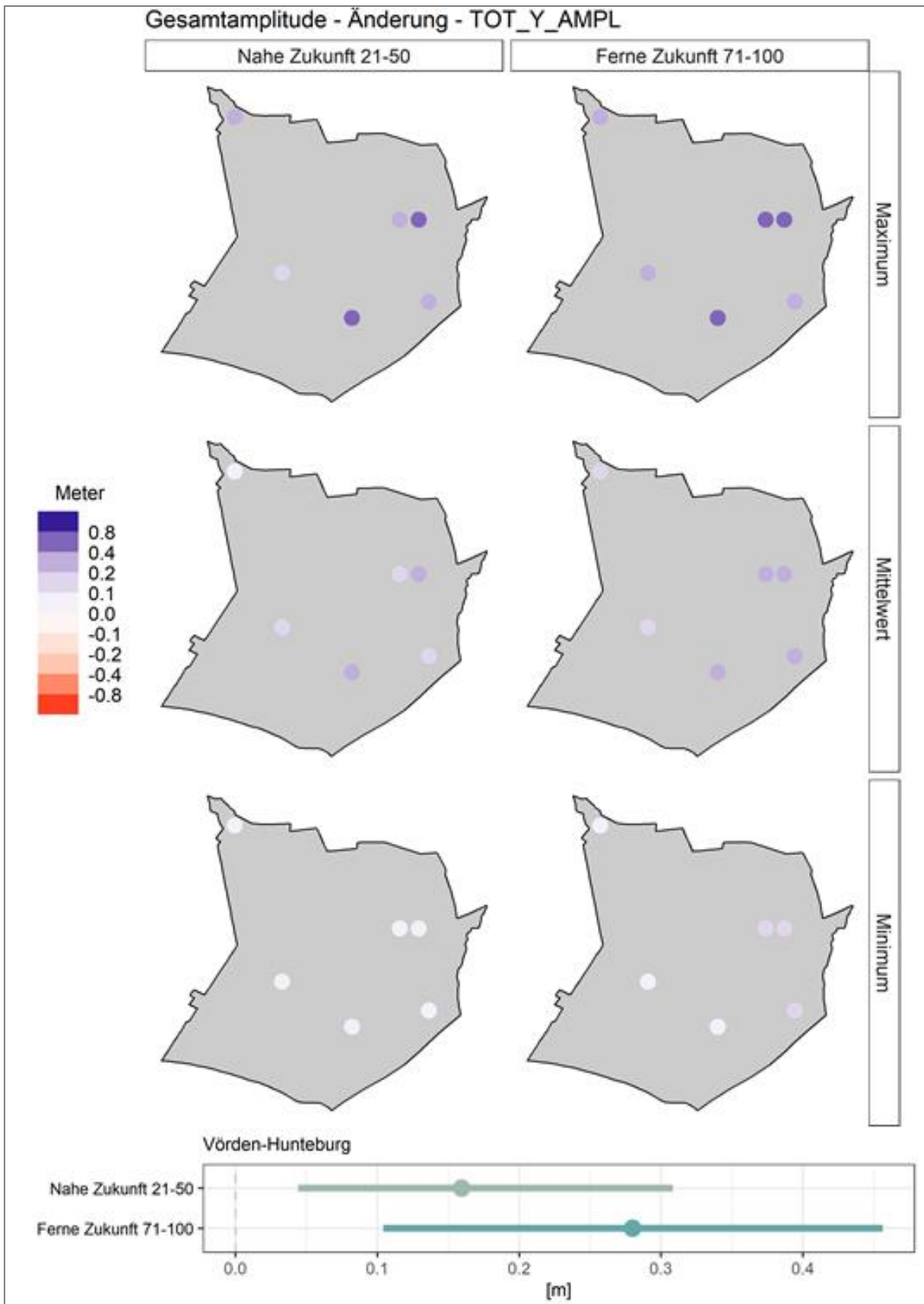


Abbildung 14.29: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Gesamtamplitude im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.

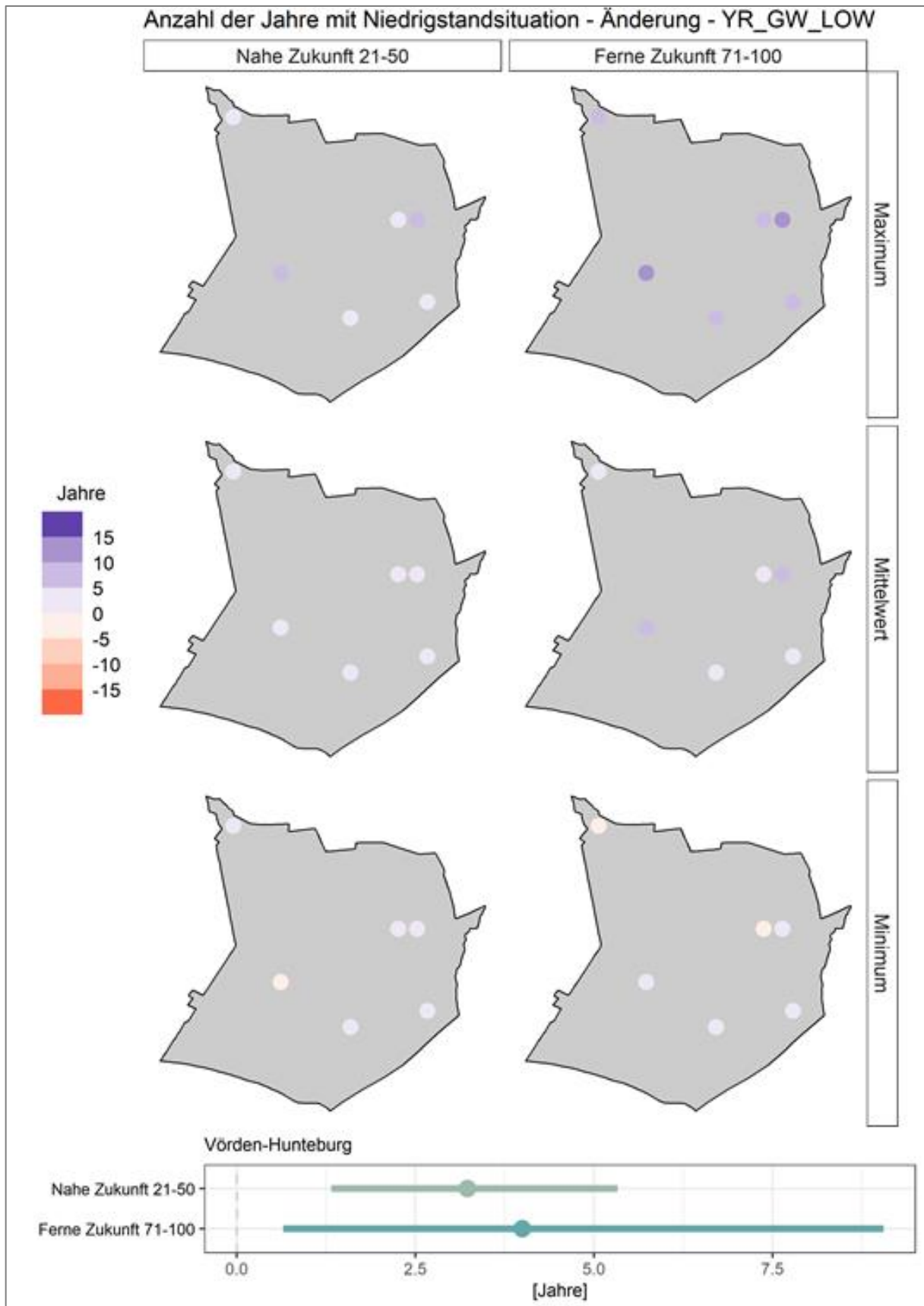


Abbildung 14.30: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Anzahl der Jahre mit Niedrigstandssituation im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.



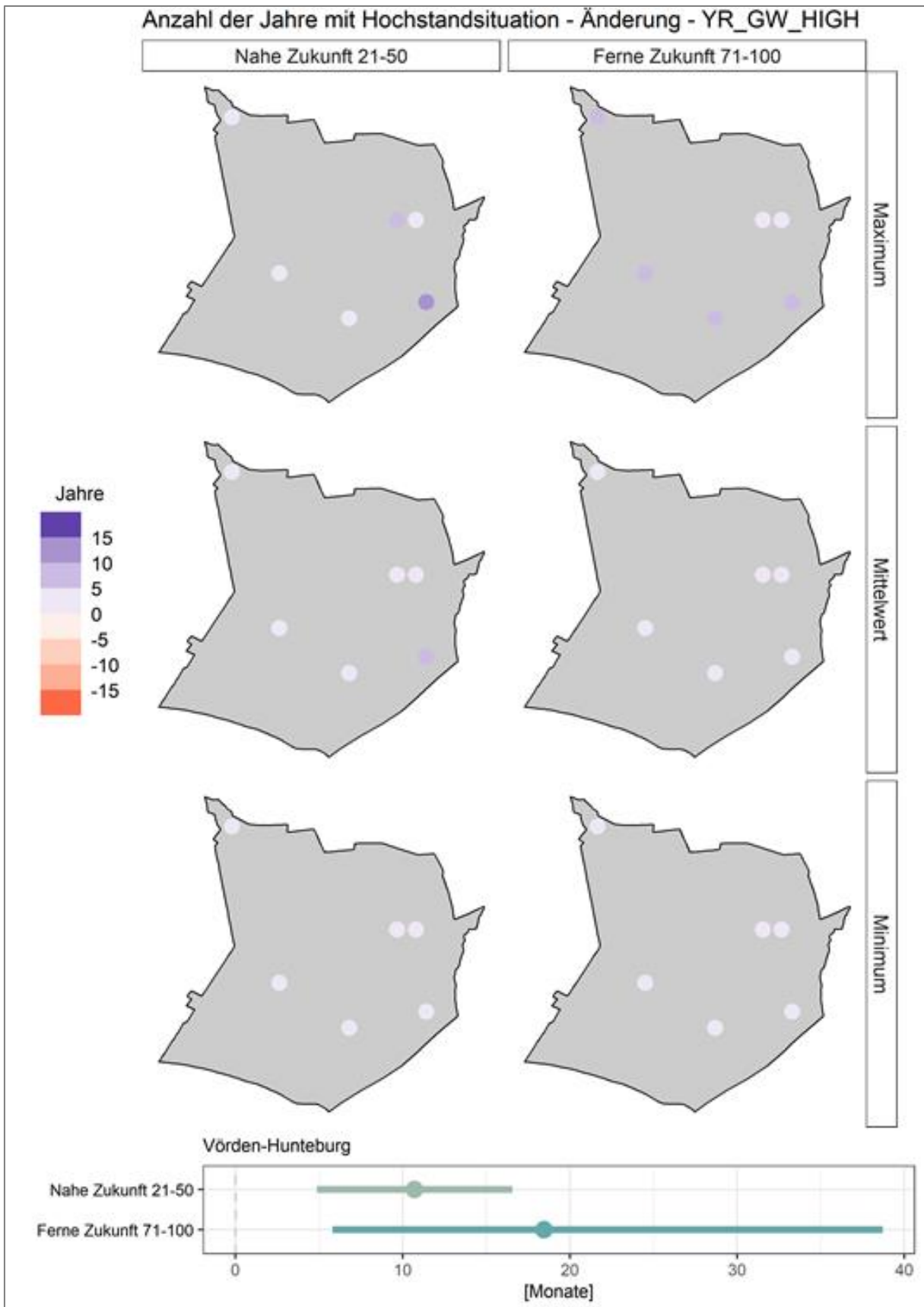


Abbildung 14.31: Oben: Kartendarstellung der projizierten Änderungen\* des Kernindikators Anzahl der Jahre mit Hochstandsituation im Modellgebiet Vörden-Hunteburg anhand der drei ausgewählten Klimaprojektionsläufe. Unten: Zusammenfassung der Bandbreite der Änderungen\* im Modellgebiet. \* Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2010.



## Impressum



### Herausgeber

Niedersächsischer Landesbetrieb für  
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz  
NLWKN Direktion  
Am Sportplatz 23  
26506 Norden  
Telefon: (04931) 947 – 24  
E-Mail: [pressestelle@nlwkn.niedersachsen.de](mailto:pressestelle@nlwkn.niedersachsen.de)  
[www.nlwkn.niedersachsen.de](http://www.nlwkn.niedersachsen.de)

### Titelbild

NLWKN

### Fotos

NLWKN

### Gestaltung

Niedersächsischer Landesbetrieb für  
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz,  
NLWKN Hannover-Hildesheim  
Franziska Johannes, Uwe Petry

### Auflage

100 Stück

### Erscheinungsdatum

Dezember 2023 (1. Auflage)

