



NLWKN.
Für Mensch und Umwelt.
Für Niedersachsen.

Globaler Klimawandel

Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland

Abschlussbericht des Projektes KliBiW Phase 6 –
Vertiefende Hochwasseranalysen



Niedersachsen

Projektbeteiligte

Herausgeber:



Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,
Küsten- und Naturschutz (NLWKN)

Autoren:

Betriebsstelle Hannover-Hildesheim:
Markus Anhalt, Corinna Forberg, Franziska Johannes, Uwe
Petry, Rebekka Schmid, Matthias Theobald

Unter Mitwirkung von:



Technische Universität Braunschweig,
Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässer-
schutz,
Leichtweiß-Institut für Wasserbau:
Tobias Langmann, Prof. Dr.-Ing. Günter Meon

Grafische Bearbeitung:

Svea Hinrichs, NLWKN Direktion, Pressestelle

Fotos, Abbildungen, Tabellen:

NLWKN

Titelbild:

Hans-Jürgen Zietz

Auflage:

150 Stück

Erscheinungsdatum:

1. Auflage: Dezember 2021

Bezug:

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,
Küsten- und Naturschutz (NLWKN)
Veröffentlichungen
Göttinger Chaussee 76
30453 Hannover



Kurzfassung

Im Projekt KliBiW werden die Folgen des Klimawandels für die Wasserwirtschaft im niedersächsischen Binnenland identifiziert und quantifiziert. 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 6 geht es um die Absicherung der bisherigen Ergebnisse (aus Phase 4) sowie um die vertiefende Analyse der Hochwasserverhältnisse an den Binnengewässern. Dieses Wissen wird im Zuge einer zielgerichteten Öffentlichkeitsarbeit bedarfsgerecht aufbereitet, um sowohl Entscheidungsträger als auch die breite Öffentlichkeit für das Thema zu sensibilisieren und Handlungsprozesse zu initiieren.

Die Analysen der Klima- und Abflussverhältnisse der Vergangenheit erfolgen niedersachsenweit auf Basis von Tageswerten von meteorologischen Stationen des Deutschen Wetterdienstes und Pegeldaten des NLWKN, der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung sowie der Harzwasserwerke GmbH. Die Ergebnisse zeigen, dass im Zeitraum von 1968 bis 2017 die Temperaturen deutlich gestiegen sind, bedingt vor allem durch einen sprunghaften Anstieg Ende der 1980er Jahre. Auch die Jahresniederschlagssummen haben zugenommen, wobei die Niederschlagsentwicklungen im Sommerhalbjahr relativ unverändert geblieben sind. Extreme Niederschläge haben hinsichtlich Menge und Häufigkeit ebenfalls zugenommen, dies vor allem im Sommerhalbjahr. Die Hochwasserverhältnisse zeigen im gleichen Zeitraum nur wenig (signifikante) Veränderungen. Dies betrifft sowohl die Scheitelabflüsse, als auch die Häufigkeit, Dauer und Volumen von Hochwasserereignissen. Erst seit Ende der 1980er Jahre zeigen sich regionale Zunahmen der Scheitelabflüsse im Sommerhalbjahr sowie Abnahmen im Winterhalbjahr, die sich auch in entsprechenden Veränderungen der Wellenvolumina bemerkbar machen.

Die Betrachtung der zukünftigen Entwicklungen basiert auf einem Szenario, bei dem so gut wie keine Maßnahmen zum Klimaschutz umgesetzt werden und die weltweit anthropogen bedingten Emissionen bzw. Konzentrationen von Treibhausgasen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts weiter zunehmen (Szenario RCP8.5). Diese Daten dienen als Antrieb für ein Ensemble von acht regionalen Klimamodellen, die die Bandbreite der möglichen zukünftigen klimatischen Entwicklungen auf Basis von Tageswerten abbilden (sog. Kern-Ensemble des Bund-Länder-Fachgesprächs). Die zukünftigen Abflussverhältnisse werden anhand dieses Ensembles für ausgewählte Gewässer (in Anlehnung an die Risikogewässer entsprechend der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie) in Niedersachsen mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells PANTA RHEI der Technischen Universität Braunschweig simuliert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperaturen weiterhin kontinuierlich ansteigen werden. Die Niederschlagsmengen nehmen im Winterhalbjahr zu, während die Entwicklungen im Sommerhalbjahr nicht eindeutig sind. Extreme Niederschläge werden zunehmen, vor allem im Winterhalbjahr. Gleichzeitig verkürzt sich die Dauer von Niederschlagsereignissen im Sommerhalbjahr. Die Simulation mit dem Wasserhaushaltsmodell zeigt, dass sich die Hochwasserverhältnisse künftig verschärfen werden, regional bereits zur Mitte des Jahrhunderts. Dies betrifft sowohl die Abflussscheitel (und damit die Wellenvolumina) als auch die Häufigkeit der Ereignisse und gilt auch für das Sommerhalbjahr. Die Dauer von Hochwasserereignissen nimmt regional leicht zu. Die Zunahmen der Scheitel von Extremereignissen (HQ₂₀, HQ₁₀₀) fallen insgesamt tendenziell größer aus als für „kleinere“ Hochwässer (MHQ, HQ₅). Damit steigt auch die Gefahr von Hochwasserschäden bei entsprechenden Ereignissen erheblich an. Dies macht die Notwendigkeit von vorsorgenden Anpassungsstrategien umso wichtiger.

Die Erkenntnisse zum Klimawandel und seinen Folgen für die Wasserwirtschaft in Niedersachsen sind in der neuen Rubrik „Klimawandel kompakt“ auf den Internetseiten des NLWKN zusammengestellt. Hier werden verschiedene Aspekte des Themas beleuchtet und allgemein verständlich präsentiert. Darüber hinaus liegen die Erkenntnisse auch als Wanderausstellung (Titel „KlimaEinfluss“) vor, die z.B. von Kommunen oder Bildungseinrichtungen ausgeliehen werden kann, um alle relevanten Akteure vor Ort über das Thema zu informieren und zu sensibilisieren. Zu guter Letzt ermöglicht eine Kooperation des NLWKN mit der Kommunalen UmweltAktion (UAN) sowie mit der Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen (KEAN) den Aufbau eines Netzwerkes, welches eine umfassende und fundierte Wissensbasis für alle beteiligten Akteure schafft und die Weitergabe von wesentlichen Informationen verbessert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Projektgrundlagen	8
2.1	Organisation und Zielsetzung	8
2.2	Untersuchungsgebiet	9
2.3	Klima- und Abflussdaten	9
2.4	Vorgehensweise	11
3	Betrachtung der klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit bis heute	12
3.1	Datenbasis	12
3.2	Methodik	12
3.3	Ergebnisse der Trendanalysen	12
3.4	Zusammenfassung	13
4	Betrachtung der Abflussverhältnisse der Vergangenheit bis heute	18
4.1	Datenbasis	18
4.2	Methodik	19
4.3	Ergebnisse der Trendanalysen	19
4.4	Ergebnisse der Saisonalitätsanalysen	21
4.5	Zusammenfassung	21
5	Das Klimamodell-Ensemble von KliBiW	21
5.1	Globale und regionale Klimaprojektionen	21
5.2	Ensemble-Mitglieder in KliBiW	23
5.3	Aufbereitung der Klimamodelldaten	24
5.4	Evaluierung der Klimamodelldaten anhand von Beobachtungsdaten	24
6	Analysen der möglichen klimatischen Verhältnisse der Zukunft	26
6.1	Datenbasis	26
6.2	Methodik	26
6.3	Ergebnisse	27
6.4	Zusammenfassung	34
6.5	Vergleich der Ergebnisse mit den Erkenntnissen aus KliBiW Phase 4	36
7	Analyse der möglichen hydrologischen Verhältnisse der Zukunft	39
7.1	Modellierung veränderter zukünftiger Abflussverhältnisse mit dem hydrologischen Modellsystem PANTA RHEI (TU BS)	39
7.2	Modellbeschreibung	39
7.3	Relevante hydrologische Prozesse für die Wasserhaushaltssimulation	40
7.4	Modellaufbau der untersuchten Einzugsgebiete	42
7.5	Kalibrierung und Validierung	42
7.6	Simulation ausgewählter Abflusskenngrößen	45
7.6.1	Entwicklung für Jahresmittelwerte	45
7.6.2	Entwicklung der Quartals- und Monatswerte	49
7.6.3	Entwicklung der Hochwasserkenngrößen	49
7.6.3.1	Scheitelabflüsse	49
7.6.3.2	Bodenfeuchte	60
7.6.3.3	Hochwasserhäufigkeit	62
7.6.3.4	Hochwasserdauer	65
7.6.3.5	Hochwasservolumen	68
7.6.3.6	Hochwassersaisonalität	70
7.7	Vergleich mit Ergebnissen aus KliBiW Phase 4	73
8	Schlussfolgerungen	75
9	Öffentlichkeitsarbeit	77
10	Glossar	81
11	Literaturverzeichnis	84
12	Anhang	86

Einleitung

Die vom Menschen verursachte Klimaerhitzung schreitet unaufhörlich voran. Seit Beginn der Wetteraufzeichnungen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ist die globale Mitteltemperatur bis heute bereits deutlich über +1 °C angestiegen. In Deutschland wurden 9 der 10 wärmsten Jahre im 21. Jahrhundert gemessen. 2020 war mit einer Durchschnittstemperatur von 10,9 °C das wärmste, jemals beobachtete Jahr in Niedersachsen, dicht gefolgt von 2014, 2018 und 2019. Als Konsequenz dieser dramatischen Entwicklungen hat sich das Wettergeschehen nicht nur in Deutschland, sondern auch in Europa verändert. Phänomene wie extreme Niederschläge oder sommerliche Trockenphasen tendieren in den letzten Jahrzehnten dazu, intensiver auszufallen und länger anzudauern. Gleichzeitig ist auch der Meeresspiegel im letzten Jahrhundert im globalen Mittel um rund 20-30 cm angestiegen. Dies hat entsprechende Folgen für alle Themenfelder der Wasserwirtschaft, wie z.B. den Hochwasser- und Küstenschutz, das Grundwasser- und Niedrigwassermanagement, die Starkregenvorsorge oder die Bewirtschaftung von Wasserressourcen.

Wie das Klima der Zukunft aussehen könnte zeigen Projektionen, die im Zuge des 5. Sachstandsberichtes des Weltklimarates IPCC (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen der Vereinten Nationen) durchgeführt wurden. Als Basis dienen sozioökonomische Szenarien, die in verschiedenen Verläufen von globalen Treibhausgas-Emissionen bzw. Konzentrationen resultieren. Mit Hilfe komplexer Computermodelle, welche die bekannten Prozesse und Wechselwirkungen im Klimasystem vereinfacht abbilden, ergeben sich aus diesen Szenarien mögliche Entwicklungen des zukünftigen Klimas. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die aktuellen Veränderungen, je nach Umsetzungszeitpunkt und Umfang von Maßnahmen zum Klimaschutz, bis zum Ende des Jahrhunderts bestenfalls nur noch geringfügig fortsetzen, im schlimmsten Fall sogar noch verstärken werden.

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

Im Projekt KliBiW arbeitet der NLWKN seit zwölf Jahren in enger Kooperation mit Partnern aus der Wissenschaft und der fachlichen Praxis. Das Ziel ist die Identifikation und Quantifizierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Niedersachsen. In den zurückliegenden Projektphasen wurden hierzu bereits unterschiedliche räumliche und thematische Schwerpunkte betrachtet (vgl. NLWKN, 2017; NLWKN 2019). Allerdings ist die Klimaforschung ein sehr dynamisches Themenfeld. Neue Erkenntnisse über das Klimasystem werden regelmäßig in immer leistungsfähigeren Computermodellen umgesetzt. Dadurch können diese Modelle verlässlichere Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas liefern. Dies kommt auch in den regelmäßigen Veröffentlichungen des IPCC zum Ausdruck, die den jeweils aktuellen Stand der Klimaforschung zusammenfassen. Gleichzeitig gibt es einen großen Informationsbedarf auf Seiten der Entscheidungsträger von Politik und Kommunen, um nachhaltige Strategien zu entwickeln, die Systeme und Gesellschaft auf die möglichen Veränderungen vorbereiten.

Um diesen Entwicklungen gerecht zu werden, wurden in der aktuellen Projektphase 6 von KliBiW nicht nur die neuesten Daten der Klimaforschung für Deutschland verwendet, um die bisherigen Ergebnisse abzusichern, sondern es wurden auch weitergehende Analysen der Hochwasserverhältnisse durchgeführt. Die gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse wurden zielgruppengerecht für die Akteure in Politik und Kommunen sowie für die breite Öffentlichkeit aufbereitet und verständlich präsentiert.

2 Projektgrundlagen

2.1 Organisation und Zielsetzung

Das Projekt KliBiW (Globaler Klimawandel – wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland) wurde 2008 ins Leben gerufen. Es beschäftigt sich mit der Abschätzung der Folgen des Klimawandels für die Wasserwirtschaft im niedersächsischen Binnenland. Dabei wurden bisher sechs Projektphasen durchlaufen, die unterschiedliche räumliche und thematische Schwerpunkte behandelt haben (u.a. NLWKN 2017, 2019). Gefördert wird das Projekt durch das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU). Die Leitung und Koordination obliegt dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Betriebsstelle Hildesheim. Projektpartner in dieser 6. Projektphase ist das Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abt. Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz, der Technischen Universität Braunschweig (LWI). Die Abstimmung grundlegender Entscheidungen zwischen den Projektpartnern erfolgte durch eine Lenkungsgruppe, in der neben dem NLWKN und dem LWI auch das MU vertreten war. Der fachliche Austausch erfolgte regelmäßig auf Ebene der Projektbearbeiter von

NLWKN und LWI. Der Fokus in dieser Projektphase lag in der erweiterten Analyse der Hochwasserverhältnisse, die bereits in der Phase 2 und der Phase 4 mit Schwerpunkt auf den Abflussscheiteln betrachtet wurden. Auf Grundlage der neuesten Entwicklungen in der Klimaforschung sowie der weiteren Bedarfe, die im Zuge von Diskussionsprozessen mit der Öffentlichkeit und Politik zur Sprache kamen, erschien eine Vertiefung der bisherigen Arbeiten sinnvoll und notwendig. Dementsprechend wurden nun folgende Zielsetzungen verfolgt:

- Absicherung der bisherigen Erkenntnisse zu den Hochwasserverhältnissen in Niedersachsen auf Basis eines repräsentativen Klimamodell-Ensembles für Deutschland
- Vertiefung der Analysen der Hochwasserverhältnisse in Bezug auf weitere wichtige Kenngrößen für planerische und politische Entscheidungsprozesse
- Transfer der wissenschaftlichen Ergebnisse in Politik und Öffentlichkeit durch zielgruppengerechte Kommunikation

Abbildung 2-1 gibt einen Überblick über die Arbeitsschwerpunkte der beteiligten Projektpartner in Phase 6.



Abbildung 2-1: Projektpartner mit Arbeitsschwerpunkten in KliBiW 6

2.2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet von KliBiW Phase 6 umfasst die Landesfläche von Niedersachsen mit einer Größe von rund 47.600 km². Diese gliedert sich nach von Drachenfels (2010) in verschiedene naturräumliche Einheiten (Abbildung 2-2). Grob lässt sich Niedersachsen demnach in zwei Bereiche unterteilen: zum einen in das relativ ebene Tief- bzw. Flachland, bestehend vor allem aus Watt und Marschen, der Geest, der Heide und den Börden, zum anderen in die reliefreicheren Ausläufer der Mittelgebirge, bestehend aus dem Berg- und Hügelland sowie dem Harz.

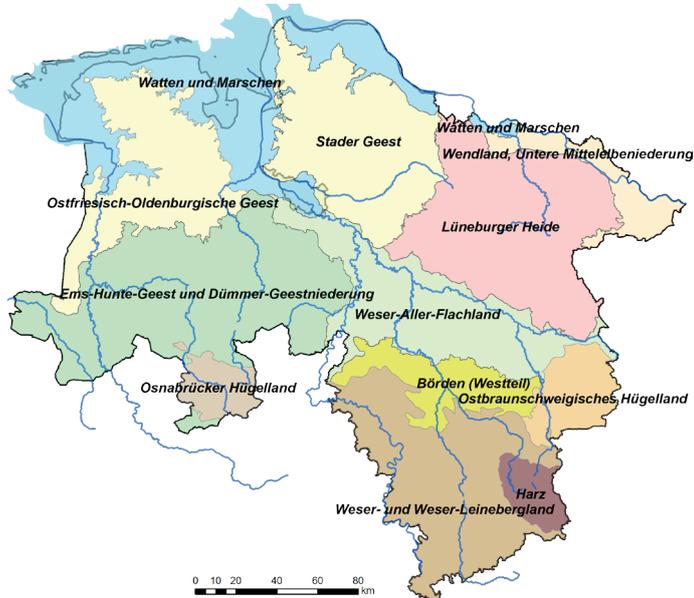


Abbildung 2-2: Naturräumliche Gliederung Niedersachsens

Für diesen gesamten Raum wurden die klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit und der möglichen Zukunft betrachtet. Die Analyse der beobachteten Abflüsse erfolgte für weite Teile des Landes, mit Ausnahme der tidebeeinflussten Gebiete sowie der Elbe, Weser und Ems. Die Simulation der zukünftigen Abflüsse fand für verschiedene Einzugsgebiete statt, die im Rahmen der vorläufigen Bewertung nach der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (2007/60/EG) sog. Risikogewässer innerhalb Niedersachsens charakterisieren. Hierzu zählen die Vechte und Hase als Vorfluter der Ems, die Hunte, Große Aue, Wümme sowie Aller, Leine und Oker als Vorfluter der Weser, und die Ilmenau als Vorfluter zur Elbe (vgl. Abbildung 2-3 und Tabelle 2-1).

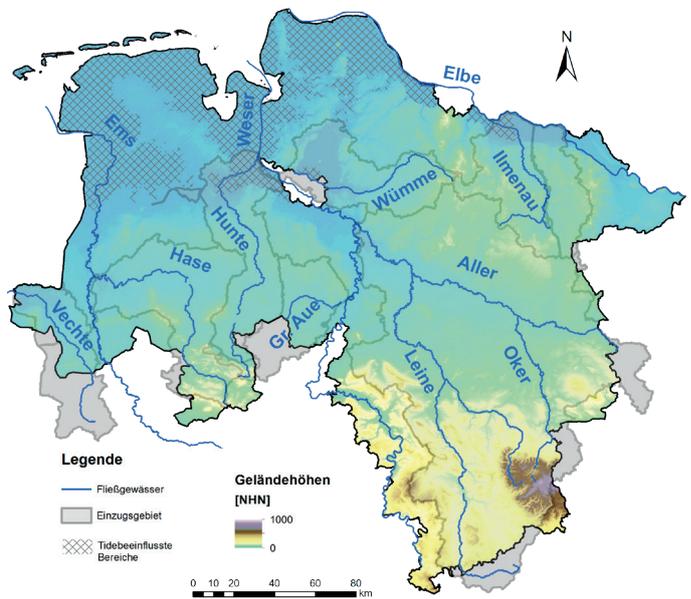


Abbildung 2-3: Untersuchungsgebiet von KliBiW 6

Tabelle 2-1: Betrachtete Einzugsgebiete in KliBiW 6

Name des Einzugsgebietes	Größe des Einzugsgebietes [km ²]
Aller mit Leine und Oker	7.382
Große Aue	1.522
Hase	3.115
Hunte	2.704
Ilmenau	2.850
Vechte *)	1.957
Wümme	2.187

*) innerhalb Deutschlands

2.3 Klima- und Abflussdaten

Für die Analysen der klimatischen und hydrologischen Verhältnisse in der Vergangenheit und der Zukunft wurde eine Vielzahl von Daten verwendet. Für die Vergangenheit standen Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowohl in Form von punktuellen Stationsdaten als auch in Form von flächenhaften Rasterdaten (HYRAS) zur Verfügung. Diese wurden ergänzt durch regionalisierte Klimabeobachtungsdaten des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Leibniz Universität Hannover (Haberlandt et al., 2015). Die Abflussverhältnisse der Vergangenheit wurden durch Pegelaufzeichnungen des NLWKN, der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) sowie der Harzwasserwerke GmbH (HWW) abgebildet. Die zukünftigen klimatischen Bedingungen wurden auf Basis eines Ensembles von acht regionalen Klimamodellen ermittelt, deren Daten aus den Projekten EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014) und ReKliEs-De (Hübner et al., 2018) stammen und als Raster vorlagen. Weitere Informationen hierzu sind in Kapitel 5 zu finden. Grundlegende Informationen zu allen genannten Datensätzen sind Tabelle 2-2 zu entnehmen.

Tabelle 2-2: Datenbasis der in KliBiW 6 verwendeten Zeitreihen

Datentyp	Auflösung räumlich	Auflösung zeitlich	Zeitraum (maximal)	Herkunft *)
Stationsmessdaten (Klima)				
Niederschlag	Gebietsmittel Nds, 922 Stationen (davon 592 in Nds)	Tageswerte	1881-2019, 1951-2019	DWD
Temperatur (Min., Mittel, Max.)	Gebietsmittel Nds, 165 Stationen (davon 107 in Nds)	Tageswerte	1881-2019, 1951-2019	DWD
Luftfeuchte	165 Stationen (davon 107 in Nds)	Tageswerte	1951-2019	DWD
Windgeschwindigkeit	165 Stationen (davon 107 in Nds)	Tageswerte	1951-2019	DWD
Sonnenscheindauer	165 Stationen (davon 107 in Nds)	Tageswerte	1951-2019	DWD
Rastermessdaten (Klima)				
Niederschlag	5x5 km Raster	Tageswerte	1951-2015	HYRAS (DWD)
Temperatur (Min., Mittel, Max.)	5x5 km Raster	Tageswerte	1951-2015	HYRAS (DWD)
Luftfeuchte	5x5 km Raster	Tageswerte	1951-2015	HYRAS (DWD)
Niederschlag	1x1 km Raster	Tageswerte	1951-2017	IWW (LUH)
Temperatur (Min., Mittel, Max.)	1x1 km Raster	Tageswerte	1951-2017	IWW (LUH)
Luftfeuchte	1x1 km Raster	Tageswerte	1951-2017	IWW (LUH)
Windgeschwindigkeit	1x1 km Raster	Tageswerte	1951-2017	IWW (LUH)
Sonnenscheindauer	1x1 km Raster	Tageswerte	1951-2017	IWW (LUH)
Rastermodelldaten (Klima)				
Niederschlag	5x5 km bzw. 12,5x12,5 km Raster	Tageswerte	1951-2100	EURO-CORDEX, ReKliEs-De (DWD)
Temperatur (Min., Mittel, Max.)	5x5 km bzw. 12,5x12,5 km Raster	Tageswerte	1951-2100	EURO-CORDEX, ReKliEs-De (DWD)
Luftfeuchte	5x5 km bzw. 12,5x12,5 km Raster	Tageswerte	1951-2100	EURO-CORDEX, ReKliEs-De (DWD)
Windgeschwindigkeit	5x5 km bzw. 12,5x12,5 km Raster	Tageswerte	1951-2100	EURO-CORDEX, ReKliEs-De (DWD)
Sonnenscheindauer bzw. Globalstrahlung	5x5 km bzw. 12,5x12,5 km Raster	Tageswerte	1951-2100	EURO-CORDEX, ReKliEs-De (DWD)
Abflussmessdaten				
Pegeldaten	344 Pegel	Tageswerte	1951-2017	NLWKN, WSV, HWW

*) *HYRAS: Hydrometeorologische Rasterdatensätze*
EURO-CORDEX: Coordinated Downscaling Experiment for Europe
ReKliEs-De: Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland

2.4 Vorgehensweise

Die Arbeiten in der Phase 6 von KliBiW wurden in verschiedenen, z.T. aufeinander aufbauenden Teilprojekten durchgeführt (vgl. Abbildung 2-4). Zunächst erfolgte die Analyse der beobachteten Klima- und Abflussverhältnisse von der Vergangenheit bis heute. Hierzu wurden entsprechende Messdaten von Klimastationen und Abflusspegeln hinsichtlich ihres Trendverhaltens untersucht. Die Klimabeobachtungsdaten lagen zudem als regionalisierte Raster vor, die zusammen mit den gemessenen Abflussdaten der Pegel zur Kalibrierung und Validierung eines Wasserhaushaltsmodells (PANTA RHEI) genutzt wurden.

Die Einschätzung der zukünftigen Verhältnisse basierte auf Daten eines Ensembles von acht regionalen Klimamodellen, die die klimatischen Entwicklungen auf Grundlage eines Treibhausgas-Szenarios bis zum Jahr 2100 abbilden. Die Veränderungen wurden in Bezug auf einen Referenzzeitraum (1971-2000) für zwei Zukunftszeiträume (nahe Zukunft: 2021-2050, ferne Zukunft: 2071-2100) modellspezifisch ermittelt und als absolute bzw. relative Änderungssignale dargestellt. Die Klimamodelldaten dienten außerdem als Eingangsdaten für das Wasserhaushaltsmodell. Somit konnten die resultierenden Abflüsse für die Zukunft an ausgewählten Referenzpegeln simuliert und analysiert werden. Alle Berechnungen und Auswertungen erfolgten auf Tageswertbasis.

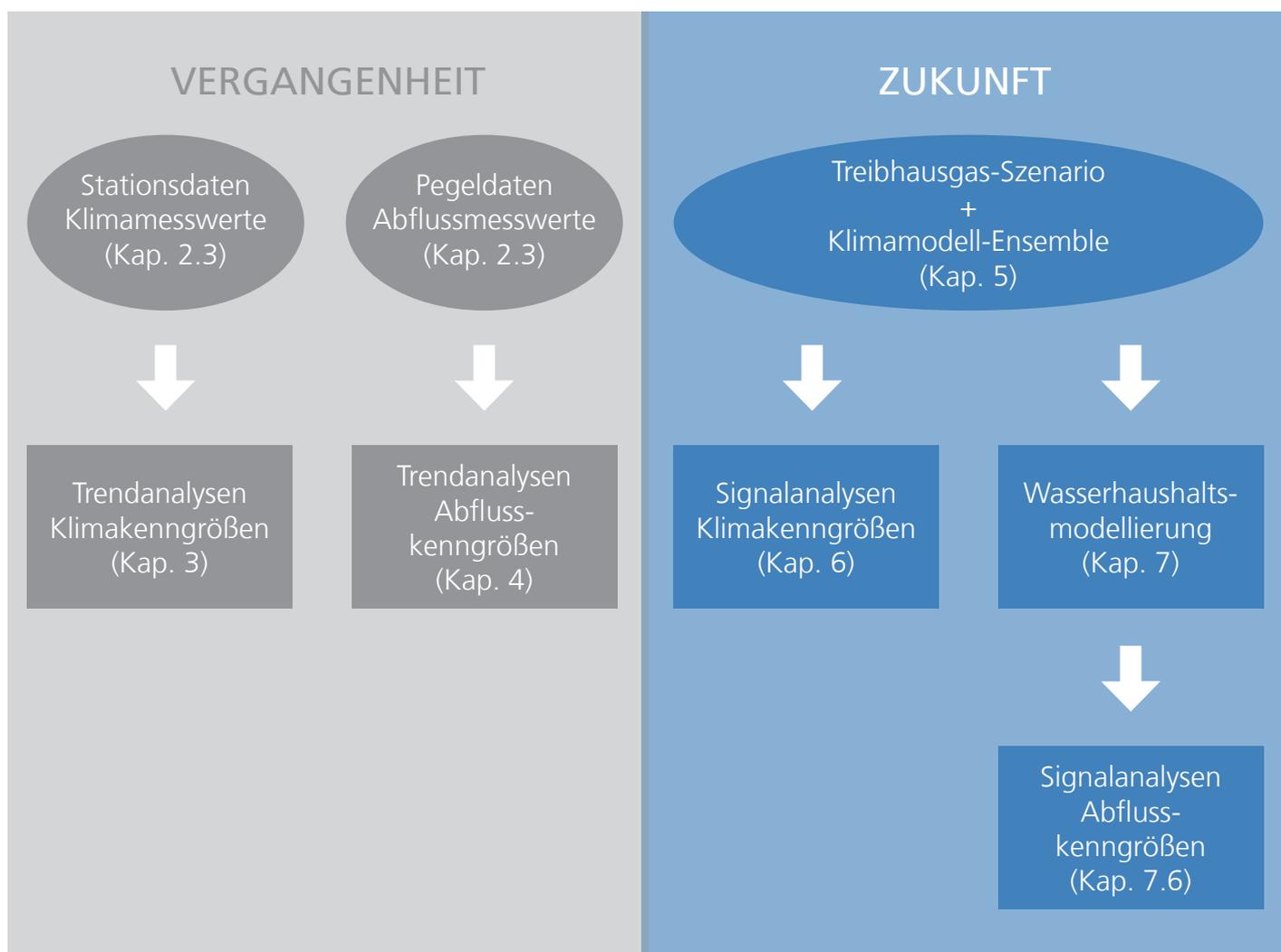


Abbildung 2-4: Arbeitsschritte der durchgeführten Analysen in KliBiW 6

3 Betrachtung der klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit bis heute

3.1 Datenbasis

Die Analysen der klimatischen Verhältnisse in der Vergangenheit erfolgten im Wesentlichen auf Basis von Stationsdaten mit Tageswerten ohne Richter-Korrektur (Richter, 1995) des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die Auswahl der Stationen erfolgte für die Landesfläche von Niedersachsen, ergänzt um einen Pufferstreifen von rund 20 km, der u.a. die nach Niedersachsen entwässernden Flüsse der betrachteten Risikogewässer mit ihren Einzugsgebieten beinhaltet. Insgesamt umfasste das entsprechende Gebiet 165 Stationen mit Klimadaten und 922 Stationen mit Niederschlagsdaten. Im Zuge der Analysen der Stationsdaten wurden verschiedene Zeiträume betrachtet. Zum einen ein maximaler Abschnitt von 1951-2019, zum anderen ein Abschnitt von 1968-2017, der mit den späteren Analysen der beobachteten Abflussverhältnisse konform geht (vgl. Kapitel 4.1). Die zu analysierenden Zeitreihen durften einen Fehlwertanteil von maximal 5% aufweisen. Daraus ergaben sich für den ersten bzw. zweiten Betrachtungszeitraum 18 bzw. 24 Klimastationen und 143 bzw. 169 Niederschlagsstationen, die untersucht werden konnten. Ergänzend dazu wurden auch Gebietsmittelzeitreihen für Niedersachsen vom DWD herangezogen, die für den Zeitraum von 1881-2019 zur Verfügung standen.

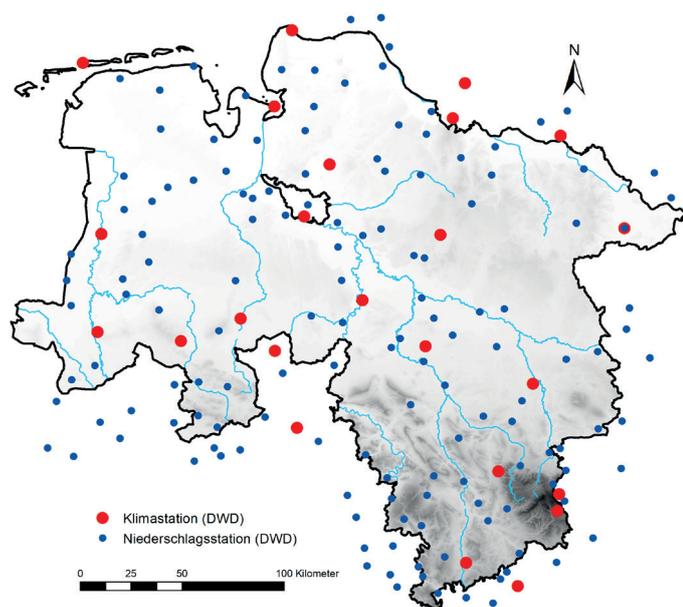


Abbildung 3-1: Übersicht über die für die Trendanalysen verwendeten Klima- und Niederschlagsstationen

3.2 Methodik

Die Analysen der klimatischen Veränderungen in der Vergangenheit erfolgten für eine Reihe von verschiedenen meteorologischen Kenngrößen (vgl. Tabelle 3-1), sowohl für das hydrologische Gesamtjahr (November bis Oktober) als auch für das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) bzw. das Winterhalbjahr (November bis April). Hierfür wurde für jede Zeitreihe an einer Messstation zunächst eine jährliche Serie gebildet, d.h. es wurde für jedes der analysierten Jahre ein

Wert pro Jahr (Nov-Okt) bzw. Halbjahr (Sommer: Mai-Okt, Winter: Nov-Apr) berechnet. Anschließend wurde für jede dieser Wertereihen die Stärke des Trends sowie dessen Signifikanz ermittelt.

Die Schätzung des Trends, also des Betrages und der Richtung der Veränderung innerhalb des Betrachtungszeitraums, erfolgte anhand eines Verfahrens nach Theil und Sen (Theil, 1950; Sen, 1968). Anschließend wurde die Änderung der ausgewählten Kenngröße über den Zeitraum ermittelt, entweder als absoluter Wert (z.B. in °C) oder als relativer Wert (in %).

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.

Da dieser Test zu einer Überschätzung der Signifikanz bei autokorrelierten Reihen neigt, wurde die Methode des Pre-Whitening auf Reihen mit einer dominierenden Autokorrelation erster Ordnung angewendet (Yue et al., 2002).

Zunächst erfolgte eine Betrachtung der Gebietsmittel von Niedersachsen für die beiden Kenngrößen mittlere Tages-temperatur und Niederschlag. Anschließend wurden die in Tabelle 3-1 aufgeführten Kenngrößen stationsweise analysiert.

3.3 Ergebnisse der Trendanalysen

Die Entwicklung des Gebietsmittels der Temperaturen in Niedersachsen zeigen, dass es seit der Industrialisierung am Ende des 19. Jahrhunderts bis heute kontinuierlich wärmer geworden ist (vgl. Abbildung 3-2). Auch wenn es immer wieder einzelne kühlere Jahre gegeben hat, so zeigt die Trendanalyse einen signifikanten Anstieg der Temperaturen über den gesamten Zeitraum um +1,6 °C. Am Ende der 1980er Jahre gab es einen (statistisch nachweisbaren) sprunghaften Anstieg der Temperaturen um rund +1 °C. Seitdem bewegen sich die Temperaturen in Niedersachsen insgesamt auf einem höheren Niveau als davor. Auch die Gebietsmittel der Jahresniederschläge zeigen eine signifikante Zunahme um im Mittel rund +13% über den Zeitraum (vgl. Abbildung 3-3). Hierbei hat es immer wieder Wechsel zwischen besonders nassen und trockenen Jahren gegeben, wobei die Abweichungen zu langjährig durchschnittlichen Verhältnissen im Laufe der Jahre im Mittel tendenziell etwas zugenommen haben. Seit Ende der 1980er Jahre zeigen sich deutliche Abnahmen bei den Niederschlägen im Winterhalbjahr.

Die räumlich differenzierten Analysen der einzelnen Klimastation über den Zeitraum 1968-2017 sind in Abbildung 3-4 bis Abbildung 3-7 dargestellt. Abbildung 3-4 belegt, dass die Zunahmen der Temperaturen in so gut wie allen Teilen von Niedersachsen stattgefunden haben. Die deutlichsten Zunahmen hat es bei den Maximaltemperaturen im Winterhalbjahr gegeben, die schwächsten bei den Minimaltemperaturen bezogen auf das Gesamtjahr (vgl. auch Tabelle 3-2). Dabei waren die Entwicklungen bei den Minimaltemperaturen im Sommerhalbjahr meist signifikant, während sie im Winterhalbjahr an keiner Station einen signifikanten Trend aufweisen.

Tabelle 3-1: Betrachtete Kenngrößen der Temperatur und des Niederschlags bei den Trendanalysen

Temperatur-Kenngrößen	Einheit	Beschreibung
Txq90	°C	90%-Quantil der Tagesmaximum-Temperaturen
Tav	°C	Tagesmittel-Temperaturen
Tnq10	°C	10%-Quantil der Tagesminimum-Temperaturen
Niederschlag-Kenngrößen	Einheit	Beschreibung
Psum	mm	Summe der Niederschläge für Tage mit $N \geq 1$ mm/Tag
Pq90	mm	90%-Quantil der Tageswerte mit $N \geq 1$ mm/Tag
Px1d	mm	Maximaler 1-Tages-Niederschlag
Px3d	mm	Maximale 3-Tages-Niederschlagssumme
Pnl90	Tage	Anzahl der Tage mit $N > 90\%$ -Langzeitquantil (1971-2000)
WSDmax	Tage	Maximale Dauer von Ereignissen mit $N \geq 1$ mm/Tag
WSDmean	Tage	Mittlere Dauer von Ereignissen mit $N \geq 1$ mm/Tag

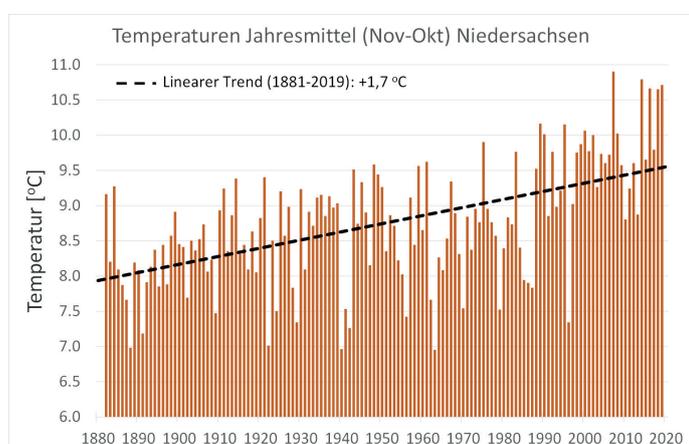


Abbildung 3-2: Übersicht über die für die Trendanalysen verwendeten Klima- und Niederschlagsstationen

In Abbildung 3-5 ist zu erkennen, dass die Niederschlagsmengen im Betrachtungszeitraum tendenziell zugenommen haben. Dies betrifft vor allem den Norden von Niedersachsen mit signifikant ansteigenden Trends. Die übrigen Landesteile zeigen zwar ebenfalls leichte Zunahmen, die zumeist aber keine Signifikanz aufweisen und damit statistisch nicht abgesichert sind. Die Häufigkeit von großen Niederschlägen (oberhalb des 90%-Langzeitquantil) hat deutlich zugenommen. Dies betrifft vor allem den Norden im Winterhalbjahr sowie den Norden und äußersten Südosten von Niedersachsen im Sommerhalbjahr.

Die Regenmengen bei größeren bzw. extremen Niederschlagsereignissen sind zwischen 1968 und 2017 insgesamt tendenziell angestiegen. Abbildung 3-6 zeigt, dass das 90%-Quantil, also die obersten 10% der Tagesniederschlagsmengen, im Winterhalbjahr im Norden sowie im Sommerhalbjahr im äußersten Osten signifikant zugenommen haben. Die maximalen Niederschlagsmengen über einen bzw. drei Tage haben signifikant im Norden (Winterhalbjahr) bzw. im Norden und Westen (Sommerhalbjahr) zugenommen. Im zentralen Tiefland waren die Veränderungen dagegen nicht signifikant.

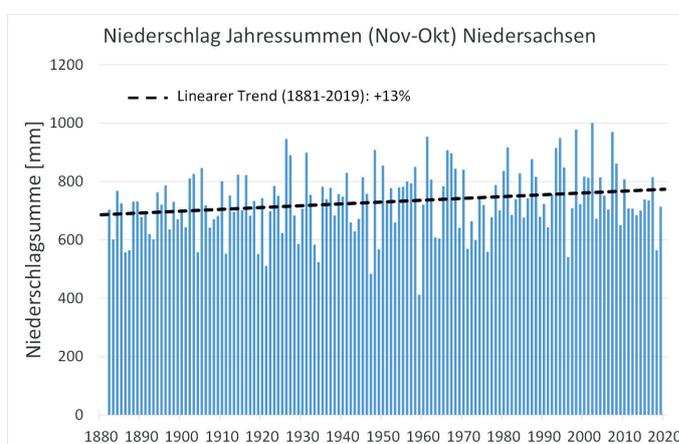


Abbildung 3-3: Entwicklung der Niederschläge im Wasserwirtschaftsjahr als Gebietsmittel für Niedersachsen über den Zeitraum 1881-2019

Die Dauer von Niederschlagsereignissen hat sich im Zeitraum von 1968 bis 2017 so gut wie kaum (signifikant) verändert. Das betrifft sowohl die mittlere als auch die maximale Dauer der Ereignisse.

3.4 Zusammenfassung

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

- Die Temperaturen haben landesweit zugenommen, vor allem im Maximum.
- Die Niederschläge haben zugenommen, vor allem im Norden, im Sommerhalbjahr z.T. auch im Westen.
- Ähnliche Tendenzen zeigen auch extreme Niederschläge und deren Häufigkeit.
- Die Dauer von Niederschlagsereignissen hat sich kaum verändert.
- Die geringsten Veränderungen in Bezug auf die Niederschlag-Kenngrößen zeigen sich im zentralen Flachland von Niedersachsen.

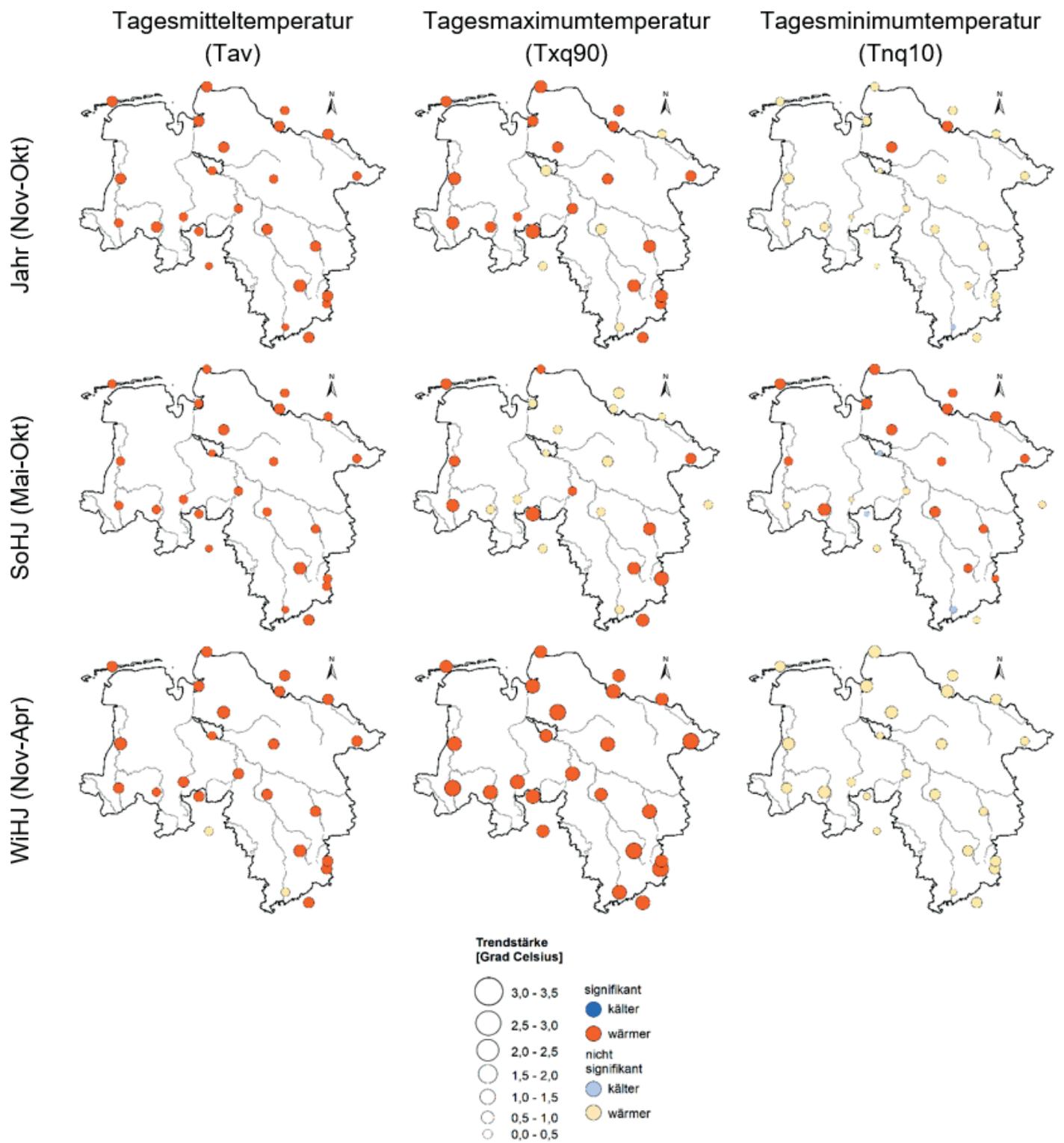


Abbildung 3-4: Trends der mittleren Temperaturen (Tav), der maximalen Temperaturen (Tmx90) sowie der minimalen Temperaturen (Tmn10) an den Messstationen über den Zeitraum 1968-2017

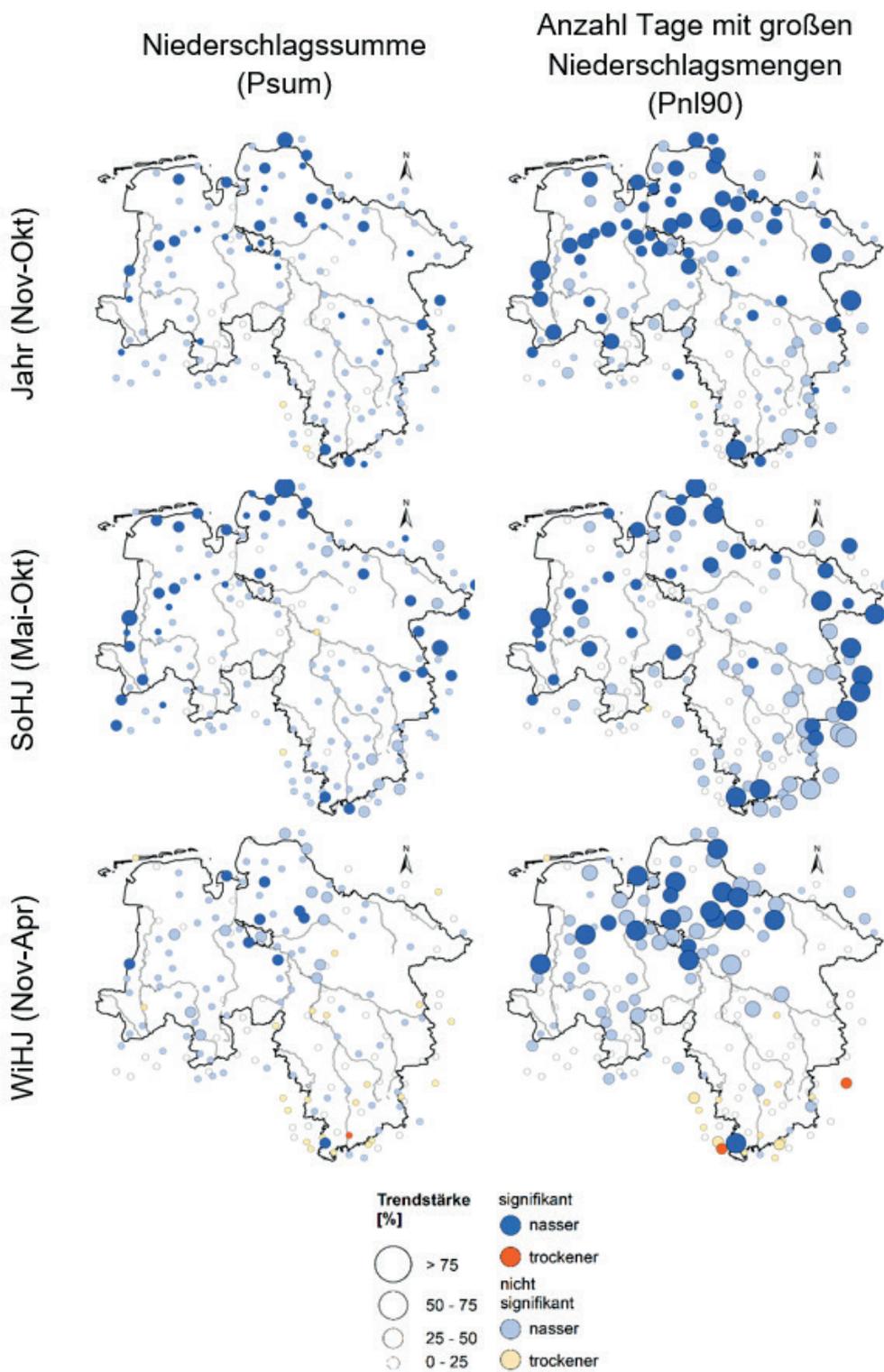


Abbildung 3-5: Trends der Niederschlagssumme (Psum) sowie der Häufigkeit von großen Niederschlagsereignissen (Pnl90) an den Messstationen über den Zeitraum 1968-2017

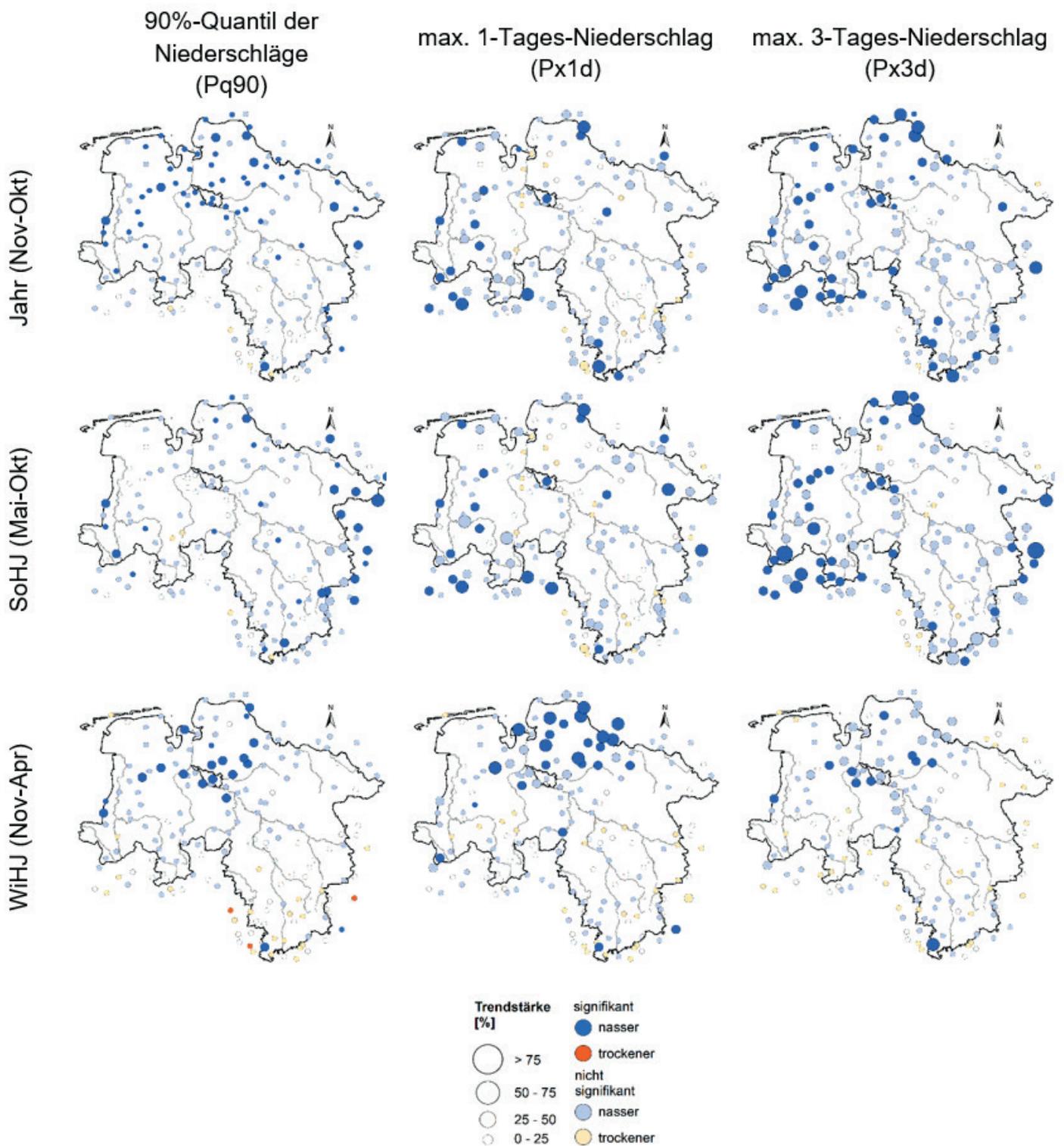


Abbildung 3-6: Trends des 90%-Quantils der Niederschläge (Pq90), des maximalen 1-Tages-Niederschlags (Px1d) sowie der maximalen 3-Tages-Niederschlagssumme (Px3d) an den Messstationen über den Zeitraum 1968-2017

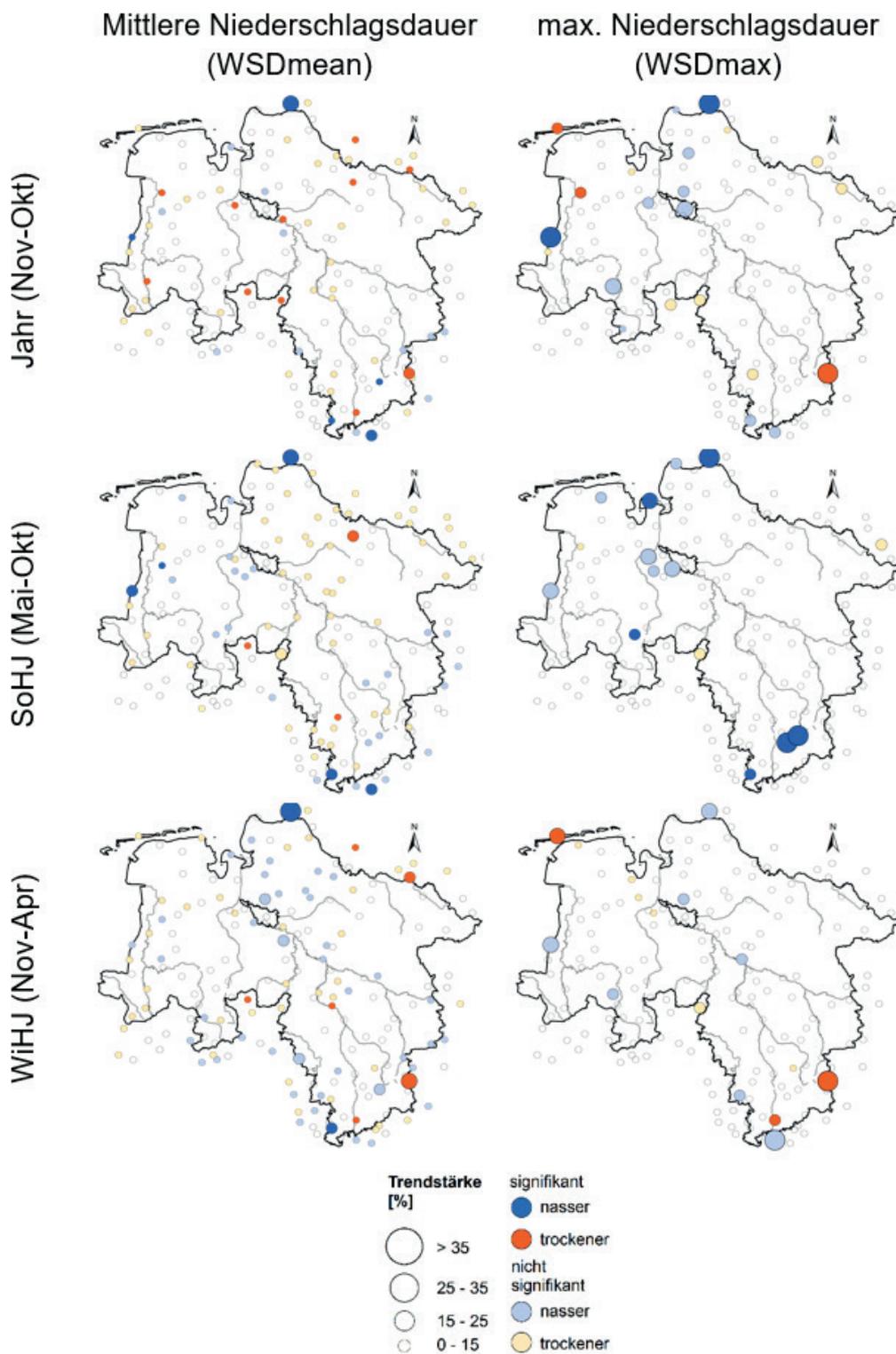


Abbildung 3-7: Trends der mittleren Niederschlagsdauer (WSDmean) sowie der maximalen Niederschlagsdauer (WSDmax) an den Messstationen über den Zeitraum 1968-2017

Tabelle 3-2: Mittlere Veränderung von Klima-Kenngrößen in Niedersachsen in der Vergangenheit auf Basis von Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD)

Kenngröße	Abk.	Jahr (Nov-Okt)			Sommerhalbjahr (Mai-Okt)			Winterhalbjahr (Nov-Apr)		
		1881-2019	1951-2019	1968-2017	1881-2019	1951-2019	1968-2017	1881-2019	1951-2019	1968-2017
Mittlere Temperatur ¹⁾	Tav	+1,7 °C	+1,9 °C	+1,5 °C	+1,4 °C	+1,6 °C	+1,3 °C	+1,8 °C	+2,1 °C	+1,8 °C
Maximaltemperatur ²⁾	Txq90	---	+2,5 °C	+1,8 °C	---	+2,7 °C	+1,6 °C	---	+2,5 °C	+2,8 °C
Minimaltemperatur ²⁾	Tnq10	---	+1,7 °C	+1,1 °C	---	+1,1 °C	+1,2 °C	---	+2,6 °C	+1,7 °C
Niederschlags-summe ¹⁾	Psum	+13 %	+2 %	+8 %	+1 %	-4 %	+16 %	+28 %	+11 %	+5 %
Große Niederschläge ²⁾	Pq90	---	+7 %	+12 %	---	+4 %	+12 %	---	+14 %	+11 %
Max. 1-Tages-Niederschlag ²⁾	Px1d	---	+3 %	+14 %	---	+6 %	+14 %	---	+9 %	+15 %
Max. 3-Tages-Niederschlag ²⁾	Px3d	---	+6 %	+20 %	---	+6 %	+22 %	---	+10 %	+12 %
Häufigkeit gr. Niederschläge ²⁾	Pnl90	---	+11 %	+30 %	---	+1 %	+25 %	---	+41 %	+30 %
Max. Dauer Niederschlag ²⁾	WSDmax	---	0 %	+1 %	---	0 %	+2 %	---	+5 %	0 %
Mittl. Dauer Niederschlag ²⁾	WSDmean	---	+1 %	-1 %	---	-4 %	-1 %	---	+8 %	0 %

1) Gebietsmittel Niedersachsen

2) Stationsmittel Niedersachsen

4 Betrachtung der Abflussverhältnisse der Vergangenheit bis heute

4.1 Datenbasis

Die Analysen der Abflussverhältnisse der Vergangenheit erfolgten auf Basis von Tageswert-Abflusszeitreihen an Pegeln des NLWKN, der Harzwasserwerke sowie der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung. Es lagen Zeitreihen von insgesamt 344 Pegeln vor. Einige der Aufzeichnungen reichen zurück bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts, andere beginnen erst gegen Ende des 20. Jahrhunderts. Um einen möglichst langen Zeitraum für die Entwicklung der Abflüsse zu betrachten und gleichzeitig möglichst flächendeckende Aussagen für Niedersachsen zu erhalten, wurde der Analysezeitraum auf den Bereich von 1968 bis 2017 begrenzt. Unter Berücksichtigung des Auswahlkriteriums, dass die Pegeldata einen maximalen Fehlwertanteil von 5% pro Jahr bzw. Halbjahr aufweisen durften sowie der Voraussetzung, dass die Abflüsse nicht erheblich anthropogen beeinflusst sind, ergaben sich insgesamt 69 Pegel, die für die Analysen zur Verfügung standen (vgl. Abbildung 4-1).

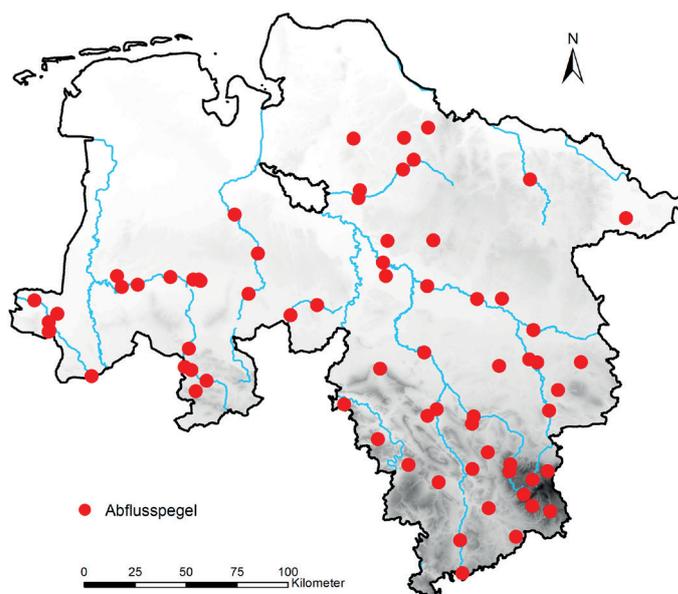


Abbildung 4-1: Übersicht über die für die Trendanalysen verwendeten Abflusspegel

4.2 Methodik

Die Trendanalysen der Abflussverhältnisse erfolgten für ausgewählte hydrologische Kenngrößen. Neben den bereits in der Phase 4 von KliBiW betrachteten Größen des Mittelwasserabflusses sowie der Hochwasserscheitel wurden in der Phase 6 zusätzlich die Kennwerte Hochwasserhäufigkeit, Hochwasserdauer und Wellenvolumen bei Hochwasser analysiert. Diese dienen der Vertiefung der Erkenntnisse über die Hochwasserverhältnisse in Niedersachsen, vor allem im Hinblick auf planerische und politische Entscheidungen (vgl. Tabelle 4-1 und Kapitel 10).

Die Vorgehensweise gleicht im Wesentlichen den Analysen der klimatischen Verhältnisse (vgl. Kapitel 3.2). Für die Mittelwasserabflüsse wurde jeweils ein Mittelwert, für die Hochwasserscheitel jeweils ein Maximalwert und für die Häufigkeit von Hochwassern jeweils die Summe der Ereigniszahl pro Jahr bzw. Halbjahr an jedem Pegel ermittelt (= sog. jährliche Serie). Dabei wurde für die Ermittlung der Häufigkeiten, der Dauer und der Volumina ein Hochwasserereignis als solches identifiziert, wenn der Abfluss wenigstens einen vorgegebenen Schwellenwert erreicht. In diesem Fall wurde die Schwelle durch den Abfluss definiert, der im statistischen langjährigen Mittel alle zwei Jahre vorkommt (HQ_2). Für die Kenngrößen Hochwasserdauer und Wellenvolumen bei Hochwasser wurde auf Basis dieser Schwelle jeweils eine partielle Serie gebildet, d.h. es wurde jedes Mal ein Wert (Ereignisdauer bzw. -volumen) berechnet, wenn der Abfluss oberhalb dieser Schwelle lag.

Anschließend erfolgt dann die Berechnung der Stärke des linearen Trends für die jährliche bzw. partielle Serie anhand des Verfahrens nach Theil und Sen (Theil, 1950; Sen, 1968) sowie die Berechnung der Signifikanz der Trends über das Verfahren von Mann und Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975).

Ergänzend zu den Trendanalysen erfolgte auch eine Ermittlung des (mittleren) Eintrittszeitpunkts von Hochwasserereignissen (sog. Saisonalität) innerhalb eines Jahres an jedem Pegel nach dem Verfahren von Burn (1997; verändert nach Schuhmann et al., 2007). Auch hierbei wurde ein Hochwasser als solches identifiziert, wenn der Scheitelabfluss wenigstens die Schwelle des HQ_2 erreicht (vgl. Kapitel 10).

4.3 Ergebnisse der Trendanalysen

Die räumlich differenzierten Analysen der Abfluss-Kenngrößen in Niedersachsen für den Zeitraum 1968-2017 sind in Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Mittelwasserabflüsse (MQ) in weiten Teilen des Landes im Betrachtungszeitraum tendenziell abgenommen haben. An den meisten der Pegel sind diese Trends jedoch nicht signifikant, d.h. sie sind statistisch nicht abgesichert und können auch zufällig sein. Lediglich im Sommerhalbjahr sind an einigen Pegeln signifikant abnehmende Trends zu erkennen, vor allem im Weser-Leinebergland im südöstlichen Niedersachsen. Im Bereich des Harzes zeigen einige Pegel im Winterhalbjahr leicht zunehmende Trends, wobei diese nur am Pegel Hüttsenthal, stromauf der Innerstetalsperre, signifikant sind. Auch die Hochwasserscheitelabflüsse (HQ) haben in weiten Teilen des Landes sowohl im Sommer- als auch im Winterhalbjahr tendenziell abgenommen. Ausnahme hiervon ist der Bereich des Harzes, wo sich zunehmende Trends abzeichnen. Aber auch bei der Entwicklung der Hochwasserscheitel sind die Trends in den meisten Fällen nicht signifikant, können also zufällig sein. Wird der Betrachtungszeitraum auf die Phase nach dem sprunghaften Anstieg der Temperaturen begrenzt (vgl. Kapitel 3.3), also den Bereich von 1988 bis 2017, so verändern sich die Trends bzw. deren räumliche Muster bei den HQ (vgl. Abbildung 4-2 unten). Im Sommerhalbjahr kam es in dieser Zeit landesweit zu Zunahmen der Scheitelabflüsse, die an einzelnen Pegel auch signifikant waren. Im Winterhalbjahr konnte man dagegen im gesamten südlichen Niedersachsen abnehmende Trends der HQ beobachten, die an zahlreichen Pegeln auch signifikant waren.

In Abbildung 4-3 sind die Trends der neuen hydrologischen Kenngrößen dargestellt, die im Zuge der vertiefenden Analysen der Hochwasserverhältnisse betrachtet wurden. Es ist zu erkennen, dass sich die Häufigkeit von Hochwasserereignissen, deren Scheitelabfluss größer ist als der eines zweijährigen Hochwassers, im Zeitraum von 1968 bis 2017 nicht verändert haben. Das Gleiche gilt prinzipiell auch für die Dauer von entsprechenden Hochwasserereignissen. Die Entwicklungen der Wellenvolumina bei Hochwasser zeigen räumlich uneinheitliche Trends, die in den meisten Fällen jedoch nicht signifikant sind. Die Muster folgen dabei in etwa den Mustern der Veränderungen der Hochwasserscheitelabflüsse.

Tabelle 4-1: Betrachtete Kenngrößen des Abflusses bei den Trendanalysen

Abfluss-Kenngröße	Einheit	Beschreibung
Mittelwasserabfluss	m ³ /s	Mittelwert aller Abflusswerte in einer Zeitspanne
Hochwasserscheitelabfluss	m ³ /s	Größter Abfluss in gleichartigen Zeitspannen (z.B. Jahre, Halbjahre)
Hochwasserhäufigkeit *)	Anzahl	Anzahl der Hochwasserereignisse mit einem Scheitelabfluss $\geq HQ_2$
Hochwasserdauer *)	Tage	Dauer der Hochwasserereignisse mit einem Scheitelabfluss $\geq HQ_2$
Wellenvolumen bei Hochwasser *)	m ³	Volumen der Hochwasserereignisse mit einem Scheitelabfluss $\geq HQ_2$

*) siehe auch Erläuterungen im Glossar

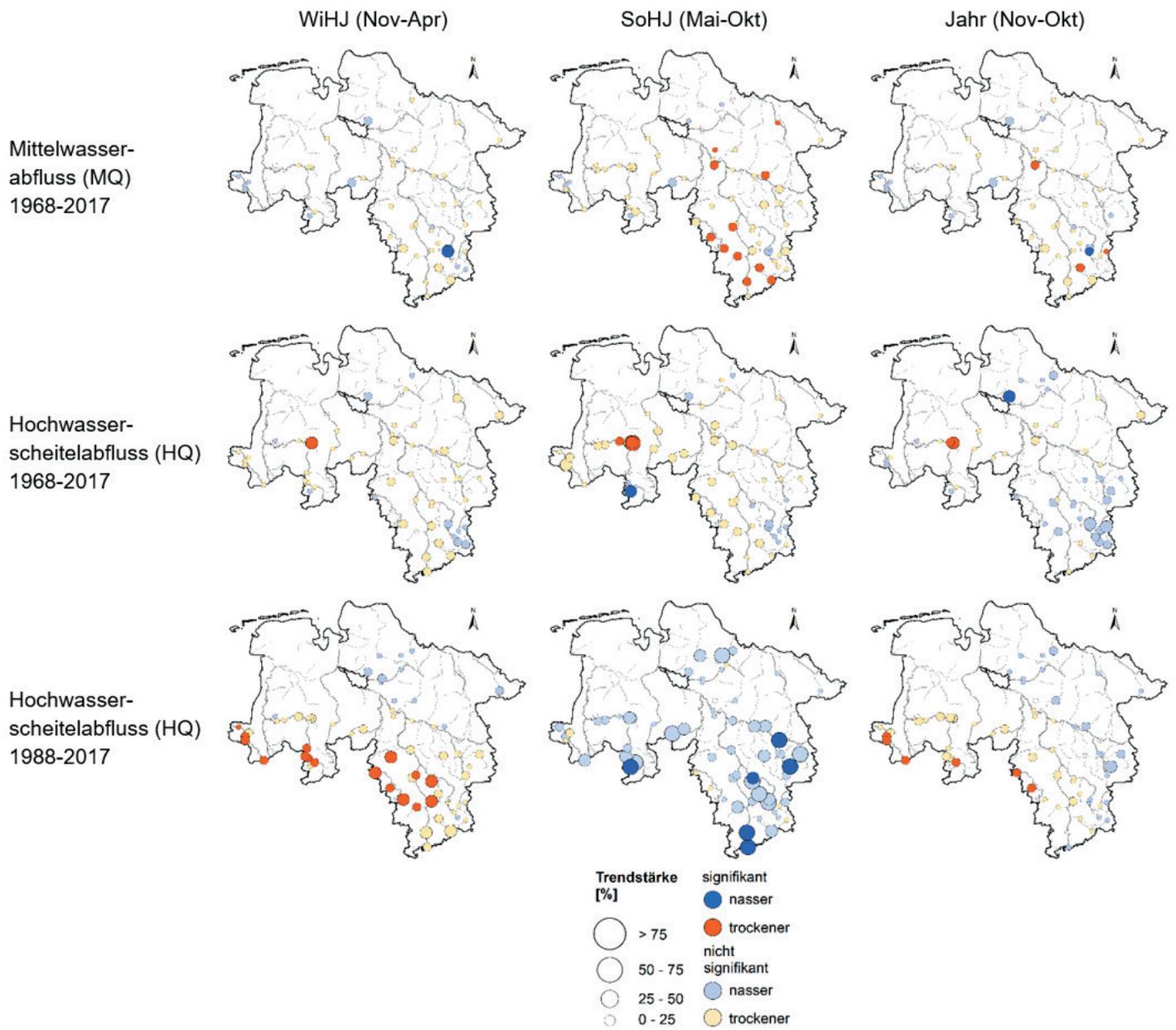


Abbildung 4-2: Trends der Mittelwasserabflüsse (MQ) sowie der Hochwasserscheitelabflüsse (HQ) an den Pegeln über den Zeitraum 1968-2017 (für das HQ zusätzlich für den Zeitraum 1988-2017)

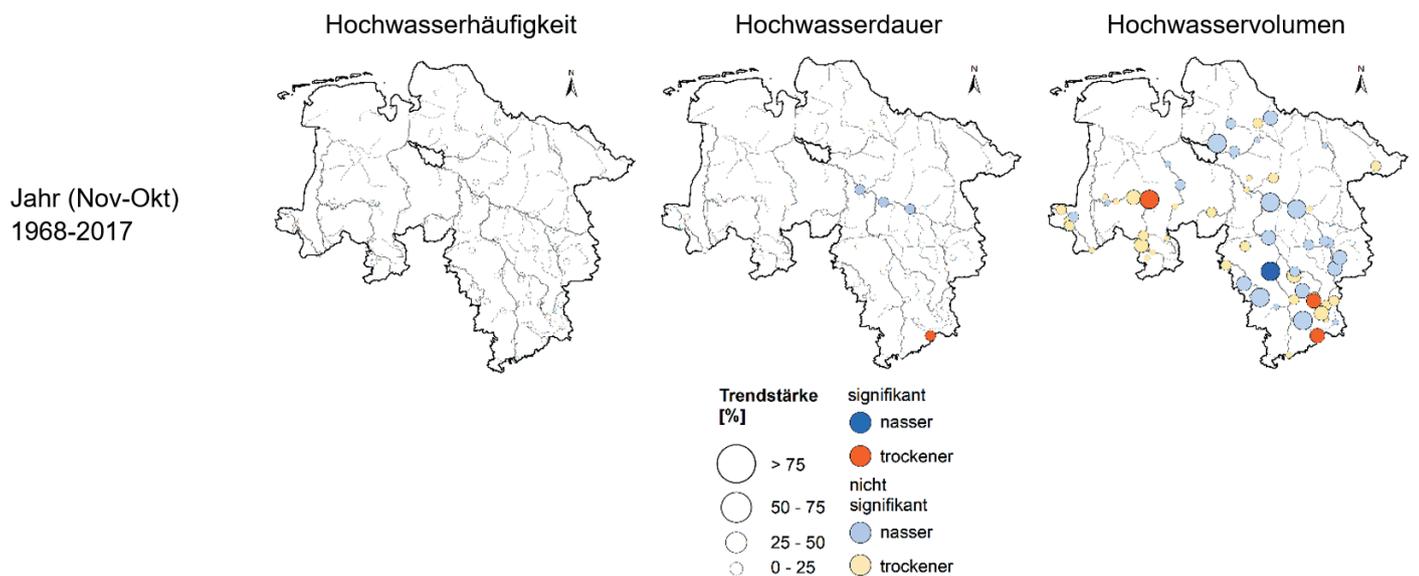


Abbildung 4-3: Trends der Hochwasserhäufigkeit, der Hochwasserdauer sowie des Hochwasservolumens an den Pegeln über den Zeitraum 1968-2017

4.4 Ergebnisse der Saisonalitätsanalysen

Die Analyse der Saisonalität von Hochwasserereignissen erfolgte nach einem Verfahren von Burn (1997; verändert nach Schuhmann et al., 2007) (vgl. Kapitel 10, Abbildung 10-1). Abbildung 4-4 zeigt, dass Hochwasserereignisse in der Vergangenheit in Niedersachsen im Mittel vor allem zu Beginn des Jahres aufgetreten sind. Dabei liegt der Eintrittszeitpunkt im Westen bzw. Nordwesten schwerpunktmäßig im Januar, während er in der östlichen Landeshälfte tendenziell eher im Februar angesiedelt ist. In den Ausläufern der Mittelgebirge im Südosten variieren diese Tendenzen regional. Betrachtet man dagegen den Eintrittszeitpunkt der jeweils größten gemessenen Hochwasserereignisse an einem Pegel, so zeigen sich kaum räumliche bzw. zeitliche Muster. Extreme Abflussereignisse sind dementsprechend in der Vergangenheit zu jeder Jahreszeit aufgetreten. Auffällig ist dabei, dass vor allem Ereignisse in den Sommermonaten bzw. im Sommerhalbjahr einen nicht unerheblichen Anteil ausgemacht haben.

4.5 Zusammenfassung

Die Analysen der Abflussverhältnisse in der Vergangenheit haben gezeigt, dass es in den letzten rund 50 Jahren in Niedersachsen kaum signifikante Veränderungen bei den Mittelwasserabflüssen und den Hochwasserscheitelabflüssen gegeben hat. Im gleichen Zeitraum gab es keine Veränderungen in Bezug auf die Häufigkeit und Dauer von Hochwasserereignissen. Lediglich die Wellenvolumina bei Hochwasser zeigen regional unterschiedliche Tendenzen. Diese begründen sich im Wesentlichen auf den Entwicklungen der Hochwasserscheitel, zeigen aber, wie diese auch, nur selten eine signifikante Veränderung. Der mittlere Eintrittszeitpunkt von Hochwasserereignissen ($\geq HQ_2$) lag vor allem in den ersten Monaten eines Jahres. Extreme Abflussereignisse sind dagegen ganzjährig aufgetreten, wobei sie an über der Hälfte der Pegel während der Sommermonate (Juni, Juli, August) beobachtet werden konnten.

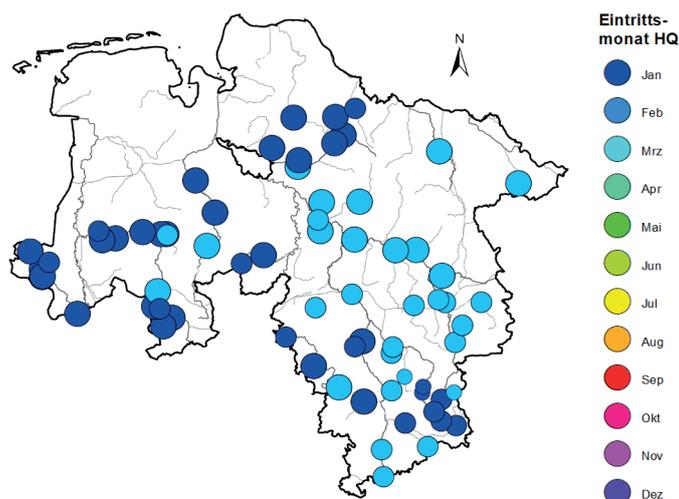


Abbildung 4-4: Mittleres Eintrittsdatum (Monat) von Hochwasserereignissen (mit Abflussscheitel $\geq HQ_2$) im Zeitraum von 1968-2017 (je stärker das Eintrittsdatum der Einzelereignisse um das mittlere Eintrittsdatum streut, desto kleiner wird der Pegelpunkt dargestellt)

5 Das Klimamodell-Ensemble von KliBiW

5.1 Globale und regionale Klimaprojektionen

Die langfristigen Veränderungen des zukünftigen Klimas in den nächsten Jahrzehnten bis Jahrhunderten sind nicht vorhersagbar. Ein Grund hierfür ist die natürliche Variabilität des Klimasystems. Es unterliegt zwar physikalischen Gesetzmäßigkeiten, reagiert jedoch sehr sensitiv (quasi chaotisch) auf minimale Änderungen bei den Start- oder Randbedingungen. Gleichzeitig sind die ablaufenden Prozesse und Wechselwirkungen sehr komplex, so dass sie selbst mit Hilfe von heutigen Hochleistungsrechnern nur vereinfacht abgebildet werden können. Ein weiterer wichtiger Grund sind die (unberechenbaren) Handlungen des Menschen, die durch wechselhafte ökonomische, soziale und politische Interessen geprägt sind und das Klima beeinflussen. Auf Basis von Annahmen (Szenarien) über die sozioökonomischen Entwicklungen der Gesellschaft und damit verbundener maßgeblicher Einflüsse, wie z.B. die Emission von Treibhausgasen oder die Veränderung von Landnutzungen, können jedoch Abschätzungen zum möglichen Klima der Zukunft vorgenommen werden. Hierbei helfen Klimaprojektionen, die Wirkungen auf das zukünftige Klima über Dekaden bis zu mehr als 100 Jahren anhand von vorgegebenen Szenarien und mit Hilfe von Computermodellen zu berechnen (DWD, 2017).

Im zuletzt veröffentlichten 5. Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC dienen sogenannte RCP-Szenarien (Repräsentative Konzentrationspfade; Moss et al. 2010) als Ausgangsbasis für die Modellierung des zukünftigen Klimas. Diese Szenarien geben die anthropogen bedingten Treibhausgas-Emissionen bzw. -Konzentration vor und werden nach der Größenordnung des am Ende des 21. Jahrhunderts zu erwartenden anthropogenen Strahlungsantriebes (in W/m^2) bezeichnet (vgl. Abbildung 5-1). Dabei stellt beispielsweise das RCP2.6 ein sog. Klimaschutz-Szenario dar, welches eine Änderung der globalen Mitteltemperatur von unter $+2^\circ C$ am Ende des 21. Jahrhunderts erreicht und somit dem Ziel des Pariser Klimaabkommens von 2015 entspricht. Die Konzentration der Treibhausgase läge hier 2100 bei einem CO_2 -Äquivalent von rund 400 ppm (zum Vergleich 2019: 410 ppm; Global Carbon Project, 2020). Das RCP8.5 stellt dagegen ein Szenario ohne Klimaschutz dar, bei dem zukünftig praktisch keine Maßnahmen zur Reduzierung der globalen Treibhausgas-Emissionen umgesetzt werden und die Energiegewinnung weiterhin zu einem Großteil aus fossilen Energieträgern (allen voran Kohle) erfolgt. Die Treibhausgas-Konzentration läge hier 2100 bei einem CO_2 -Äquivalent von rund 1370 ppm.

Die Szenarien dienen neben anderen natürlichen Einflüssen als Antrieb bzw. Eingangsdaten für Klimamodelle, die grundsätzlich in zwei Kategorien unterschieden werden können. **Globale Klimamodelle** simulieren die Prozesse im Klimasystem mit entsprechenden Wechselwirkungen zwischen Landmassen, Ozean und Atmosphäre für den gesamten Erdball innerhalb eines dreidimensionalen Gitternetzes. Werden neben physikalischen Prozessen auch biogeochemische Kreisläufe sowie deren Rückkopplungen dabei berücksichtigt, spricht man von sog. Erdsystemmodellen. Aufgrund der hohen Komplexität der Berechnungen und der dabei

anfallenden enormen Datenmenge ist die räumliche Auflösung (Gitterpunktabstand) solcher Modelle relativ grob. Regionale Ausprägungen des Klimas oder gar kleinräumig ablaufende Prozesse, wie z.B. die Niederschlagsbildung auf Basis topographischer Effekte an Gebirgen, können so nur unzureichend abgebildet werden. Daher nutzt man in diesen Fällen sog. **Regionale Klimamodelle**. Sie betrachten lediglich einen Ausschnitt der Erdoberfläche und modellieren für die entsprechende Region die klimatischen Prozesse in einer höheren räumlichen Auflösung. Dabei verwenden sie in der Regel wesentliche Ergebnisse der globalen Modelle als Eingangsgrößen bzw. Randbedingungen. Dieses Prinzip nennt man Downscaling (z.B. Fowler et al., 2007). Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Downscaling-Methoden bzw. Regionalmodellen. Dynamische Regionalmodelle (engl. Regional Climate Model, RCM) simulieren das Klima in einem dreidimensionalen Ausschnitt der Erde anhand von atmosphärischen Zirkulationsmustern, ähnlich den Globalmodellen. Dabei werden die Eigenschaften der Erdoberfläche wie Höhenlagen, Böden, Landnutzung und ihre Wechselwirkungen mit der Atmosphäre berücksichtigt. Durch die höhere räumliche Auflösung können dynamische Regionalmodelle z. B. den Prozess der Niederschlagsbildung besser repräsentieren als Globalmodelle (Jacob et al., 2017). Dem gegenüber stehen Statistische Regionalmodelle (engl. Empirical Statistical Downscaling, ESD). Diese basieren auf lokalen Stationsdaten. Sie analysieren Zusammenhänge zwischen beobachteten großräumigen Zirkulationsmustern und dem resultierenden regionalen Wettergeschehen. Die Zusammenhänge wenden sie dann auf die von den Globalmodellen projizierten Klimaänderungen an (Jacob et al., 2017).

Aus dem Zusammenspiel von beobachteten Treibhausgasemissionen in der Vergangenheit sowie den Treibhausgas-Szenarien in der Zukunft ergeben sich mit Hilfe von globalen und regionalen Klimamodellen Klimaprojektionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts und darüber hinaus (vgl. Abbildung 5-2).

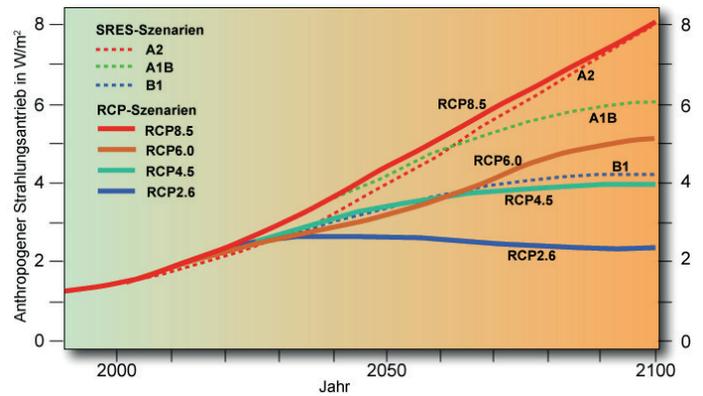


Abbildung 5-1: Die Szenarien der Treibhausgas-Entwicklung im Vergleich (Hamburger Bildungsserver, verändert nach IPCC, 2013)

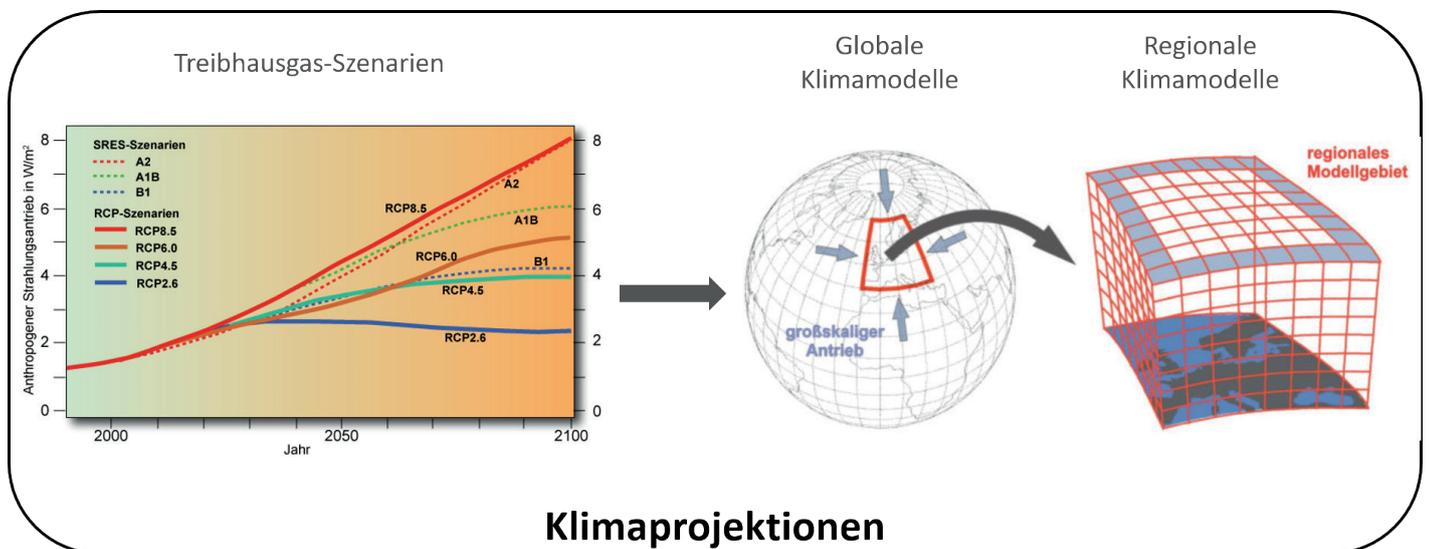


Abbildung 5-2: Das Prinzip der Modellkette bei der regionalen Klimamodellierung (nach Klimanavigator, 2017, und DKRZ 2000)

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 zu 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- / Regionalmodell gerechnet.

Das im Zuge von KliBiW 6 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 (vgl. Kapitel 5.1). 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, wird dieses Ensemble an regionalen Klimaprojektionen derzeit 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. Impactmodellierung, 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 „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., 2017). 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. Diese Empfehlung folgend setzt sich das in KliBiW 6 genutzte Ensemble aus insgesamt acht regionalen Klimamodellprojektionen zusammen (vgl. Tabelle 5-1 und Tabelle 5-2).

Die Daten der sechs Regionalmodelle aus dem Kern-Ensemble gehören wiederum zu einem größeren Ensemble von Modelldaten, die vom DWD im Rahmen des Ressortforschungsprojektes BMVI-Expertennetzwerkes 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.

Im Gegensatz dazu lagen die Modelldaten aus den KliBiW Phasen 4 und 5 auf dem 12,5x12,5 km Raster von EURO-CORDEX vor. Die Korrektur der systematischen Abweichungen der Modelldaten erfolgte damals über das Verfahren des Linear Scaling (vgl. NLWKN, 2017).

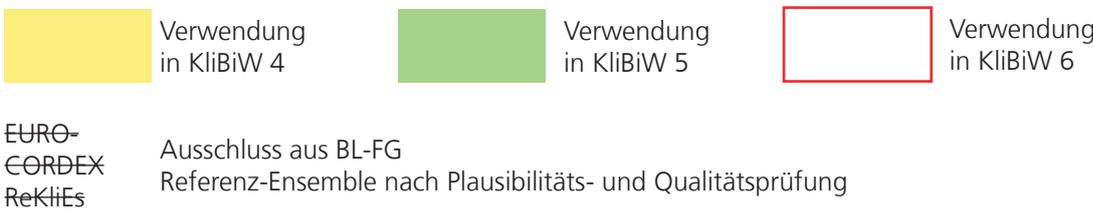
Tabelle 5-1: Das Modell-Ensemble von KliBiW 6

Globalmodell	Regionalmodell	Abkürzung
EC-EARTH_r1	RACMO	ECE_r1_RACMO
EC-EARTH_r12	RACMO	ECE_r12_RACMO
HadGEM2-ES	WETTREG2013	HadGEM_W13
HadGEM2-ES	WRF361H	HadGEM_WRF
MIROC5	CCLM	MIROC_CCLM
MPI-ESM-LR	CCLM	MPI_CCLM
MPI-ESM-LR	WETTREG2013	MPI_W13
MPI-ESM-LR	WRF361H	MPI_WRF

Bei allen Globalmodellen handelt es sich um den Lauf 1, mit Ausnahme von EC-EARTH (r1: Lauf 1, r12: Lauf 12)

Tabelle 5-2: Modellmatrix der verfügbaren Klimaprojektionen aus den Projekten EURO-CORDEX und ReKliEs-De (Stand: 31.05.2017) für das Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) sowie deren Verwendung in den Projektphasen von KliBiW

RCM GCM	CCLM	REMO	WRF361H	WETT-REG 2013	STARS3	RCA4	RACMO	HIRHAM5
MPI-ESM-LR	EURO-CORDEX	EURO-CORDEX *)	EURO-CORDEX	ReKliEs	ReKliEs	EURO-CORDEX	---	---
CNRM-CM5	EURO-CORDEX	ReKliEs	---	ReKliEs	ReKliEs	EURO-CORDEX	---	---
HadGEM2-ES	EURO-CORDEX	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	EURO-CORDEX	EURO-CORDEX	---
EC-EARTH	EURO-CORDEX	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	EURO-CORDEX	EURO-CORDEX **)	EURO-CORDEX
CanESM2	ReKliEs	ReKliEs	---	ReKliEs	ReKliEs	---	---	---
MIROC5	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	ReKliEs	---	---	---
IPSL-CM5A-MR	---	---	EURO-CORDEX	---	---	EURO-CORDEX	---	---



Verwendung in KliBiW 4
 Verwendung in KliBiW 5
 Verwendung in KliBiW 6

EURO-CORDEX
 ReKliEs

Ausschluss aus BL-FG
 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 der Klimamodelldaten

Die Daten des Modell-Ensembles in KliBiW 6 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.

5.4 Evaluierung der Klimamodelldaten anhand von Beobachtungsdaten

Die Evaluierung der Klimamodelldaten erfolgte mittels eines Vergleichs der einzelnen Modellläufe mit einem Beobachtungsdatensatz (HYRAS) über einen historische Referenzzeitraum, hier 1971-2000. Der Vergleich fand anhand verschiedener Klima-Kenngrößen statt, die als Gebietsmittel für Niedersachsen ermittelt wurden. Hierzu zählen die Tages-

mitteltemperatur, die Niederschlagssumme, die Minimumtemperatur, die Maximumtemperatur, das 90%-Quantil der Niederschläge, die Häufigkeit von großen Niederschlagsereignissen, die maximale Dauer von Trockenphasen sowie die maximale Dauer von Niederschlagsereignissen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-3 als Jahresmittel und in Abbildung 5-4 als Monatsmittel dargestellt.

In Abbildung 5-3 zeigt sich, dass die meisten Klimaprojektionen die Niederschlagssummen gegenüber HYRAS mehr oder weniger überschätzen. Besonders deutlich ist dies bei HadGEM_W13. Bei den Temperaturen sind vor allem die beiden WETTREG-Projektionen zu warm, MPI_CCLM ist deutlich zu warm. Bei den Temperaturextremen (Maximum und Minimum) zeigen sich insgesamt deutlichere Abweichungen gegenüber HYRAS bei fast allen Modellen im Vergleich zu den Mitteltemperaturen. Während ECE_r12_RACMO und MIROC_CCLM jeweils deutlich zu kalt sind, liegt HadGEM_W13 weit über den beobachteten Maximaltemperaturen. MPI_CCLM ist bzgl. beider Temperatur-Kenngrößen deutlich zu warm. Bei dem 90%-Quantil der Niederschläge sowie der Häufigkeit größerer Niederschlagsereignisse zeigen die meisten Modelle eine relativ gute Übereinstimmung mit HYRAS. Lediglich HadGEM_W13 und MPI_CCLM unterschätzen die Niederschlagsmenge und überschätzen die Häufigkeit der Ereignisse. Die maximale Dauer von Trockenphasen wird von einigen Modellen leicht über- von anderen leicht unterschätzt. Bei der max. Dauer der Niederschlagsereignisse zeigt vor allem WETTREG2013 deutlichere Abweichungen (HadGEM_W13 überschätzt, MPI_W13 unterschätzt die Beobachtung).

Die monatlich differenzierte Betrachtung der Tagesmitteltemperaturen und Niederschlagssummen in Abbildung

5-4 zeigt, dass die zu kalten Temperaturen der auffälligen Modelle sich v.a. auf Abweichungen in den Wintermonaten (Dezember, Januar Februar) sowie im (Spät-)Sommer (Juli – September) begründen. Die Überschätzungen (v.a. der WETTREG2013-Projektionen) passieren fast ganzjährig. Auch die Überschätzungen der Niederschlagssumme erfolgt bei vielen Modellen während der Wintermonate sowie im (Spät-)Sommer.

Die Evaluierung belegt insgesamt, dass die meisten Modelle des Ensembles im Mittel etwas zu viel Niederschlag produzieren und tendenziell zu warm sind. Bei den anderen betrachteten Kenngrößen liegen die Abweichungen der Modelle zumeist gleichmäßig verteilt um die Beobachtung von HYRAS. Dies kann als Hinweis darauf gesehen werden, dass die beobachteten Klimaverhältnisse durch das Ensemble insgesamt im Wesentlichen ausreichend gut wiedergegeben werden.

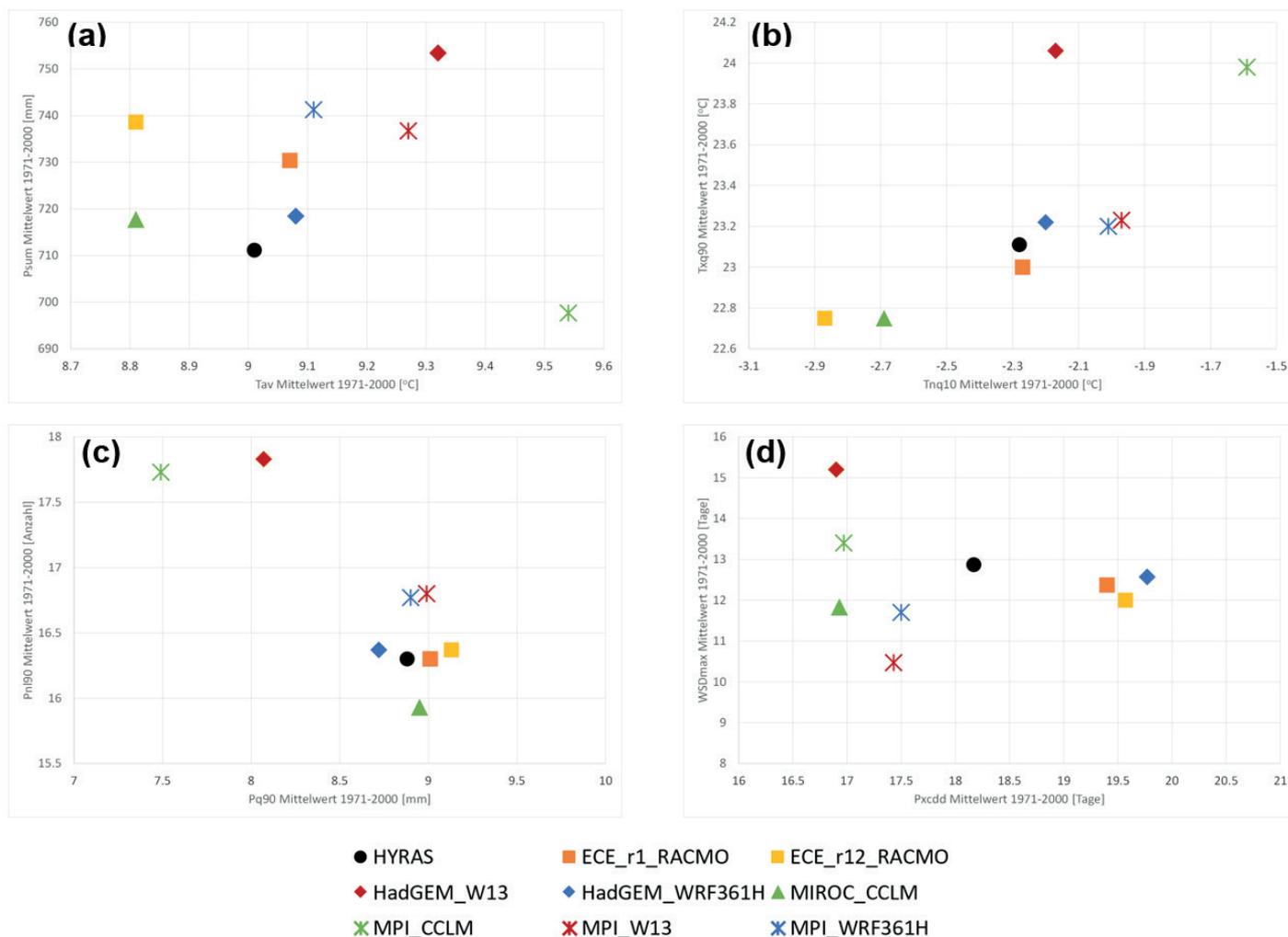


Abbildung 5-3: Scatterplots der Gebietsmittel von Niedersachsen für den Referenzzeitraum 1971-2000 auf Basis ausgewählter Klima-Kenngrößen für die Ensemble-Mitglieder von KliBiW 6 sowie für HYRAS. (a) Mitteltemperatur (Tav) und Niederschlagssumme (Psum), (b) Minimumtemperatur (Tnq10) und Maximumtemperatur (Txq90), (c) 90%-Quantil der Niederschläge (Pq90) und Häufigkeit großer Niederschlagsereignisse (Pn90), (d) max. Dauer von Trockenphasen (Pxccd) und max. Dauer von Niederschlagsereignissen (WSDmax). Die Symbolform weist auf das antreibende Globalmodell, die Symbolfarbe auf das Regionalmodell.

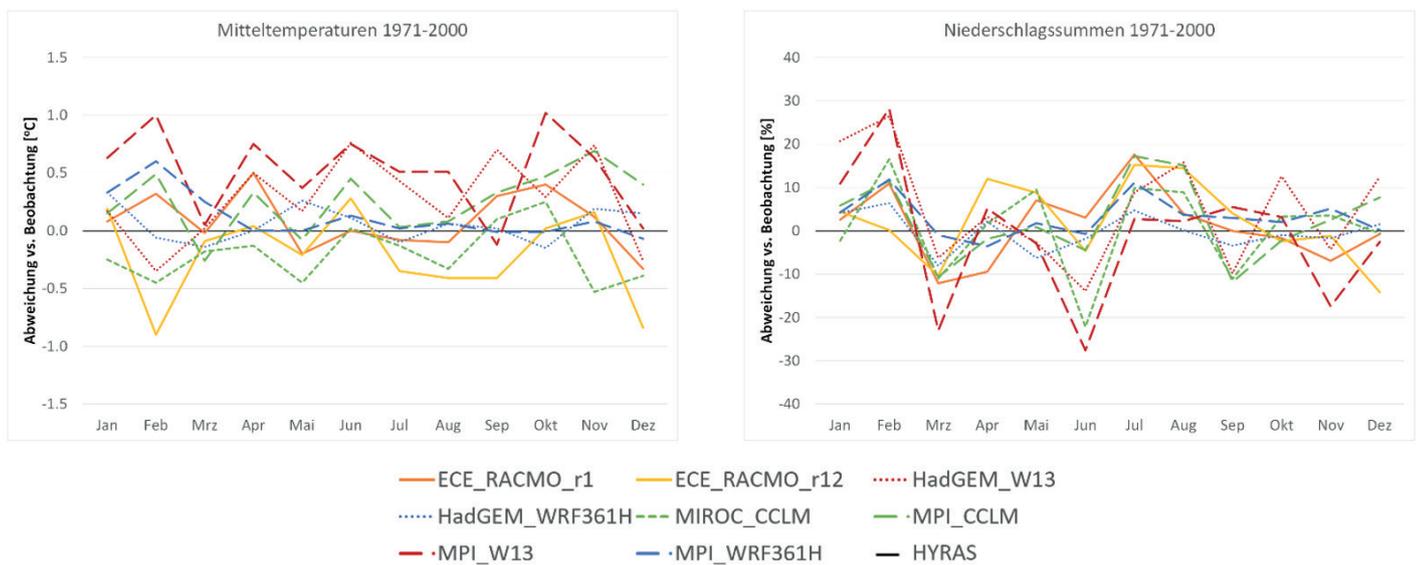


Abbildung 5-4: Abweichung der mittleren Monatswerte (1971-2000) der Gebietsmittel von Niedersachsen auf Basis von Temperatur (links) und Niederschlag (rechts) für die Ensemble-Mitglieder von KLiBiW 6 gegenüber den HYRAS-Daten des DWD. Die Linienart weist auf das antreibende Globalmodell, die Linienfarbe auf das Regionalmodell.

6 Analysen der möglichen klimatischen Verhältnisse der Zukunft

6.1 Datenbasis

Die Analysen der möglichen klimatischen Verhältnisse in der Zukunft erfolgten in KLiBiW 6 auf Basis eines Ensembles von acht Klimamodellläufen. Diese bestehen jeweils aus einem antreibenden Globalmodell sowie einem Regionalmodell (vgl. Tabelle 5-1). Bei sechs dieser Modelle handelt es sich um dynamische Regionalmodelle, deren Daten einer Bias-Adjustierung unterzogen wurden. Die anderen zwei Modellläufe wurden mit dem statistischen Modell WETTREG2013 gerechnet, dessen Daten keine Bias-Adjustierung erfahren haben. Nach der Aufbereitung der Daten entsprechend Kapitel 5.3 lagen die Informationen zu allen Modellen und Klimavariablen als Tageswerte auf einem einheitlichen 5x5 km Raster für Niedersachsen vor. Der Zeitraum der Modellzeitreihen reichte von 1951 bzw. 1970 bis zum Jahr 2100 (der Modelllauf HadGEM_WRF361H ging bis zum Jahr 2099). Dabei wurden die Modelle bis zum Jahr 2005 mit historisch beobachteten Treibhausgas-Emissionen angetrieben (sog. historischer Lauf). Von 2006 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erfolgte der Antrieb mit den zukünftigen Treibhausgas-Emissionen, die aus dem Szenario ohne Klimaschutz, RCP8.5, resultieren (sog. Szenarien-Lauf).

6.2 Methodik

Die zukünftigen klimatischen Verhältnisse werden durch die Veränderung der analysierten Kenngrößen gegenüber einem Referenzzeitraum dargestellt. Dabei erfolgt die Betrachtung gemäß Linke et al. (2017) immer für 30jährige Zeiträume. Der Grund hierfür ist die große Variabilität (d.h. schwer berechenbare Schwankungen) des Klimas auf verschiedenen Zeitskalen, bedingt durch das komplexe Zusammenspiel von

verschiedenen Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen im Klimasystem. Mit Hilfe von Klimamodellen können die mittleren statistischen Eigenschaften des Klimas über langjährige Zeiträume verhältnismäßig gut simuliert werden, nicht jedoch die quasi chaotischen Schwankungen aufgrund der natürlichen Klimavariabilität auf kleineren Zeitskalen.

Grundsätzlich werden für jeden der acht Klimamodellläufe des Kern-Ensembles zunächst die Kenngrößen entsprechend Tabelle 3-1 berechnet, und zwar für drei verschiedene Zeiträume. Zum einen für den Referenzzeitraum (1971-2000) und zum anderen für zwei verschiedene Zukunftszeiträume (nahe Zukunft 2021-2050, ferne Zukunft 2071-2100). Für jeden Modelllauf werden anschließend die jeweiligen Mittelwerte der 30-Jahres-Zeiträume der Zukunft ins Verhältnis gesetzt zum 30-Jahres-Mittelwert des Referenzzeitraums. So erhält man die modellspezifische Veränderung der jeweiligen Kenngröße in der Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum, im Weiteren als Änderungssignal bezeichnet. Da jedes Klimamodell aufgrund der unterschiedlichen internen Berechnungsmethoden unterschiedliche Ergebnisse trotz gleicher Randbedingungen produzieren kann, ergibt sich aus den verschiedenen Änderungssignalen eine Bandbreite an möglichen Ergebnissen für die jeweiligen Zukunftszeiträume (vgl. Abbildung 6-1). Für die räumlich differenzierte Darstellung in Kartenform wurde für jede Rasterzelle auf einem 5x5 km-Gitter der Mittelwert der Ensemblesignale betrachtet (Abb. Abbildung 6-2 bis Abbildung 6-11). Auch wenn dieser Mittelwert für Ensemblesimulationen der Vergangenheit häufig die realen Verhältnisse am besten abbildet, müssen alle Klimaprojektionen eines Ensembles für die Zukunft als gleich wahrscheinlich angesehen werden. Daher werden ergänzend zu den räumlichen Darstellungen der Mittelwerte aus dem Ensemble auch die Bandbreiten für die Gebietsmittel von Niedersachsen als zusätzliche Information im Hinblick auf die Unsicherheit der Modellergebnisse auf Basis 30jähriger gleitender Mittelwerte dargestellt (siehe Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13).

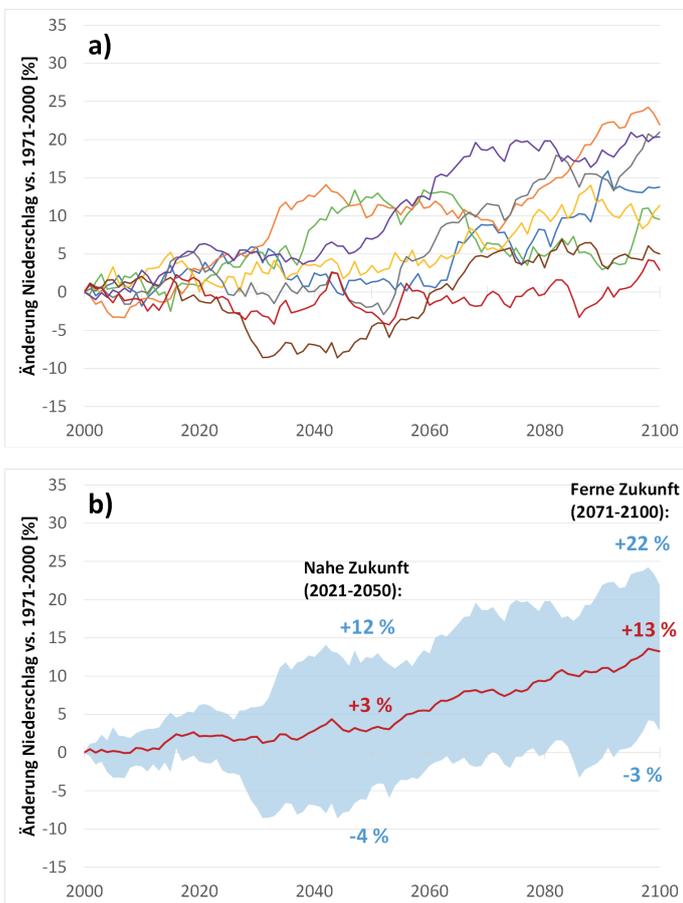


Abbildung 6-1: Bandbreiten der Änderungssignale des Kern-Ensembles am Beispiel der Veränderung der Niederschläge in Niedersachsen im Winterhalbjahr (Nov-Apr); a) Entwicklungen auf Basis der einzelnen Ensemble-Mitglieder (farbig), b) Bandbreite der Veränderungen auf Basis des Ensembles mit Änderungswerten (Minimum, Mittel, Maximum) in der nahen bzw. fernen Zukunft

6.3 Ergebnisse

Die mittleren Änderungssignale der **Temperaturen** zeigen, dass diese unter dem Szenario RCP8.5 zukünftig flächendeckend in Niedersachsen zunehmen werden (vgl. Abbildung 6-2 bis Abbildung 6-4). Dies gilt sowohl für die Tagesmitteltemperaturen als auch für die maximalen und minimalen Tagestemperaturen. Dabei fallen die Zunahmen in der nahen Zukunft geringer aus als in der fernen Zukunft. Am Ende des 21. Jahrhunderts gibt es ein leichtes Temperaturgefälle von den Mittelgebirgen im Südosten in Richtung der Küste im Nordwesten. Die Zunahmen der Minimum- und Maximumtemperaturen sind in weiten Teilen von Niedersachsen in der fernen Zukunft mit +2,5 bis +5,5 °C zumeist stärker ausgeprägt als die der Tagesmitteltemperaturen (Größenordnung +3,0 bis +3,8 °C). Die größten Zunahmen sind bei den Minimumtemperaturen im Winterhalbjahr zu verzeichnen.

Die **Niederschlagssummen** ändern sich nach Abbildung 6-5 in der nahen Zukunft kaum. In der fernen Zukunft kommt es zu Zunahmen im Winterhalbjahr, im Norden und Westen von Niedersachsen etwas deutlicher als in den restlichen Landesteilen (Größenordnung +5 bis +20%). Diese Zunahmen machen sich auch in entsprechenden Veränderungen der Jahressummen bemerkbar. Im Sommerhalbjahr gibt es auch am Ende des Jahrhunderts kaum Veränderungen, lediglich im Bereich des Harzes käme es zu geringfügigen Abnahmen.

Das **90%-Quantil der Niederschläge**, also die Niederschlagsmenge, die an 10% aller Tage im jeweiligen Betrachtungszeitraum überschritten wird, nimmt in einigen (Rand-)Regionen von Niedersachsen bereits in der nahen Zukunft leicht zu (vgl. Abbildung 6-6). In der fernen Zukunft kommt es zu flächenhaften Zunahmen in der Größenordnung von +5 bis +25%, vor allem im Winterhalbjahr.

Die **maximalen Niederschlagsmengen** zeigen noch etwas größere Zunahmen als das 90%-Quantil. So verändert sich das 1-Tages-Maximum bereits in der nahen Zukunft je nach Region im Mittel zwischen etwa -5 und +20%. In der fernen Zukunft zeigen sich deutlichere Zunahmen, vor allem im Winterhalbjahr, von +5 bis +40%. Die räumlichen Schwerpunkte liegen dabei tendenziell im Süden von Niedersachsen (vgl. Abbildung 6-7). Die Entwicklungen der maximalen 3-Tages-Niederschläge zeigen ähnliche räumliche Muster, liegen am Ende des Jahrhunderts in der Größenordnung von +5 bis +30% jedoch etwas unter den Veränderungen der Tagesmaxima (vgl. Abbildung 6-8).

Ähnlich wie die Niederschlagsmengen bei großen bzw. extremen Niederschlagsereignissen, ändert sich auch die **Häufigkeit von Tagen mit großen Niederschlagsmengen** (vgl. Abbildung 6-9). Diese nimmt ebenfalls bereits in der nahen Zukunft vor allem in den Randbereichen von Niedersachsen zu. In der fernen Zukunft verstärkt sich dieser Effekt vor allem im Winterhalbjahr. Hier nimmt die Häufigkeit in der Größenordnung von etwa +10 bis +70% gegenüber dem Referenzzeitraum zu. Die räumlichen Schwerpunkte liegen dabei tendenziell im nördlichen Niedersachsen.

Auch die **Dauer von Niederschlagsereignissen** verändert sich in der Zukunft unter dem Szenario RCP8.5. So nimmt die maximale Dauer von Niederschlagsereignissen bereits in der nahen Zukunft regional leicht ab. In der fernen Zukunft kommt es in weiten Teilen des Landes zu mehr oder weniger deutlichen Abnahmen der maximalen Niederschlagsdauer. Besonders ausgeprägt ist dies im Sommerhalbjahr (Größenordnung -20 bis +5%). Auch die mittlere Dauer von Niederschlagsereignissen zeigt leichte Abnahmen, vor allem am Ende des Jahrhunderts im Sommerhalbjahr. Diese sind zwar landesweit erkennbar, aber nicht so stark ausgeprägt wie die Abnahmen der maximalen Dauer (Größenordnung -10 bis 0%).

Wie in Abbildung 6-1 verdeutlicht wurde, umfassen die Ergebnisse der klimatischen Veränderungen in der Zukunft auf Basis eines Modell-Ensembles immer auch Unsicherheiten in Form einer Bandbreite von Werten. In Abbildung 6-12 werden diese Bandbreiten für die Temperatur-Kenngrößen anhand des Verlaufs der jeweiligen Gebietsmittel für Niedersachsen dargestellt. Es wird deutlich, dass alle Temperatur-Kenngrößen unter dem RCP8.5, trotz einer leicht zunehmenden Bandbreite in den Ergebnissen, eine Steigerung in der Zukunft erfahren. Diese Steigerung fällt in der fernen Zukunft noch deutlich größer aus als in der nahen Zukunft. Da die Modelldaten bereits zu Beginn des 21. Jahrhunderts mit den zukünftigen THG-Emissionen des Szenarios angetrieben werden, gibt es einen kurzen Zeitraum von etwa 15 Jahren, in dem sowohl Beobachtungsdaten als auch Szenariendaten

vorliegen. Hier fällt auf, dass sich die Beobachtungsdaten der maximalen und mittleren Temperaturen in diesem Zeitraum bereits häufig am oberen Ende der Bandbreite des Ensembles bewegen. Die gleiche Form der Darstellung erfolgt für ausgewählte Niederschlag-Kenngrößen in Abbildung 6-13. Hier zeigen die Ensemble-Ergebnisse der Niederschlagssummen im Sommerhalbjahr etwas größere Bandbreiten als im Winterhalbjahr. Gleichzeitig sind im Sommer sowohl Zunahmen als auch Abnahmen möglich, während im Winter eher Zunahmen zu erwarten sind. Das 90%-Quantil der Niederschläge weist ebenfalls im Sommer größere Bandbreiten auf. Die Richtungstendenz des Ensembles zeigt hierbei jedoch in den meisten Fällen (d.h. Modellläufen) eine Zunahme an. Das Gleiche gilt bei kleineren Bandbreiten auch für das Winterhalbjahr. Beim maximalen 3-Tages-Niederschlag besitzt das Ensemble im Winterhalbjahr eine größere Bandbreite als im Sommerhalbjahr, vor allem gegen Ende des 21. Jahrhunderts. Trotzdem weisen die Ergebnisse hier insgesamt auf

Zunahmen, während im Sommerhalbjahr bei einer kleineren Bandbreite keine eindeutige Richtung der Entwicklung vorliegt. Bei der Häufigkeit größerer Niederschlagsereignisse liegt wieder im Sommerhalbjahr eine größere Bandbreite vor, bei gleichzeitig uneinheitlichen Entwicklungstendenzen. Im Winterhalbjahr ist die Bandbreite kleiner und die Entwicklungsrichtung der meisten Modelle zeigt eine Zunahme an. Bei all diesen Kenngrößen liegen die Beobachtungsdaten häufig am oberen Rand der Ensemble-Bandbreite. Vor allem im Sommerhalbjahr weisen die beobachteten Werte hierbei einen Verlauf auf, der zumeist noch oberhalb der oberen Bandbreite liegt. Die maximale und mittlere Dauer von Niederschlagsereignissen zeigen beide insgesamt ähnliche Entwicklungen. Die Bandbreiten im Sommer- wie im Winterhalbjahr sind etwa gleich groß. Die Entwicklungstendenzen sind eher uneinheitlich, wobei die meisten Modelle des Ensembles zukünftig eine Verringerung der Niederschlagsdauer anzeigen.

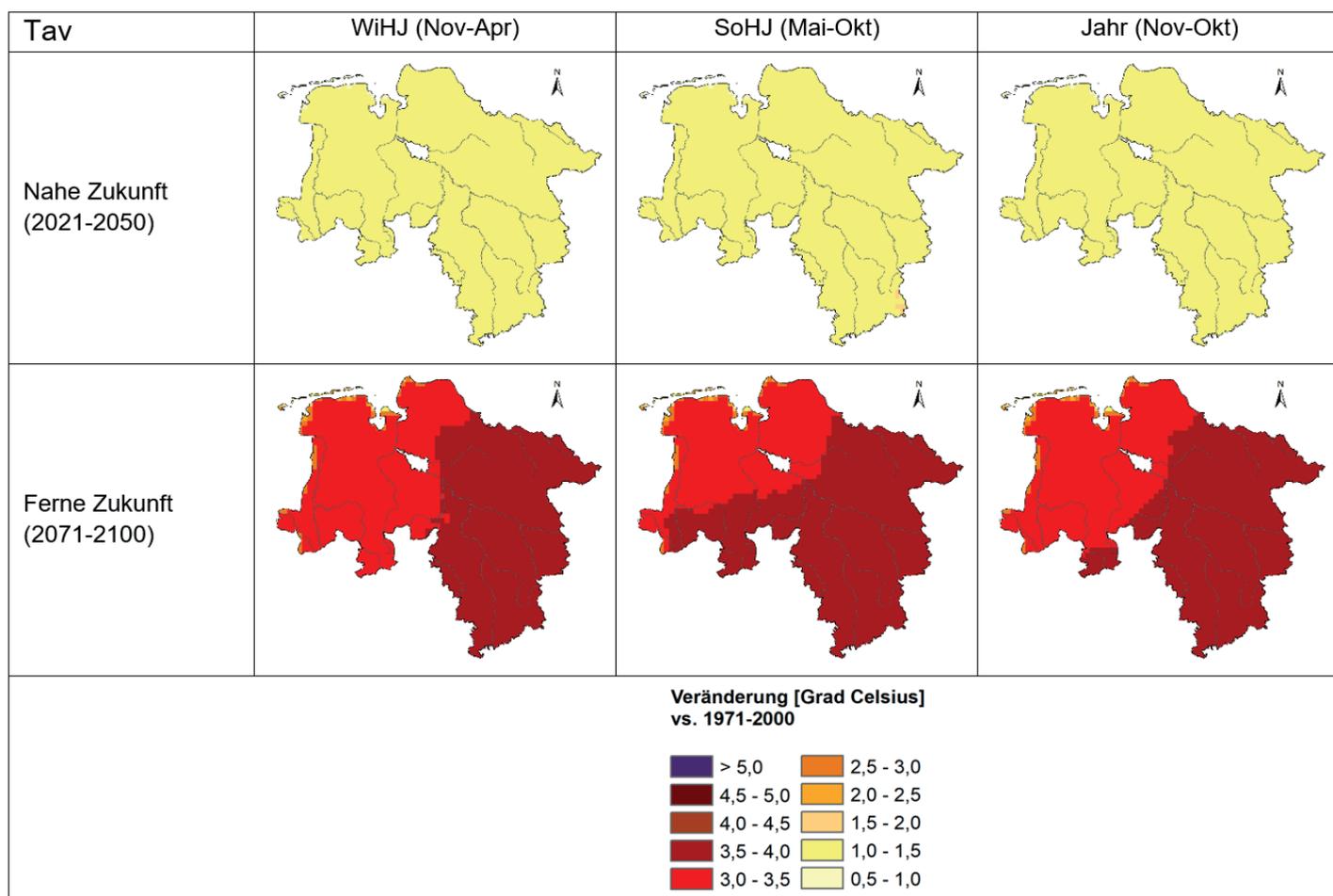


Abbildung 6-2: Mittlere Veränderung der Tagesmitteltemperaturen in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5

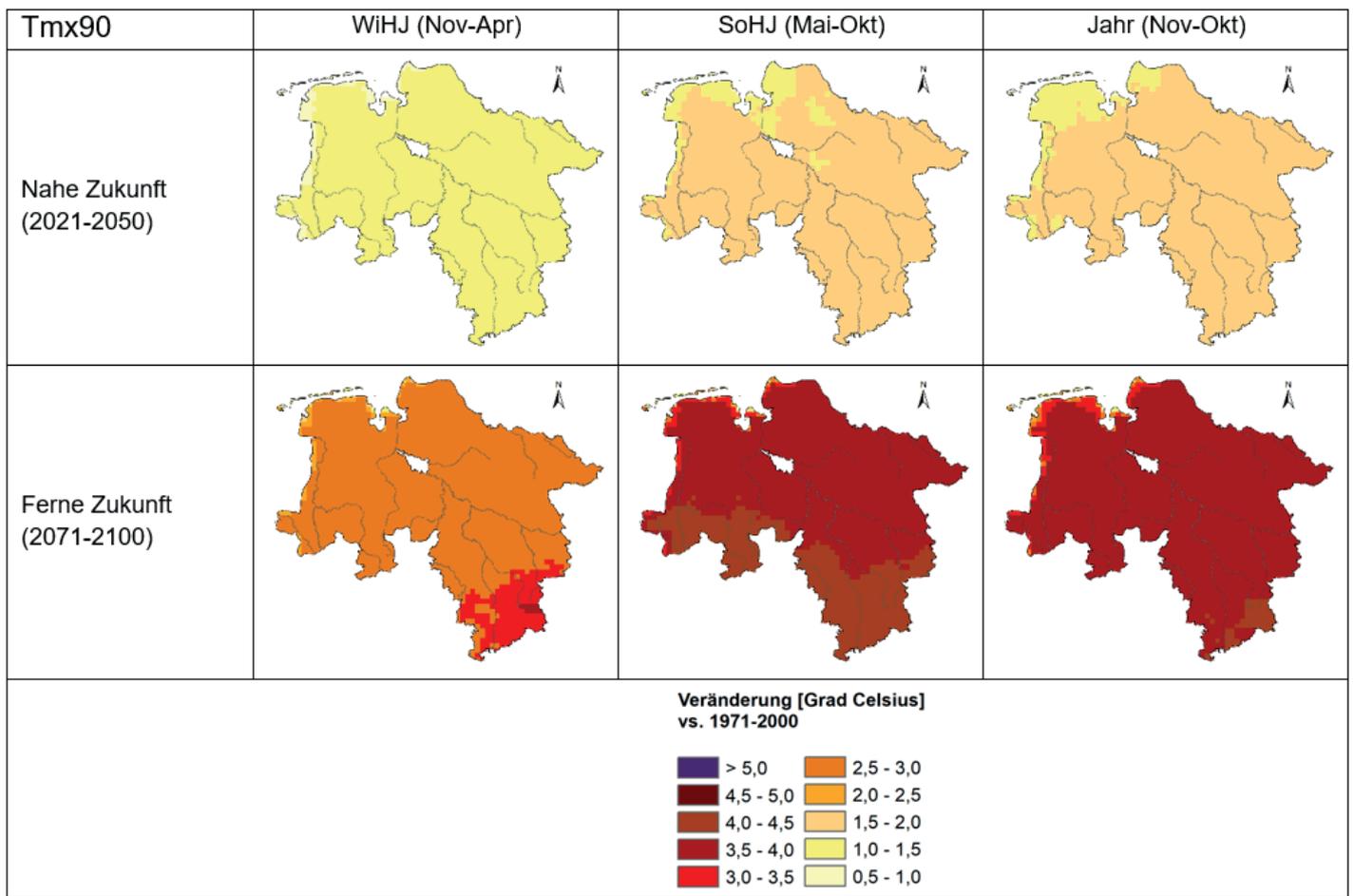


Abbildung 6-3: Mittlere Veränderung der Tagesmaximumtemperaturen in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5

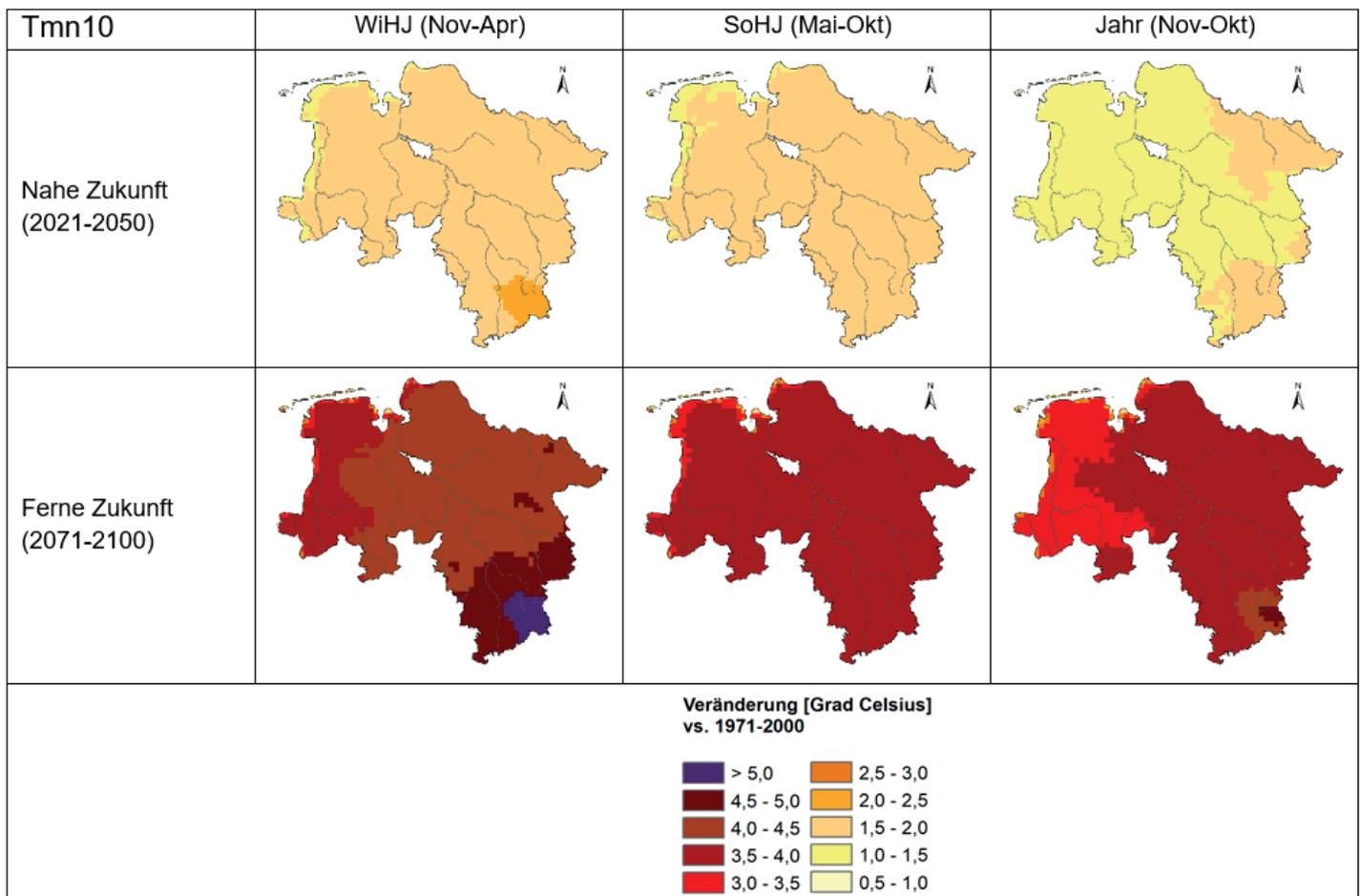


Abbildung 6-4: Mittlere Veränderung der Minimumtemperaturen in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5

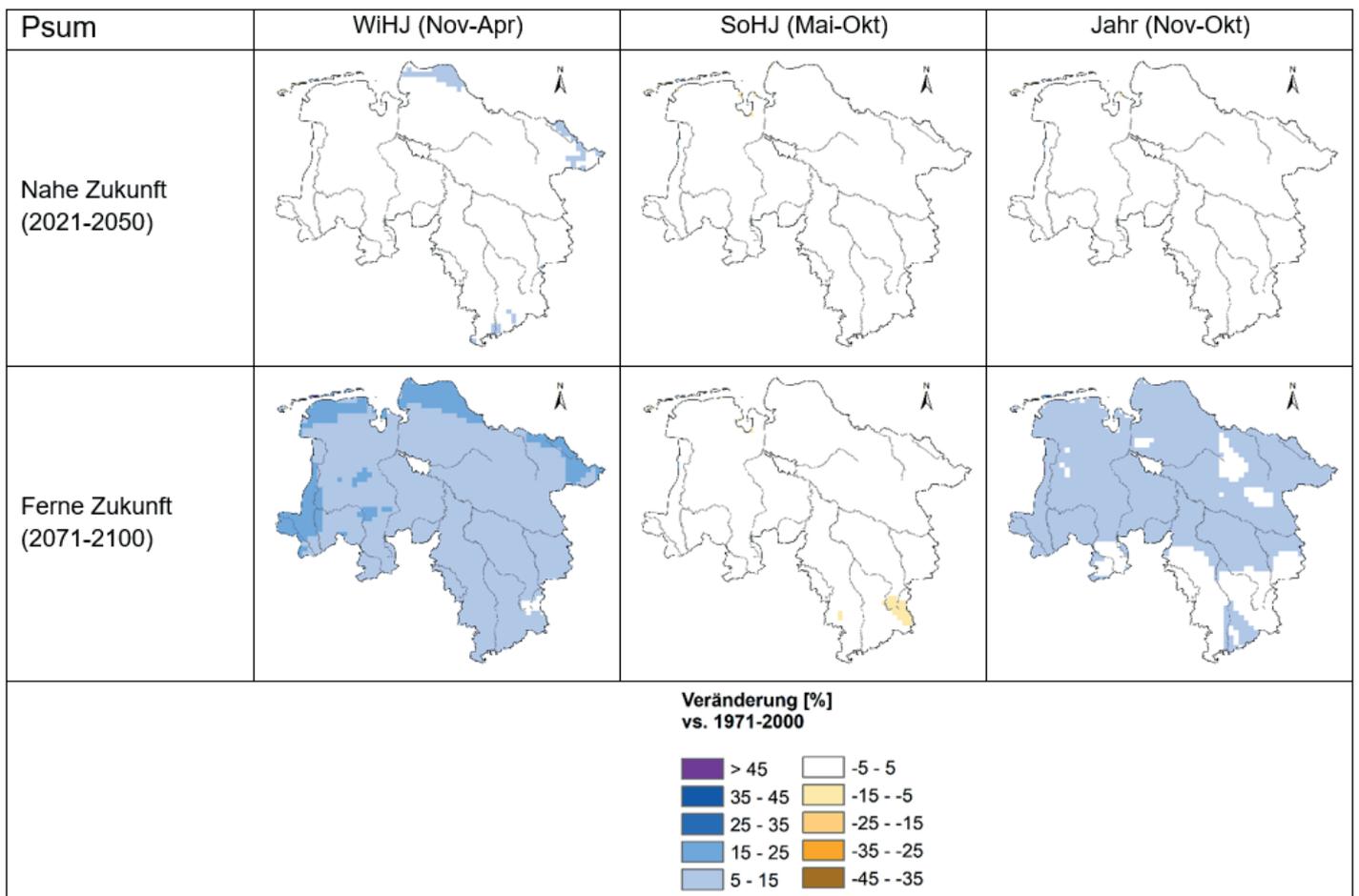


Abbildung 6-5: Mittlere Veränderung der Niederschlagssummen in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5

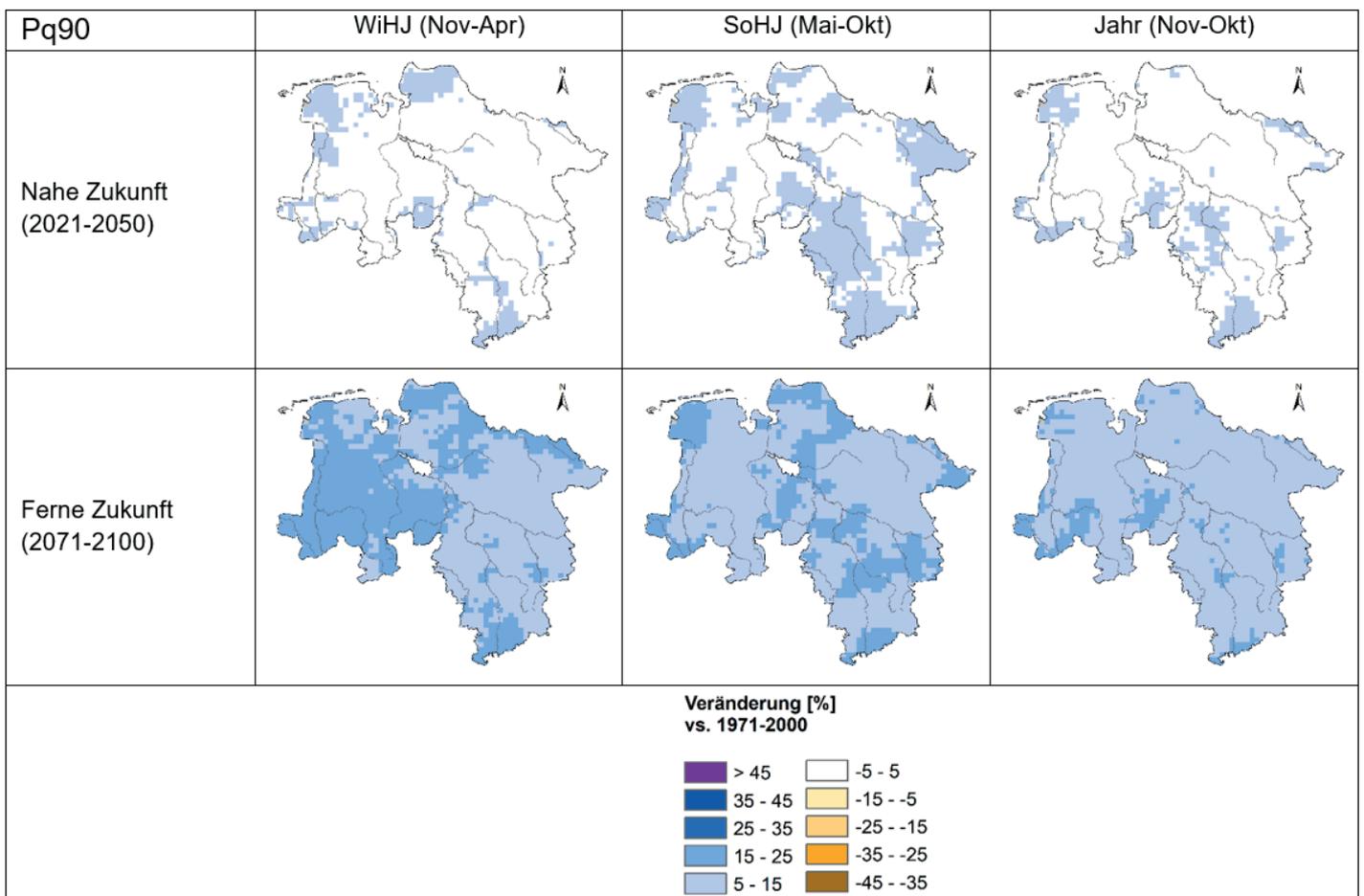


Abbildung 6-6: Mittlere Veränderung des 90%-Quantils der Niederschläge in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5

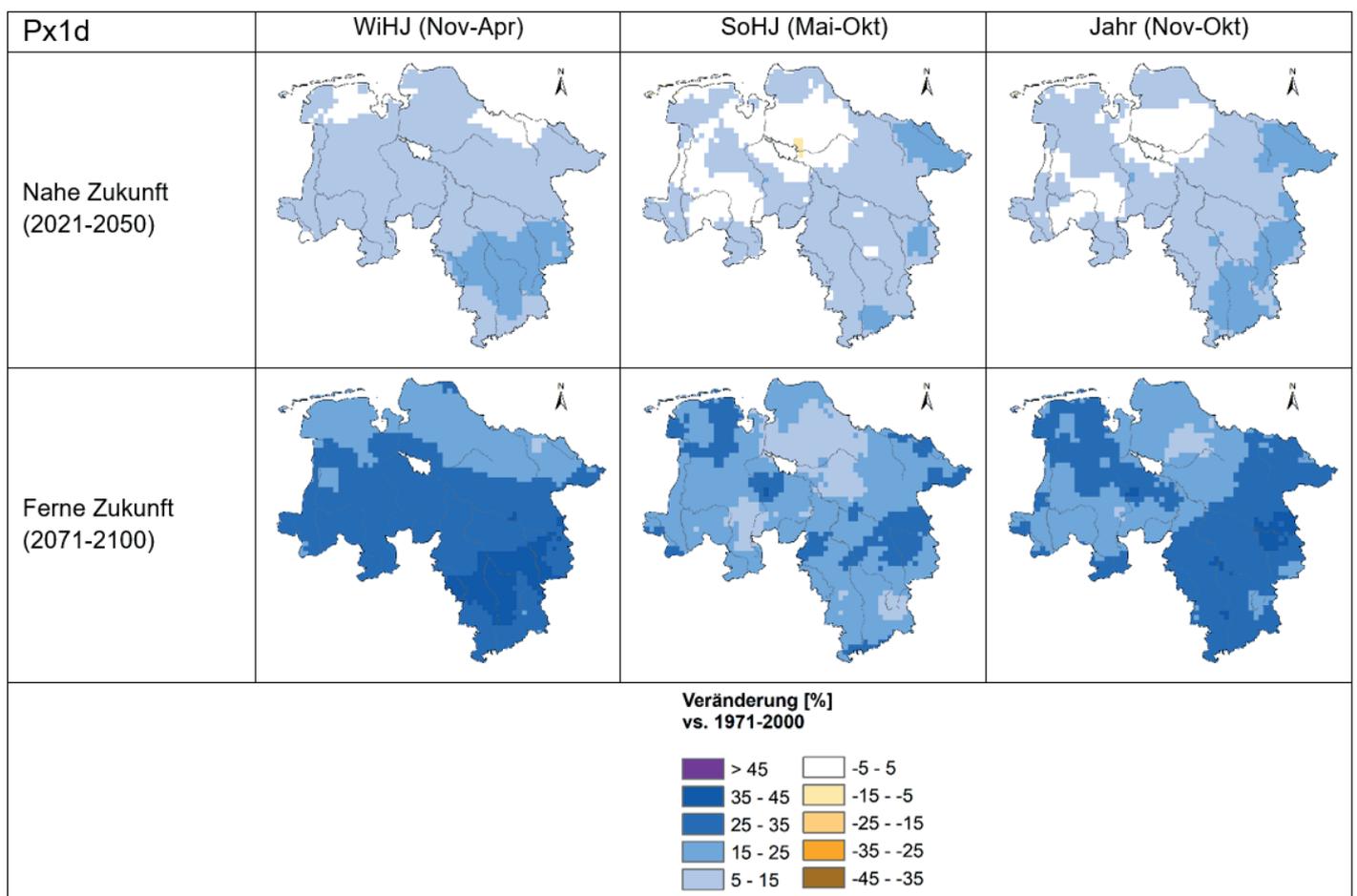


Abbildung 6-7: Mittlere Veränderung der max. 1-Tages-Niederschläge in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5

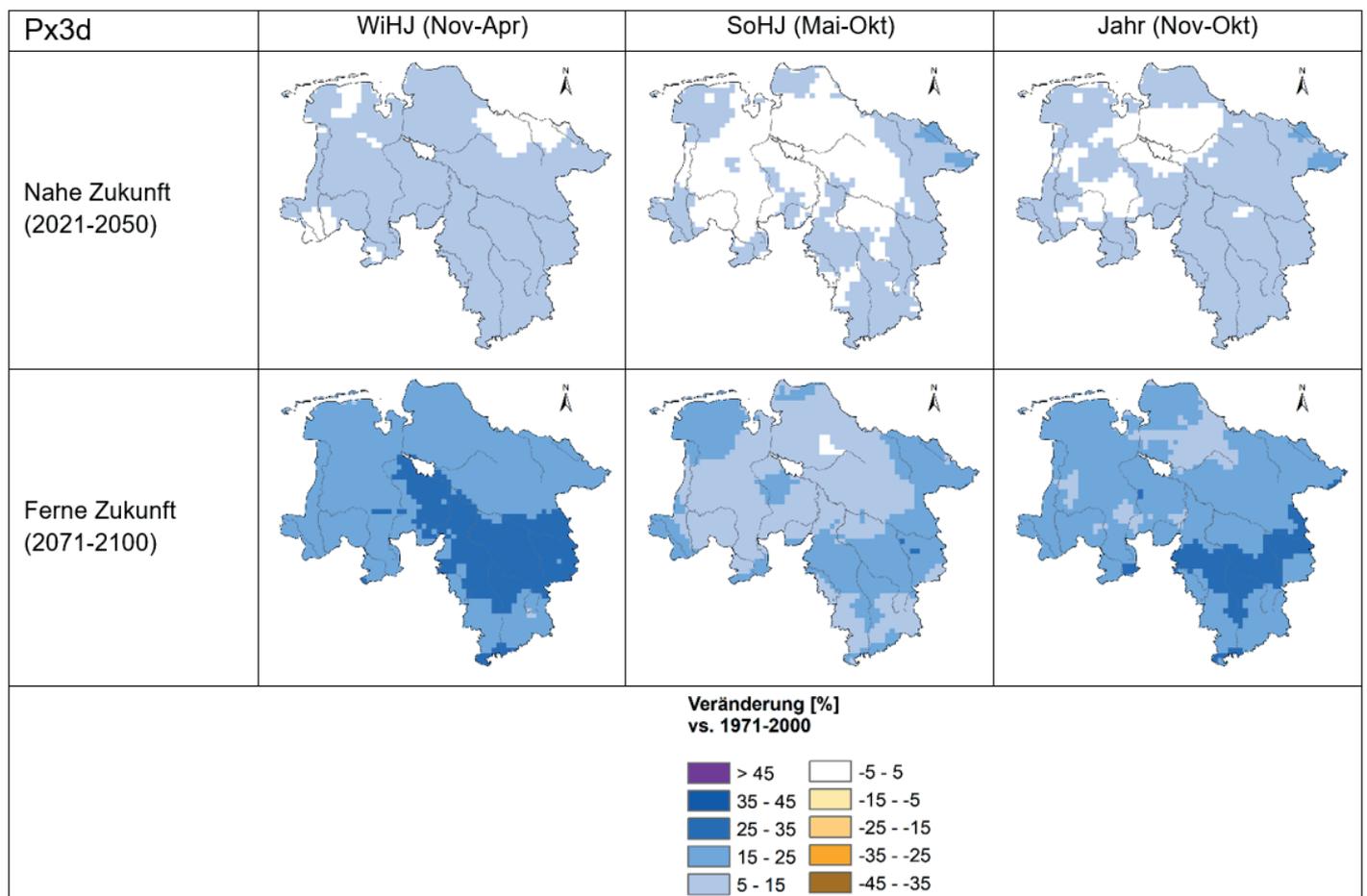


Abbildung 6-8: Mittlere Veränderung der max. 3-Tages-Niederschläge in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5

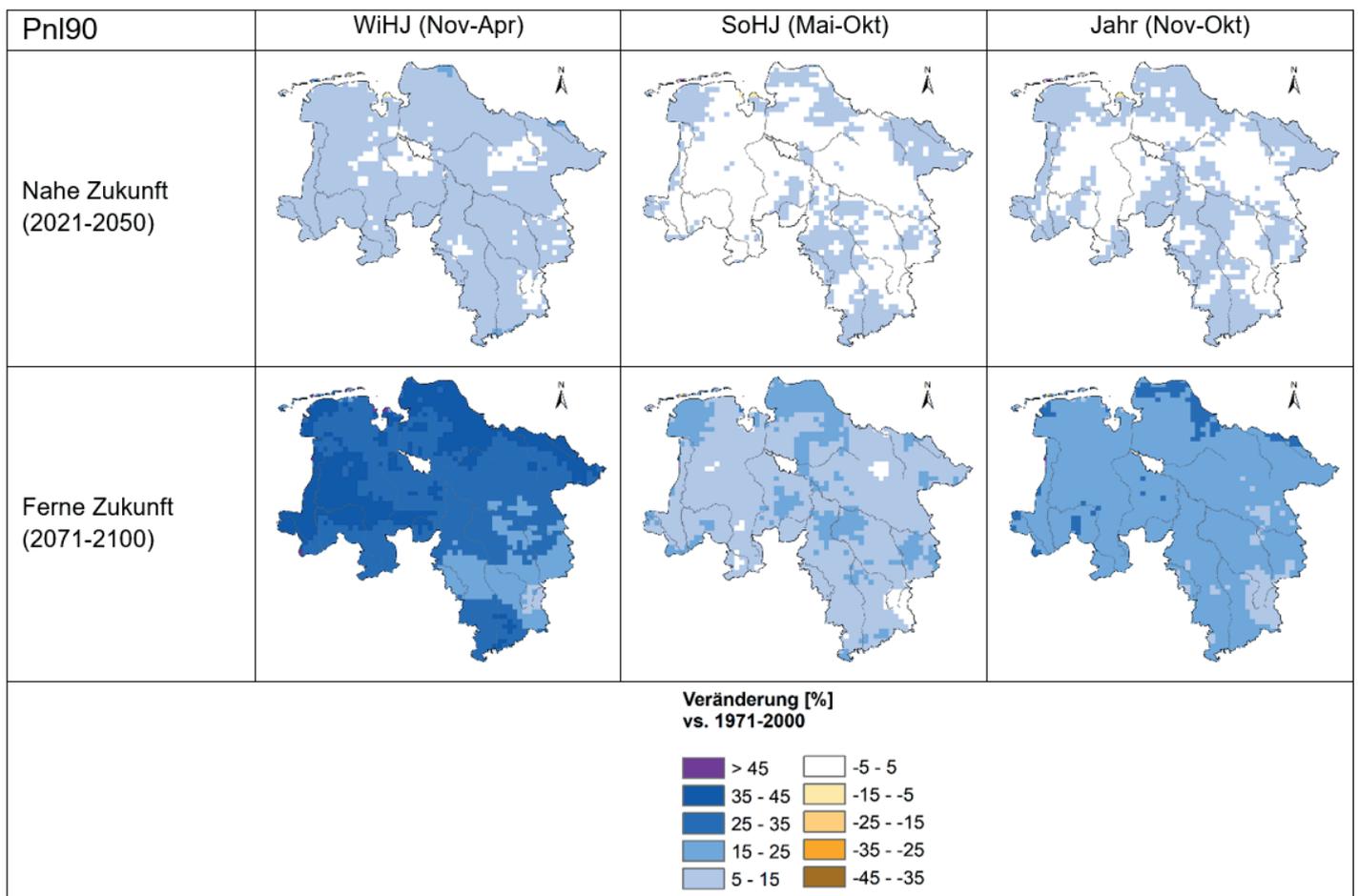


Abbildung 6-9: Mittlere Veränderung der Häufigkeit großer Niederschlagsereignisse in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5

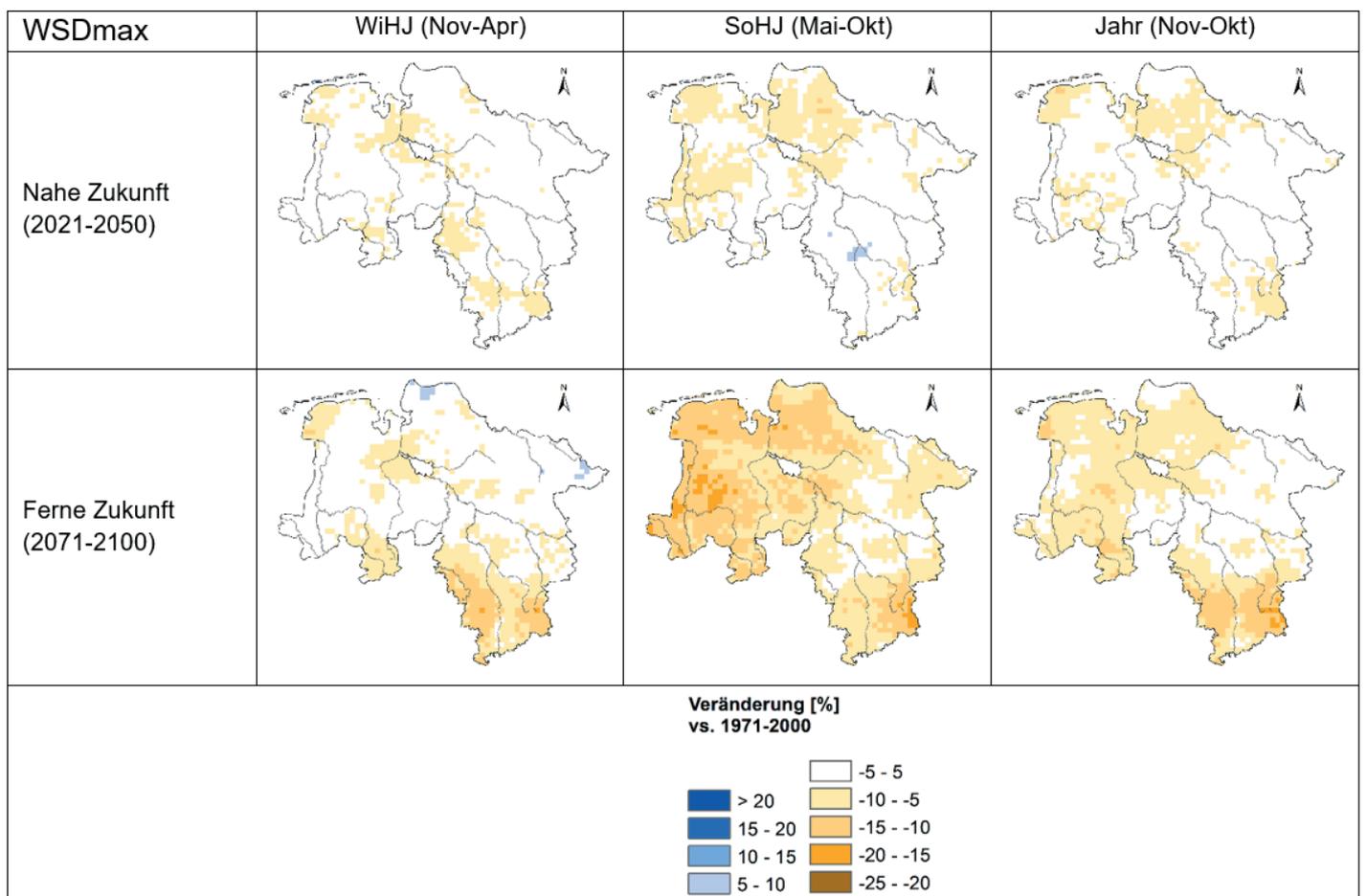


Abbildung 6-10: Mittlere Änderung der max. Dauer von Niederschlagsereignissen in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5

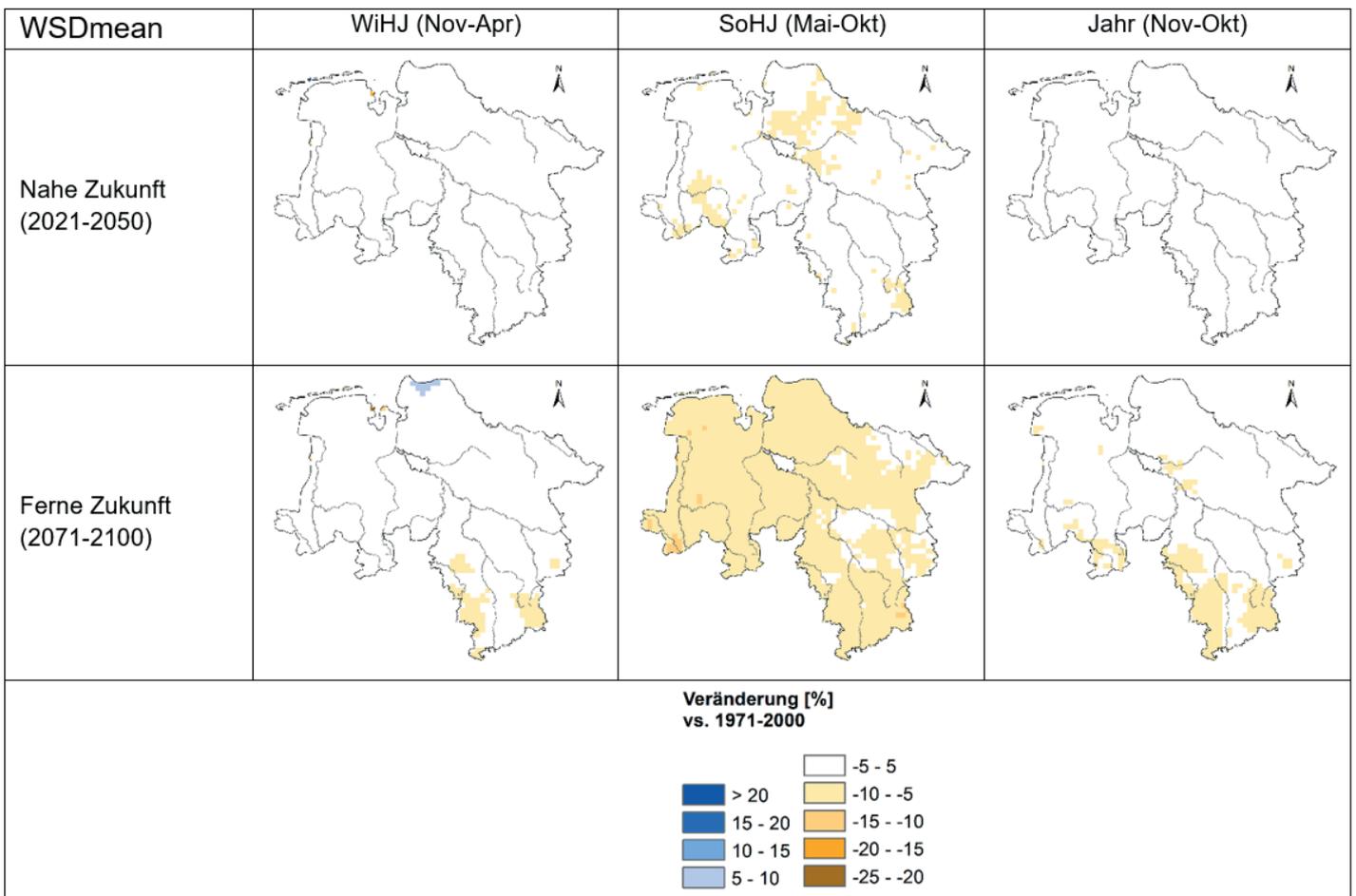


Abbildung 6-11: Mittlere Änderung der mit. Dauer von Niederschlagsereignissen in Niedersachsen unter dem Szenario RCP8.5

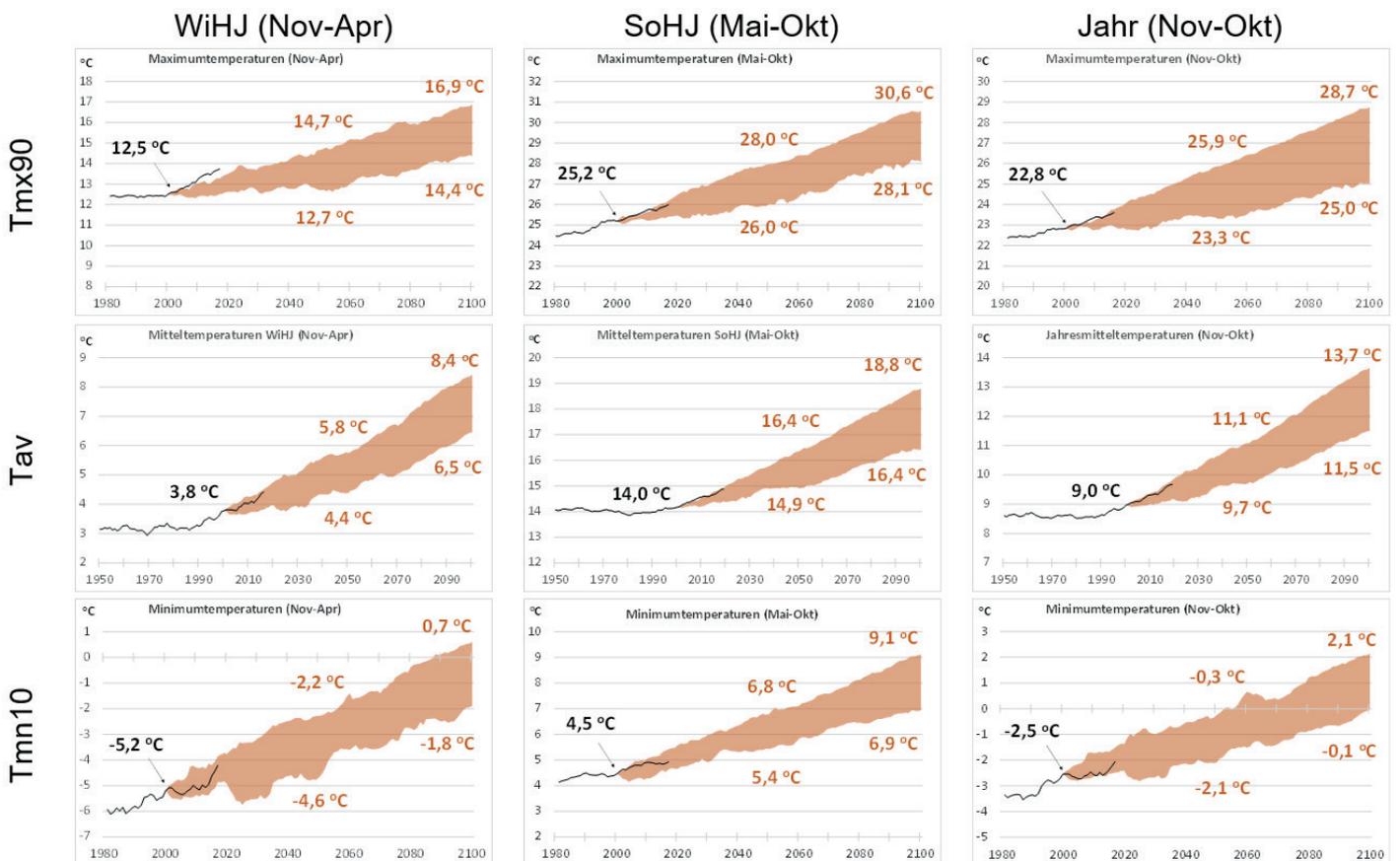


Abbildung 6-12: Zeitliche Entwicklung der Kenngrößen Maximumtemperatur (Tmx90), Mitteltemperatur (Tav) und Minimumtemperatur (Tmn10) für Niedersachsens als gleitende 30-jährige Mittelwerte von der Vergangenheit bis in die Zukunft. Schwarze Linie: Beobachtungsdaten des DWD (mit Wert für 1971-2000), farbige Fläche: Bandbreite auf Basis des Kern-Ensembles für das Szenario RCP8.5 (mit Werten für obere / untere Bandbreite für 2021-2050 und 2071-2100)

6.4 Zusammenfassung

Die zukünftigen klimatischen Entwicklungen in Niedersachsen weisen unter den Annahmen des Szenarios ohne Klimaschutz (RCP8.5) trotz leichter Bandbreiten in den Ergebnissen auf deutliche, landesweite Zunahmen der Temperaturen. Dies gilt sowohl für die maximalen, die mittleren als auch für die minimalen Temperaturen. Räumlich betrachtet gibt es hierbei ein leichtes Gefälle von Südost nach Nordwest. Temperaturextreme (Minimum / Maximum) würden stärker zunehmen als die Mittelwerte. Bereits heute liegen die beobachteten Temperaturwerte zumeist am oberen Rand der Bandbreite der Projektionen.

Auch die Niederschlagsmengen würden insgesamt zunehmen. Dies gilt vor allem für Extremereignisse (auch bzgl. deren Häufigkeit) und für das Winterhalbjahr. Hier sind die Tendenzen häufig landesweit bereits zur Mitte des 21. Jahrhunderts erkennbar. Räumliche Schwerpunkte bilden der Süden und Westen. Die Entwicklungen im Sommerhalbjahr sind weniger eindeutig. Hier ist die Bandbreite der Ergebnisse zumeist größer und reicht von leichten Abnahmen bis zu deutlichen Zunahmen, die regional bereits zur Mitte des Jahrhunderts zu erkennen sind. Die Entwicklung der Niederschlagssummen im Sommerhalbjahr ist uneinheitlich. Auch bei diesen Größen liegen die beobachteten Werte häufig am oberen Rand der projizierten Bandbreiten, vor allem im Sommerhalbjahr. Die Dauer von Niederschlagsereignissen würde tendenziell abnehmen, vor allem im Sommerhalbjahr. Im Winterhalbjahr lassen die Bandbreiten in den Ergebnissen zur Dauer keine eindeutige Tendenz erkennen.

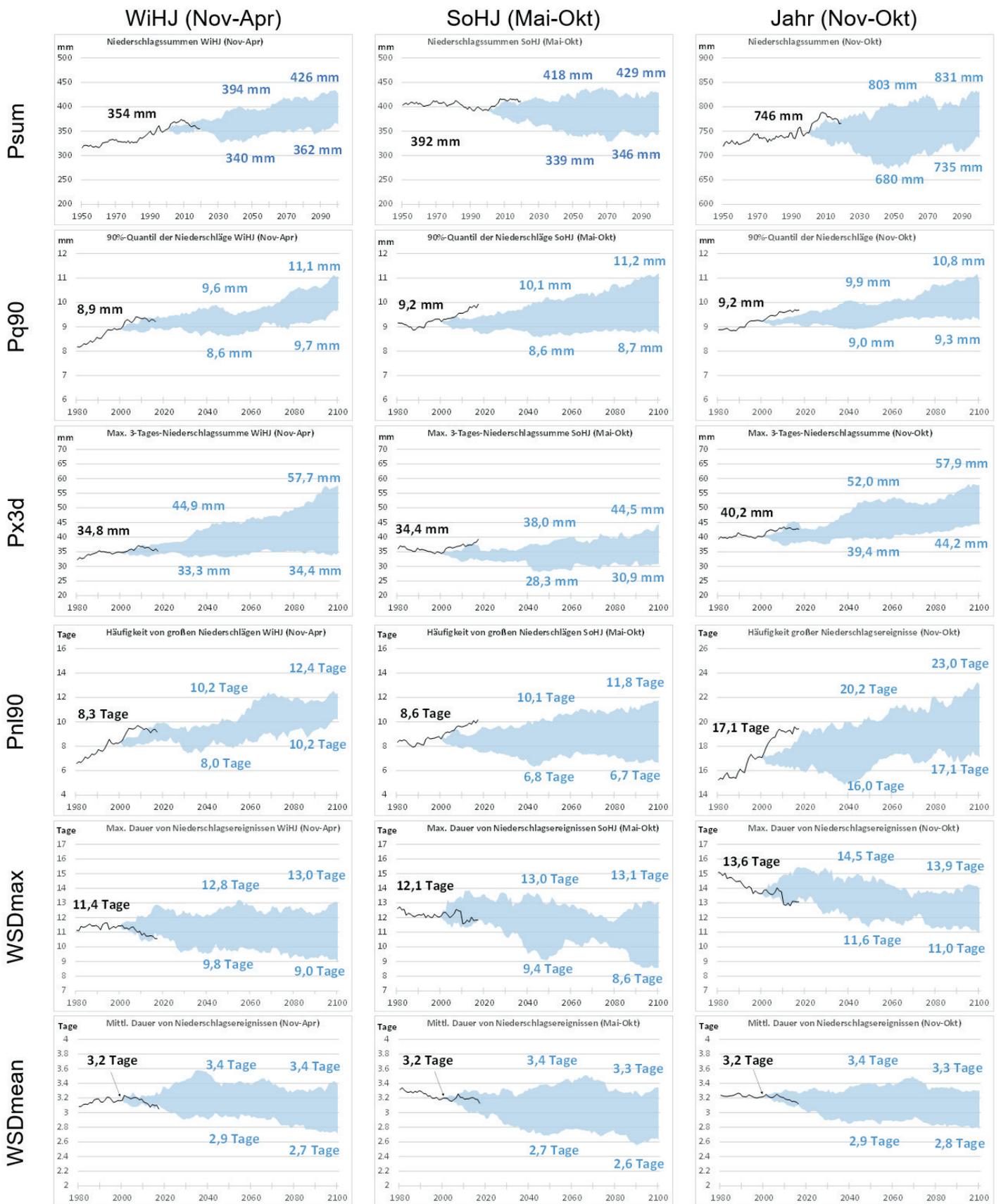


Abbildung 6-13: Zeitliche Entwicklung der Kenngrößen Niederschlagssumme (Psum), 90%-Quantil der Niederschläge (Pq90), max. 3-Tages-Niederschlag (Px3d), Häufigkeit großer Niederschläge (Pnl90) sowie maximale Niederschlagsdauer (WSDmax) und mittlere Niederschlagsdauer (WSDmean) für Niedersachsen als gleitende 30-jährige Mittelwerte von der Vergangenheit bis in die Zukunft. Schwarze Linie: Beobachtungsdaten des DWD (mit Wert für 1971-2000), farbige Fläche: Bandbreite auf Basis des Kern-Ensembles für das Szenario RCP8.5 (mit Werten für obere / untere Bandbreite für 2021-2050 und 2071-2100)

6.5 Vergleich der Ergebnisse mit den Erkenntnissen aus KliBiW Phase 4

Wie in Kapitel 5.2 angedeutet, wurden bereits in der Phase 4 von KliBiW die zukünftigen Klima- und Hochwasserverhältnisse in Niedersachsen auf Basis eines Ensembles von Klimamodellen betrachtet. Das damalige Modell-Ensemble unterscheidet sich in seinen Eigenschaften von dem Ensemble der Phase 6.

Zunächst umfassen beide Ensembles unterschiedliche Klimamodelle (siehe Tabelle 5-2). In KliBiW 4 wurden acht dynamische Regionalmodelle herangezogen. Die Auswahl erfolgte im Wesentlichen auf Grundlage der Verfügbarkeit von Modellläufen für das Szenario RCP8.5 zum damaligen Zeitpunkt. Jeder Modelllauf wurde dabei einer einfachen Plausibilitätskontrolle unterzogen. In KliBiW 6 umfasst das Ensemble sechs dynamische und zwei statistische Regionalmodelle. Die Auswahl der Modellläufe erfolgte auf Basis einer umfangreichen Kontrolle der Plausibilität und Modellgüte sowie anhand eines Verfahrens zur Reduzierung der Ensemble-Mitglieder bei gleichzeitiger Wahrung der Bandbreite (vgl. Kapitel 5.2).

Das Ergebnis dieser Vorgehensweise bildet das sog. Kern-Ensemble, welches 80-90% der Bandbreite der möglichen klimatischen Entwicklungen der Zukunft unter dem Szenario RCP8.5 abbildet.

Des Weiteren unterscheiden sich die Ensembles hinsichtlich der räumlichen Auflösung der Original-Daten. Während die Mitglieder von KliBiW 4 im Raster von EURO-CORDEX mit einer Auflösung von 12,5x12,5 km vorlagen, wurde die Auflösung der dynamischen Regionalmodelle von KliBiW 6 im Zuge der Aufbereitung an das Raster der HYRAS-Daten angepasst und auf 5x5 km verfeinert. (Die zwei statistischen Modelle lagen weiterhin im 12,5x12,5 km Raster vor.)

Zu guter Letzt unterscheiden sich die Ensembles im Hinblick auf die Verfahren zur Anpassung der systematischen Abweichungen gegenüber eines (beobachteten) Referenzdatensatzes. Während in KliBiW 4 projektintern das Verfahren des Linear Scalings Univariat auf ausgewählte Modelldaten angewendet wurde, erfolgte die Anpassung aller Daten in KliBiW 6 im Wesentlichen mittels multivariater Verfahren (v.a. Quantil Mapping).

Tabelle 6-1: Gegenüberstellung der Eigenschaften der Klimamodell-Ensemble von KliBiW Phase 4 und Phase 6

Projekt	KliBiW 4 ¹⁾	KliBiW 6 ²⁾
Laufzeit	2014-2017	2019-2021
Szenario	RCP8.5 (ohne Klimaschutz)	RCP8.5 (ohne Klimaschutz)
Anzahl Klimamodelle	8	8
Modelltypen	Dynamische Regionalmodelle (RCM)	Dynamische Regionalmodelle (RCM), Statistische Regionalmodelle (ESD)
Auswahlkriterien	Historisch bedingte Verfügbarkeit; einfache Plausibilitätskontrolle	Ausführliche Prüfung von Plausibilität und Modellgüte; Abbildung der maximal möglichen Bandbreite zukünftiger Entwicklung
Räumliche Auflösung	12,5x12,5 km	5x5 km (RCM), 12,5x12,5 km (ESD)
Zeitliche Auflösung	Tageswerte	Tageswerte
Bias-Adjustierung	Univariat (Linear Scaling); für Temperatur und Niederschlag	Multivariat (Quantil Mapping); für alle Klima-Kenngrößen

1) Details siehe NLWKN (2017)

2) Detail siehe Kapitel 5.2

Der Vergleich der Entwicklungen der Temperatur-Kenngrößen bzw. deren Veränderung in der Zukunft ist für das Gebietsmittel von Niedersachsen für beide Ensembles in Abbildung 6-14 dargestellt. Die Analysen zeigen, dass die Veränderungen in KliBiW 4 und KliBiW 6 grundsätzlich in die gleiche Richtung gehen. Beide Ensembles projizieren eine deutliche Zunahme der maximalen, mittleren und minimalen Temperaturen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Dabei zeigt das Kern-Ensemble von KliBiW 6 bei allen Kenngrößen im oberen Bereich der Bandbreite größere Änderungswerte an, besonders bei den Maximumtemperaturen. Ebenso liegen die mittleren Tendenzen (dargestellt als durchgezogene Linie) in KliBiW 6 häufig etwas oberhalb von KliBiW 4.

Auch bei den Niederschlag-Kenngrößen, die in Abbildung 6-15 dargestellt sind, tendieren beide Ensembles prinzipiell in die gleiche Richtung. Allerdings zeigen sich auch hier

Unterschiede in den Bandbreiten der minimal bzw. maximal projizierten Änderungswerte. So deutet das Ensemble von KliBiW 6 bei den Niederschlagssummen (Psum) tendenziell Zunahmen an. Im unteren Bereich zeigen sich jedoch größere Bandbreiten als in KliBiW 4, d.h. es kann im Extremfall hier auch zu Abnahmen kommen, vor allem im Sommerhalbjahr. Beim 90%-Quantil zeigen beide Ensembles bei ähnlichen Bandbreiten tendenziell eine Zunahme der Werte an. Insgesamt liegen die Änderungswerte von KliBiW 6 aber etwas unter denen von KliBiW 4. Dies führt dazu, dass vor allem im Sommerhalbjahr auch leichte Abnahmen möglich sind. Der maximale 3-Tages-Niederschlag weist bei beiden Ensembles ebenfalls zunehmende Tendenzen auf. Das Kern-Ensemble zeigt jedoch im Winterhalbjahr eine deutlich größere Bandbreite, vor allem im oberen Bereich. Dies macht wesentlich größere Niederschlagsmengen im Extremfall in der Zukunft möglich. Im Sommerhalbjahr sind die Bandbreiten ähnlich,

die Änderungswerte von KliBiW 6 sind aber insgesamt etwas kleiner bzw. leicht negativ. Bei der Anzahl von Tagen mit größeren Niederschlagsmengen (PnI90) weisen beide Ensembles eine zunehmende Tendenz sowie eine ähnliche Bandbreite auf. Insgesamt liegen die Werte von KliBiW 6 aber etwas tiefer, was vor allem im Sommerhalbjahr in der unteren Bandbreite zu möglichen Abnahmen der Häufigkeit führt. Bei der maximalen und mittleren Dauer von Niederschlagsereignissen weisen beide Ensembles abnehmende Tendenzen auf, d.h. in der Zukunft werden Niederschlagsereignisse kürzer dauern. Allerdings fallen die Veränderungen anhand des Kern-Ensembles aus KliBiW 6 deutlicher aus. Dies zeigt sich sowohl anhand einer z.T. deutlich größeren Bandbreite im unteren Bereich (d.h. stärker negative Änderungswerte) als auch anhand der mittleren Tendenzen, die sich in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts im negativen Bereich bewegen. In KliBiW 4 bewegten sich die Veränderungen hier um den Nullbereich.

Insgesamt zeigt sich, dass unter dem Szenario RCP8.5 auf Basis des Kern-Ensembles von KliBiW 6 in der Zukunft die Temperaturen noch deutlicher zunehmen können, als es die Ergebnisse aus KliBiW 4 gezeigt haben. Dies betrifft vor allem die Maximaltemperaturen. Gleichzeitig fallen die Zunahmen der Niederschlagssummen etwas geringer aus, was im Sommerhalbjahr zu keiner eindeutigen Richtungstendenz der Entwicklungen führt. Die Zunahmen der Niederschlagsmengen bei Extremereignissen fallen in KliBiW 6 im Winterhalbjahr größer aus, während die Anzahl von Tagen mit größeren Niederschlägen zwar ebenfalls zunehmen, aber nicht so deutlich wie es die Ergebnisse in KliBiW 4 zum Ausdruck gebracht haben. Die Dauer von Niederschlagsereignissen verkürzt sich in KliBiW 6 stärker als in KliBiW 4, bei etwa gleicher Bandbreite.

Damit werden die Tendenzen der zukünftigen klimatischen Verhältnisse unter dem Szenario RCP8.5 von KliBiW 4 durch das Kern-Ensemble in KliBiW 6 grundsätzlich bestätigt. Gleichwohl stellen sich die neuen Ergebnisse im Mittel etwas wärmer und trockener dar, bei gleichzeitig etwas kürzeren und dafür intensiveren Niederschlägen.

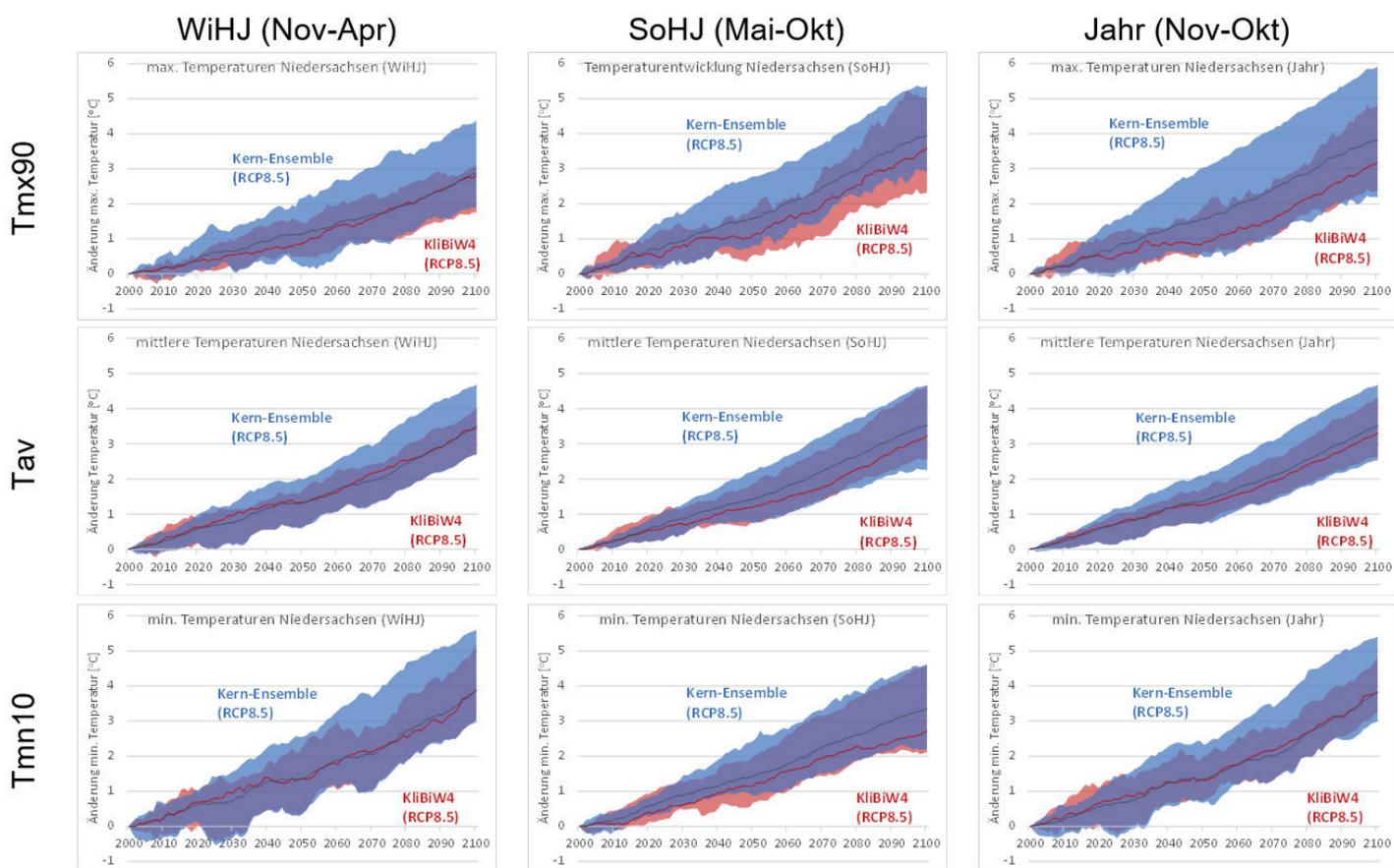


Abbildung 6-14: Bandbreiten der 30jährigen gleitenden Mittel der Veränderung von maximalen Temperaturen (Tmx90), mittleren Temperaturen (Tav) und minimalen Temperaturen (Tmn10) in Niedersachsen auf Basis der Modell-Ensemble von KliBiW 4 (rot) und KliBiW 6 (blau), bezogen auf den Referenzzeitraum 1971-2000. Die durchgezogenen farbigen Linien zeigen die mittlere Tendenz des jeweiligen Ensembles.

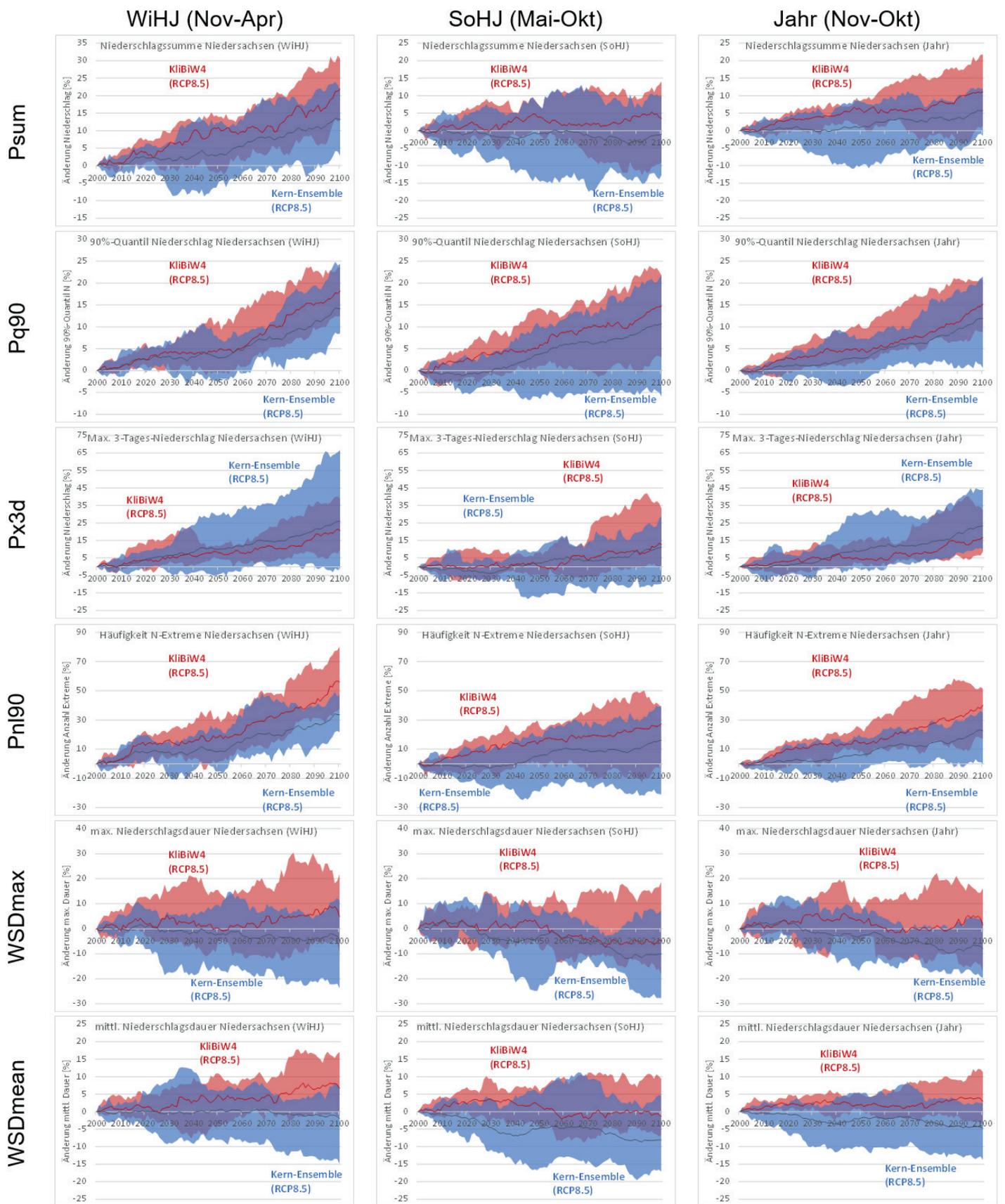


Abbildung 6-15: Bandbreiten der 30jährigen gleitenden Mittel der Veränderung von Niederschlagssummen (Psum), 90%-Quantil der Niederschläge (Pq90), max. 3-Tages-Niederschlag (Px3d), Häufigkeit großer Niederschläge (Pnl90) sowie der maximalen Niederschlagsdauer (WSDmax) und mittleren Niederschlagsdauer (WSDmean) in Niedersachsen auf Basis der Modell-Ensemble von KliBiW 4 (rot) und KliBiW 6 (blau), bezogen auf den Referenzzeitraum 1971-2000. Die durchgezogenen farbigen Linien zeigen die mittlere Tendenz des jeweiligen Ensembles.

7 Analyse der möglichen hydrologischen Verhältnisse der Zukunft

Die Simulation der hydrologischen Verhältnisse wurde mit dem hydrologischen Modell PANTA RHEI durchgeführt. Der Fokus der Modellierung mit PANTA RHEI lag auf der Simulation von mittleren und großen Pegelgebieten der Risikogewässer in Niedersachsen nach HWRM-RL. Zusätzlich wurden in der Projektphase 6 einige weitere Pegel mit kleineren Einzugsgebieten (Kopfgebiete) innerhalb der bisherigen Flussgebiete hinzugenommen, um differenziertere Aussagen über die hydrologischen Verhältnisse der Zukunft in Niedersachsen zu ermöglichen.

Die in KliBiW Phase 6 verwendete Methodik beruht auf jener, die in der Projektphase 4 angewendet und beschrieben wurde (NLWKN 2017).

7.1 Modellierung veränderter zukünftiger Abflussverhältnisse mit dem hydrologischen Modellsystem PANTA RHEI (TU BS)

Um die zukünftige Veränderung des Landschaftswasserhaushalts sowie die zukünftige Abflusssituation in Niedersachsen ermitteln zu können, werden Wasserhaushaltsmodelle eingesetzt. Sie berücksichtigen das komplexe Zusammenwirken von Klimakenngrößen, Wasserhaushalt und weiteren Gegebenheiten wie den Bodeneigenschaften und der Landnutzung. Mit Wasserhaushaltsmodellen ist es möglich, wesentliche Komponenten des Wasserhaushalts wie Verdunstung, Wasserspeicherung im Boden und den Abfluss im Gewässer in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung zu berechnen. Dadurch kann die Einwirkung von klimatischen Änderungen auf den Wasserhaushalt und das Abflussverhalten auf Basis der Klimaprojektionen ermittelt werden.

Für die Analyse möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und insbesondere auf das Hochwasserrisiko wurden in KliBiW Phase 6 kontinuierliche hydrologische Simulationen für sieben Einzugsgebiete in Niedersachsen mit dem hydrologischen Modellsystem PANTA RHEI durchgeführt. Dieses Modellsystem wurde von der Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau an der TU Braunschweig in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wassermanagement IfW GmbH entwickelt. PANTA RHEI bietet eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten und wird beispielsweise in der operationellen Hochwasservorhersage, bei der Berechnung von Bemessungsabflüssen sowie in der Klimafolgenforschung eingesetzt (NLWKN, 2015; Kreye et al, 2017).

7.2 Modellbeschreibung

PANTA RHEI ist ein deterministisches, semidistributives Modell mit einer räumlichen Disaggregation in drei Ebenen: Gesamteinzugsgebiet, Teileinzugsgebiete und Hydrotope. Hydrotope stellen die kleinsten Recheneinheiten dar. Innerhalb eines Teileinzugsgebiets weisen sie gleichartige hydrologische Eigenschaften auf und werden aus der Verschneidung von Teileinzugsgebiets-, Boden- und Landnutzungsdaten generiert (vgl. schematische Darstellung in Abbildung 7-1). Für die Ableitung von Höhe und Gefälle eines Teileinzugsgebiets wird ein digitales Geländemodell benötigt. Der interne Rechenzeitschritt bei der Abflusssimulation beträgt eine Stunde. Für KliBiW wurden Tagesmittelwerte der klimatischen Variablen als Eingangsdaten verwendet. Auch die Auswertung wurde auf Basis von Tagesmittelwerten durchgeführt.

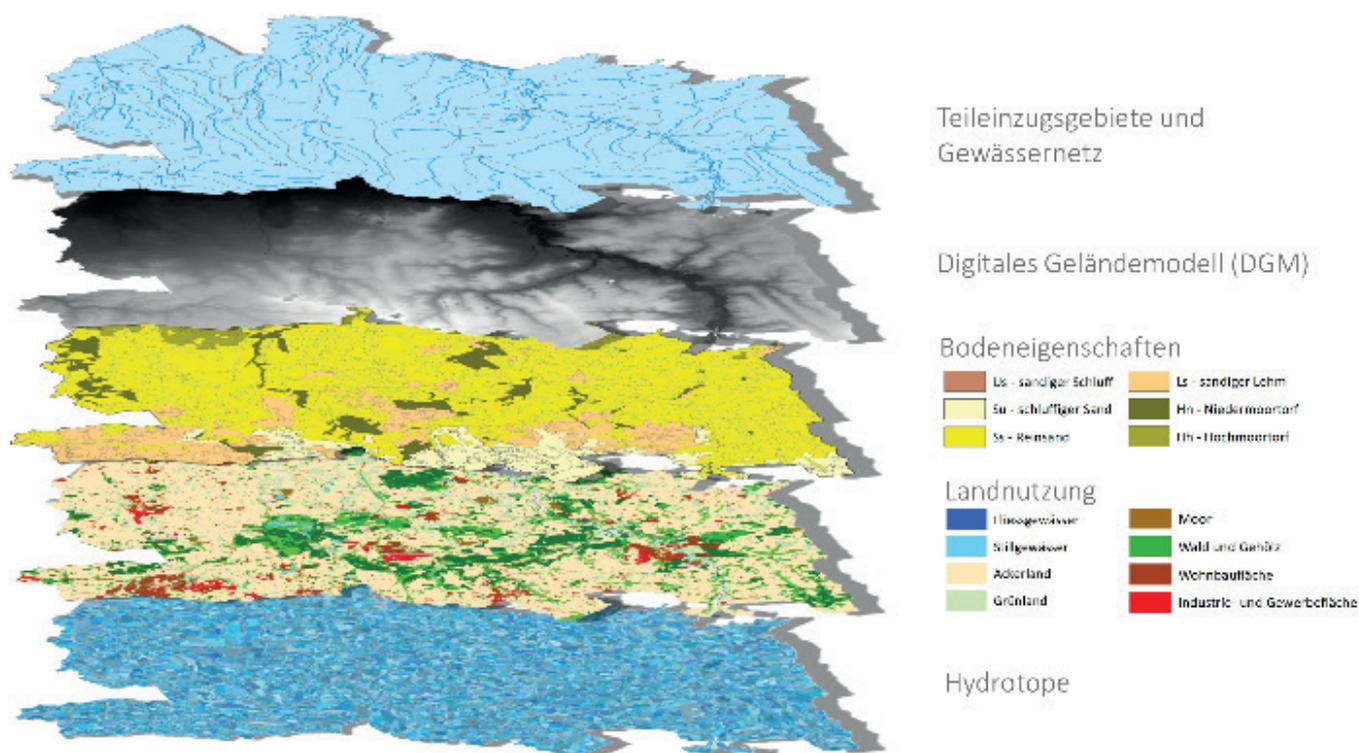


Abbildung 7-1: Schematische Darstellung der Überlagerung von Teileinzugsgebiets-, Landnutzungs- und Bodenkarte sowie eines Digitalen Geländemodells zur Erstellung einer Hydrotopkarte

Die meteorologischen Eingangsdaten können entweder als Stationszeitreihen oder als Rasterdaten von PANTA RHEI verarbeitet werden. Es können sowohl Daten auf Tagesbasis als auch mit höherer zeitlicher Auflösung verwendet werden. Für die Berechnung des Wasserhaushalts werden die folgenden meteorologischen Parameter benötigt: Niederschlag, Lufttemperatur (Tagesmittel, maximum und -minimum), Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit.

Neben den natürlichen Gegebenheiten eines Einzugsgebiets können in PANTA RHEI auch wasserwirtschaftliche Anlagen berücksichtigt werden. Hierzu zählen beispielsweise Talsperren, Retentionsräume, Düker oder Verzweigungen. Für die Bauwerke werden die Betriebsregeln im Modell hinterlegt.

7.3 Relevante hydrologische Prozesse für die Wasserhaushaltssimulation

Für die modellbasierte Nachbildung der hydrologischen Prozesse stehen in PANTA RHEI verschiedene Modellansätze zur Verfügung. Die Auswahl der Prozeduren erfolgte anhand der örtlichen Gegebenheiten, der verfügbaren Eingangsdaten sowie des Untersuchungsziels. Dieses ist in KliBiW Phase 6 die Simulation des Wasserhaushalts mit Fokus auf Hochwasserereignissen. Im Folgenden werden diejenigen Modellansätze beschrieben, welche im Rahmen dieser Projektphase verwendet wurden.

Auf der Ebene der Hydrotopen werden die Prozesse der Abflussbildung berechnet. Hierzu zählen Schneeakkumulation und -schmelze, Evapotranspiration, Interzeption, Infiltration, sowie Perkolation. Die Abflusskonzentration und das Abflussrouting werden auf der Ebene der Teileinzugsgebiete berechnet. Eine Skizze der von PANTA RHEI simulierten hydrologischen Prozesse zeigt Abbildung 7-2.

Für die Berechnung von Schneeakkumulation und -schmelze wurde das erweiterte Grad-Tag-Verfahren verwendet (LWI-HYWAG & IFW 2012). Im Vergleich zum einfachen Grad-Tag-Verfahren, bei dem die Berechnung der Schneeschmelze anhand der Temperaturen oberhalb der Schmelztemperatur und eines Grad-Tag-Faktors erfolgt (Maniak 2005), werden bei dem erweiterten Verfahren auch der Einfluss von Bodenwärmestrom, Globalstrahlung, Wärme des auf die Schneedecke fallenden Regens sowie höhenbedingten Temperaturunterschieden innerhalb der Teileinzugsgebiete berücksichtigt.

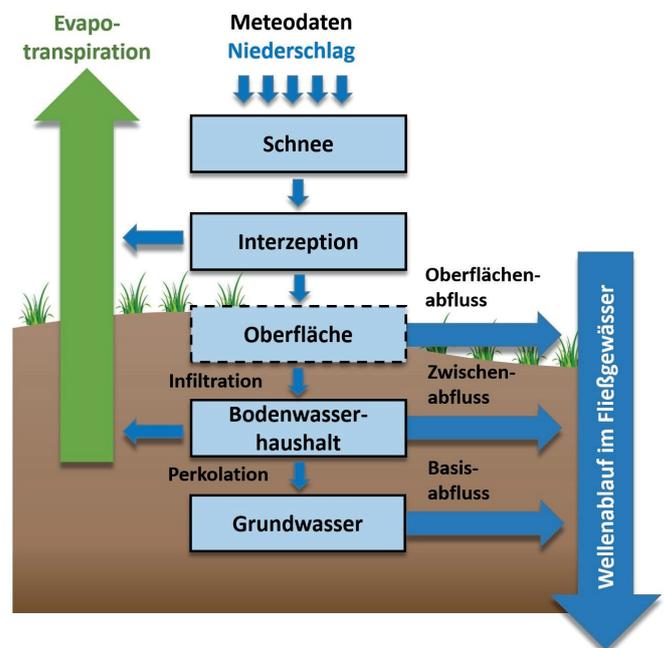


Abbildung 7-2: Schematische Darstellung der hydrologischen Prozesse in PANTA RHEI. Es wird zwischen vertikalen Teilprozessen (Abflussbildung) und lateralen Abflussprozessen (Abflusskonzentration und Wellenablauf) unterschieden

Die potenzielle Evapotranspiration wird nach dem Ansatz von Penman-Monteith (Penman 1948; Monteith, 1965) berechnet. Die für diesen Ansatz benötigten Pflanzenparameter werden dynamisch in Abhängigkeit des Growing Season Index GSI (Jolly et al, 2005) bestimmt (Förster et al, 2012). Der GSI dient als normiertes Maß für die Aktivität der Vegetation im Jahresverlauf und wird auf Basis eines 21-tägigen Mittels aus maximaler Tageslänge, Sättigungsdampfdruckdefizit und Tagesminimumtemperatur berechnet. Für die Klimafolgenforschung ist dieser Ansatz besonders geeignet, da eine eventuell eintretende Verschiebung und/oder Verlängerung der Vegetationsperiode aufgrund sich ändernder meteorologischer Randbedingungen in der Berechnung der potenziellen Evapotranspiration dynamisch berücksichtigt wird. Für die Berechnung der aktuellen Evapotranspiration wird der ermittelte Wert der potenziellen Verdunstung in Abhängigkeit des Wassergehalts des Bodens reduziert.

Der abflusswirksame Niederschlag wird abgeschätzt mit Hilfe des SCS- Ansatzes (U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1964), der nach Riedel (2004) erweitert wurde. Hier wird der abflusswirksame Teil des Niederschlags in fünf virtuelle Speicher beziehungsweise Teilströme aufgeteilt. In Abhängigkeit von Bodenart, Landnutzung, Wassergehalt des Bodens und Niederschlagsintensität wird zunächst eine Aufteilung in Direktabfluss und Perkolation vorgenommen. Der Direktabfluss setzt sich aus dem Oberflächenabfluss und dem Zwischenabfluss (Interflow) zusammen, der perkolierte Teil des abflusswirksamen Niederschlags teilt sich langfristig auf in Grundwasser- und Basisabfluss, wobei sich diese beiden Teilströme unterscheiden durch die unterschiedliche Entleerungsdauer der virtuellen Speicher. Bei urbanen versiegelten Flächen wird ein weiterer Teilstrom separat berechnet. Die Abflusskonzentration beschreibt die zeitliche Entleerung der virtuellen Speicher in den Hydrotopen eines Einzugsgebietes. Diese werden in PANTA RHEI durch mathematisch beschreibbare Einzellinearspeicher abgebildet und durch Überlagerung in den Abfluss aus jedem Teileinzugsgebiet in das Gewässer umgewandelt.

Das Abflussrouting (auch Wellenablauf) erfolgt über die Berechnung von Translation und Retention. Für die Translation von Fließgewässern wird die Fließgeschwindigkeit anhand der Fließformel nach Manning-Strickler (siehe z.B. Maniak, 2005) ermittelt. Durch die Trennung des Abflusses in Flussbett und Vorland erfolgt die Berechnung der Retention getrennt mit zwei Einzellinearspeichern.

Die Steuerung von Talsperren ist im Modell über Lamellenpläne implementiert, welche die Abgabe in Abhängigkeit von der Jahreszeit und dem aktuellen Speicherinhalt festlegen und somit den Betriebsplan der jeweiligen Talsperre berücksichtigen.

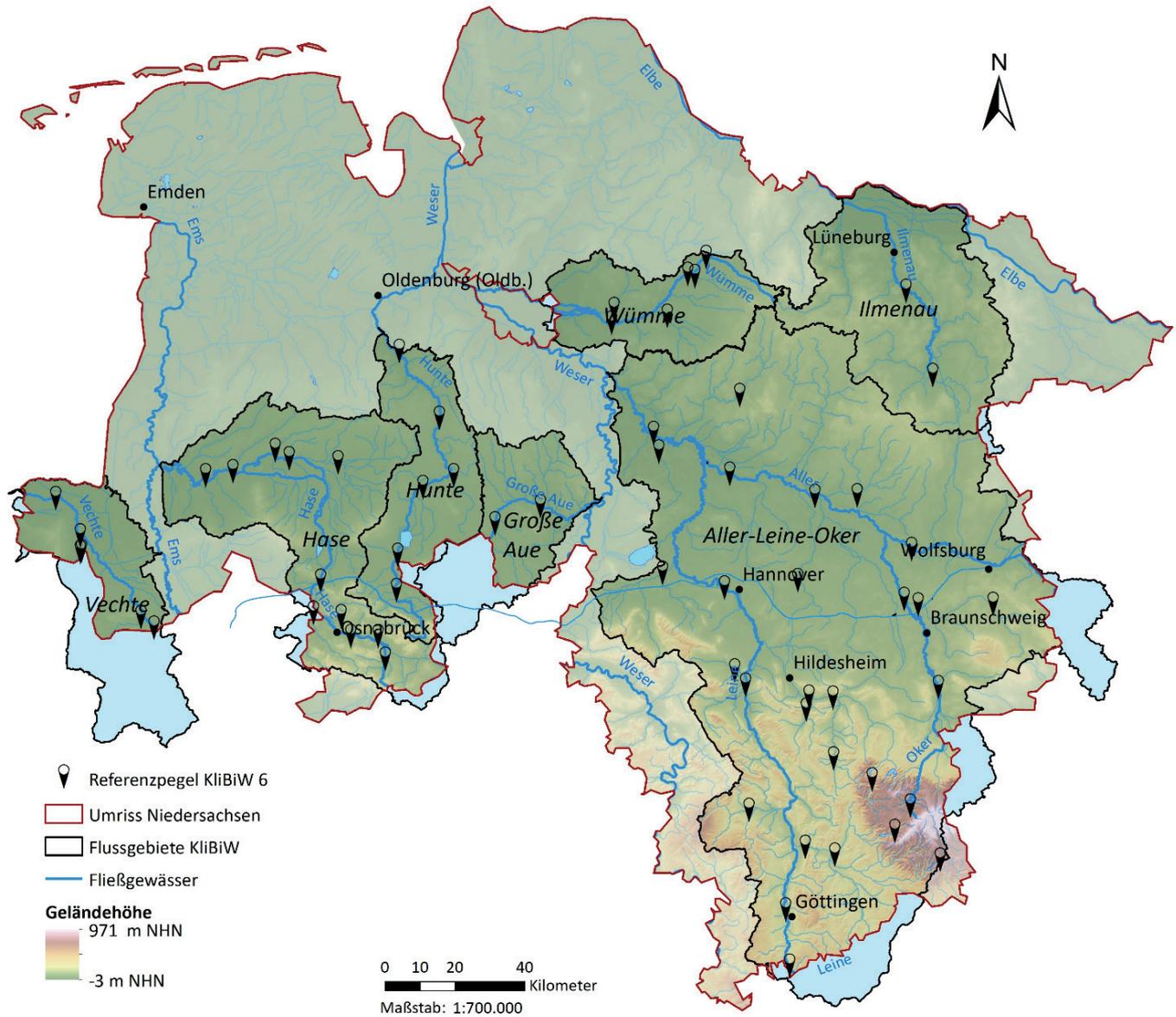


Abbildung 7-3: Lage der Referenzpegel in den sieben untersuchten Einzugsgebieten Niedersachsens

7.4 Modellaufbau der untersuchten Einzugsgebiete

Für die sieben betrachteten Einzugsgebiete (Abbildung 7-3) wurde bereits in der KliBiW-Projektphase 4 jeweils ein eigenes PANTA RHEI-Modell aufgebaut (NLWKN 2017). Diese Modelle wurden u.a. mit der Intention der Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus den Projektphasen übernommen und für die Wasserhaushaltssimulation in KliBiW Phase 6 genutzt. Die nachfolgende Beschreibung des Modellaufbaus wurde der Vollständigkeit halber aus dem Abschlussbericht der Projektphase 4 (NLWKN 2017) übernommen.

Die räumlichen Daten für Niedersachsen, welche für den Aufbau der Modelle verwendet wurden, sind in Tabelle 7-1 aufgelistet. Für die Bereiche außerhalb Niedersachsens wurden entsprechende Datensätze aus anderen Bundesländern bzw. den Niederlanden (Einzugsgebiet Vechte) oder bundesweit verfügbare Datensätze verwendet.

Die Landnutzungsklassen aus dem ATKIS-Datensatz wurden aggregiert, indem Klassen mit ähnlichen hydrologischen Eigenschaften zusammengefasst wurden. Folgende Landnutzungsklassen wurden in der Modellierung unterschieden:

- Ackerflächen
- Grünland
- Laubwald
- Nadelwald
- Mischwald
- Moor
- Wasserflächen
- Urbane Flächen
- Gemischte Nutzung (z. B. vegetationslose Flächen, Tagebau, Halden)

Für eine detaillierte Nachbildung der hydrologischen Prozesse und die Berücksichtigung auch kleiner Fließgewässer wurden die Teileinzugsgebiete der Hydrographischen Karte teilweise feiner untergliedert. Die durchschnittliche Größe der Teileinzugsgebiete wurde hierdurch von 7,2 km² auf 2,9 km² reduziert. Die durchschnittliche Größe der Hydrotope beträgt 0,3 km².

Die Steuerung der Harz-Talsperren im Aller-Leine-Oker-Einzugsgebiet ist in Form von Lamellenplänen im Modell implementiert, welche jahreszeitenabhängige Steuerungsregeln beinhalten. Die Abgaberegulungen der Talsperren wurden im Rahmen von KliBiW Phase 2 mit dem damaligen Projektpartner Harzwasserwerke GmbH abgestimmt. Sechs Talsperren sind im Modell implementiert: Innerste-, Grane-, Oker-, Ecker-, Söse- und Odertalsperre. In der Projektphase 6 wurden die bestehenden Steuerungsregeln aus der Projektphase 4 übernommen, damit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen aus der Projektphase 4 gegeben ist.

Im Einzugsgebiet der Hase ist das Hochwasserrückhaltebecken Alfhausen-Rieste, welches im Januar 1987 zum ersten Mal eingestaut wurde, im Modell implementiert.

Wichtige Verzweigungen in diesem Einzugsgebiet sind beispielsweise die Bifurkation bei Melle, an der die Elbe von der Hase abzweigt und über die Werre der Weser zufließt sowie die Aufteilung der Hase in die Große Hase und die Kleine Hase bei Quakenbrück.

Das Hochwasserrückhaltebecken Salzderhelden an der Leine wird über ein Puls-Verfahren im Modell berücksichtigt.

Der Dümmer, ein eingedeichter See mit gesteuerter Abgabe im Einzugsgebiet der Hunte, dient ebenfalls dem Hochwasserrückhalt. Saisonal unterschiedliche Regelwasserstände des Dümmers wurden in PANTA RHEI durch einen Lamellenplan berücksichtigt. Im Zuge einer Sanierung des Dümmers wurde Anfang des Jahres 2009 der Bornbach, welcher zuvor oberhalb des Pegels Schäferhof in die Hunte mündete, umgeleitet in den Randkanal des Dümmers, so dass der Zufluss des Dümmers verringert wurde. Für das Hunte-Modell gibt es aus diesem Grund zwei Versionen: Im Modell, welches bis 2008 gültig ist, mündet der Bornbach oberstrom des Pegels Schäferhof in die Hunte. Im Modell welches ab Mai 2009 gültig ist, mündet der Bornbach in den Randkanal, so dass das Einzugsgebiet des Pegels Schäferhof um ca. 20% kleiner ist.

Zahlreiche weitere hydrologische Prozesse und wasserwirtschaftliche Eingriffe wurden in den Modellen berücksichtigt. Hierzu zählen:

- Düker, durch die einige Fließgewässer beispielsweise den Mittellandkanal unterqueren. Diese können die maximale Durchflussleistung bei extremen Hochwässern begrenzen.
- Kleinere Hochwasserrückhaltebecken und Ausuferungen im Hochwasserfall
- Die Retentionswirkung von Seen
- Abschläge in den Mittellandkanal im Hochwasserfall

Die Modelle wurden an einer Vielzahl von Pegeln kalibriert. Von diesen wurden in Absprache mit den Projektpartnern 62 als Referenzpegel ausgewählt. Für diese Pegel erfolgte eine detaillierte Auswertung hinsichtlich möglicher zukünftiger Änderungen des Abflussverhaltens und der Hochwasserrisiken. Eine Karte der Referenzpegel zeigt Abbildung 7-3.

7.5 Kalibrierung und Validierung

Die Kalibrierung dient dazu, Modellparameter so anzupassen, dass die simulierten Abflusszeitreihen des hydrologischen Modells das reale Abflussgeschehen für einen Zeitraum in der Vergangenheit möglichst gut nachbilden. Die Validierung ermöglicht eine Kontrolle der Eignung der Modellparameter-Kombination für einen von der Kalibrierung unabhängigen Zeitraum.

Generell wurde für die Kalibrierung der Zeitraum 1971-1991 und für die Validierung der Zeitraum 1991-2011 festgelegt. Die Zeiträume orientieren sich am hydrologischen Jahr und beginnen am 1. November und enden am 31. Oktober. Aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit für einige Pegel weichen die Kalibrierungs- und Validierungszeiträume teilweise hiervon ab, umfassen jedoch jeweils mindestens 12 Jahre. Als meteorologische Eingangsgrößen für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum dienten Messdaten auf täglicher Basis, welche auf ein 1x1 km Raster interpoliert wurden (vgl. Kapitel 2.3).

Eine Übersicht über die erzielten Modellgüten an den Referenzpegeln für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum

gibt Tabelle 7-1. Die Modelleffizienzen für beide Zeiträume liegen für die meisten Referenzpegel im Bereich zwischen 0,7 bis 0,9 mit einem Mittelwert von 0,79 für die Kalibrierung und 0,81 für die Validierung, was einer guten bis sehr guten Modellanpassung entspricht.

Eine deutlich geringere Modelleffizienz weisen die beiden Referenzpegel im Einzugsgebiet der Ilmenau auf. Dieses Gebiet ist stark landwirtschaftlich geprägt. Die sandigen Böden sowie die vergleichsweise geringeren Niederschläge

machen eine Bewässerung der landwirtschaftlichen Flächen notwendig, wodurch der natürliche Wasserhaushalt anthropogen stark überprägt wird. Des Weiteren weicht das unterirdische Einzugsgebiet für einzelne Pegel teils sehr stark von dem oberirdischen Einzugsgebiet ab, so dass die ober- und die unterirdischen Fließwege verschiedene Richtungen annehmen (Wittenberg et al, 2003; Wittenberg, 2015). Diese regionalen Besonderheiten stellen für hydrologische Modelle eine besondere Herausforderung dar und können derzeit von PANTA RHEI noch nicht komplett nachgebildet werden.

Tabelle 7-1: Referenzpegel mit den Ergebnissen aus Kalibrierung und Validierung für die Modelleffizienz nach Nash-Sutcliffe (E), den Volumenfehler (VF) sowie die mittlere monatliche Abweichung (MMA) der langjährigen Monatsmittelwerte (gemittelte Beträge der Abweichungen), Teil 1

Fluss- gebiet	Pegelname	Fließgewässer	Einzugs- gebiet (km)	Kalibrierung			Validierung		
				E (-)	VF (%)	MMA (%)	E (-)	VF (%)	MMA (%)
Aller- Leine- Oker	Aligse	Burgdorfer Aue	180	0,74	-1,8	13,2	0,74	13,0	23,9
	Altenau O	Oker	31	0,74	-2,7	9,0	0,78	-0,2	12,8
	Bad Salzdettfurth	Lamme	127	0,76	-1,8	5,3	0,76	9,6	11,7
	Berka S	Söse	210	0,87	-6,4	6,9	0,84	8,5	9,1
	Brenneckenbrück	Aller	1638	0,79	-8,5	10,0	0,79	10,8	15,4
	Brock	Böhme	285	0,71	-5,6	6,2	0,71	5,8	7,3
	Celle	Aller	4374	0,85	-7,1	9,3	0,88	2,1	7,5
	Derneburg	Nette	309	0,82	-5,0	4,7	0,80	9,7	12,5
	Erikabrücke	Oder	44	0,76	-1,5	5,4	0,79	-2,6	4,6
	Glentorf	Schunter	296	0,72	-0,4	4,4	0,75	6,9	11,3
	Göttingen	Leine	633	0,82	-8,8	9,1	0,63	10,6	12,2
	Groß Rhüden	Nette	125	0,81	-2,6	4,1	0,83	7,8	9,0
	Groß Schwülper	Oker	1734	0,86	-2,4	7,6	0,86	2,2	7,5
	Hallerburg	Haller	104	0,76	-8,7	9,6	0,77	-1,3	11,3
	Harxbüttel	Schunter	592	0,82	-4,4	7,0	0,80	3,3	10,3
	Heinde	Innerste	897	0,87	-3,2	5,0	0,90	4,4	5,8
	Herrenhausen	Leine	5304	0,88	-3,2	3,6	0,88	4,0	5,2
	Lachendorf	Lachte	433	0,62	-10,6	12,3	0,68	13,5	15,5
	Lichtenhorst	Alpe	164	0,71	-10,3	14,9	0,80	9,4	11,7
	Marklendorf	Aller	7209	0,86	-10,3	11,2	0,84	13,0	15,9
	Northeim	Rhume	1176	0,87	-4,1	4,8	0,86	5,4	6,4
	Ohrum	Oker	813	0,85	7,3	13,6	0,87	4,2	11,3
	Oldendorf	Ilme	149	0,86	-5,0	5,5	0,88	7,3	9,5
	Poppenburg	Leine	3463	0,85	-3,5	4,2	0,84	4,2	4,9
	Reckershausen	Leine	321	0,80	-4,6	3,9	0,57	12,9	16,3
	Rethem	Aller	14730	0,89	-6,4	6,8	0,87	6,5	8,5
Riefensbeek	Söse	24	0,78	-0,1	5,4	0,83	-4,3	9,6	
Rote Klippe	Ecker	85	0,81	4,2	7,0	0,83	-7,2	8,7	
Wunstorf	Westaue	558	0,83	-3,9	6,2	0,79	8,6	16,1	
GrosseAue	Heide OP	Große Aue	1016	0,81	-7,3	11,0	0,87	3,6	11,9
	Ströhen	Große Aue	584	0,79	-2,0	15,8	0,84	1,4	16,5

Tabelle 7-1: Referenzpegel mit den Ergebnissen aus Kalibrierung und Validierung für die Modelleffizienz nach Nash-Sutcliffe (E), den Volumenfehler (VF) sowie die mittlere monatliche Abweichung (MMA) der langjährigen Monatsmittelwerte (gemittelte Beträge der Abweichungen), Teil 2

Fluss- gebiet	Pegelname	Fließgewässer	Einzugs- gebiet (km)	Kalibrierung			Validierung		
				E (-)	VF (%)	MMA (%)	E (-)	VF (%)	MMA (%)
Hase	Addrup	Fladderkanal	228	0,78	-6,7	6,4	0,82	8,5	11,4
	Bramsche	Hase	682	0,83	-1,8	3,3	0,85	3,5	5,0
	Bunnen	Große Hase	1778	0,80	-1,3	6,3	0,82	8,6	11,4
	Dratum	Hase	60	0,77	-2,2	3,3	0,84	4,4	16,4
	Haselünne	Hase	2549	0,85	-5,4	7,3	0,85	4,5	5,9
	Haste	Nette	54	0,80	-8,6	9,8	0,80	9,2	12,3
	Herzlake	Hase	2246	0,84	-3,2	6,9	0,86	3,7	5,7
	Lodbergen	Löninger Mühlenbach	71	0,74	3,1	3,9	0,79	-1,9	4,3
	Lüstringen	Hase	209	0,85	-2,8	6,1	0,89	4,1	6,8
	Wersen	Düte	228	0,85	-1,5	3,8	0,83	4,0	5,6
	Wissingen	Wierau	63	0,80	-4,2	8,4	0,79	8,0	10,2
Hunte	Bohmte	Hunte	179	0,80	-3,8	6,2	0,86	4,6	13,7
	Colnrade OP	Hunte	1318	0,81	-2,7	6,0	0,89	3,7	8,3
	Dueste	Wagenfelder Aue	200	0,77	-0,4	8,4	0,81	2,5	8,6
	Hoopen OP	Hunte	772	0,83	-2,4	16,5	0,86	5,7	16,9
	Huntlosen II	Hunte	1714	0,78	-4,9	7,1	0,85	6,7	8,9
	Schäferhof	Hunte	403*	0,84	-2,3	11,6	0,86	1,9	7,4
Ilmenau	Bienenbüttel	Ilmenau	1434	0,46	-9,1	10,0	0,30	9,7	10,6
	Niendorf II S	Stederau	285	0,40	-14,6	14,8	0,46	15,1	18,1
Vechte	Emlichheim	Vechte	1731	0,89	-1,2	8,6	0,91	3,1	12,6
	Lage I	Dinkel	484	0,80	-7,2	8,6	0,87	-1,1	8,6
	Lage/Gesamt	Dinkel	611	0,80	-5,3	12,9	0,89	-0,5	14,2
	Ohne	Vechte	393	0,85	-2,9	10,1	0,86	4,0	15,4
	Suddendorf	Eileringsbecke	103	0,89	1,3	19,4	0,86	-6,8	22,9
	Neuenhaus Wehr	Vechte	702	0,83	-2,6	10,2	0,87	0,1	16,6
Wümme	Hellwege	Wümme	908	0,81	-5,2	7,3	0,80	3,8	8,6
	Lauenbrück B75	Wümme	248	0,82	-5,8	7,7	0,86	4,3	10,0
	Lauenbrück F	Fintau	96	0,76	5,3	7,3	0,77	-1,2	12,9
	Sottrum	Wieste	94	0,72	-4,3	8,8	0,84	7,0	10,1
	Worth	Wiedau	149	0,79	1,2	10,0	0,82	-0,9	8,0
	Wümme	Wümme	93	0,70	-4,2	9,8	0,78	4,7	14,2

*) Flächengröße Einzugsgebiet Pegel Schäferhof nach der Umleitung des Bombachs

7.6 Simulation ausgewählter Abflusskenngrößen

Für die Ermittlung der möglichen zukünftigen Veränderungen der Abflussverhältnisse und insbesondere der Hochwasserkenngößen wurden Langzeitsimulationen für den Zeitraum 1971-2100 mit PANTA RHEI für die sieben Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Ilmenau, Wümme, Große Aue, Hunte, Hase und Vechte durchgeführt. Als meteorologische Eingangsgrößen wurden die tageswertbasierten Zeitreihen der zuvor interpolierten und Biasadjustierten Klimamodell-daten (siehe Kapitel 5.2) verwendet. Analog zu dem Vorgehen bei der Kalibrierung wurden auch für die Simulationen mit Klimamodell-daten meteorologische Eingangsdaten mit täglicher Auflösung verwendet. Es wurden Simulationen mit meteorologischen Zeitreihen von insgesamt 8 Klimamodellläufen basierend auf dem RCP8.5-Szenario durchgeführt.

Für das Einzugsgebiet der Hunte wurde für die Simulationen mit den Klimamodell-daten für den gesamten Zeitraum 1971-2100 die Modellversion verwendet, welche nach der Bornbachumleitung gültig ist (siehe Kapitel 7.4). Somit basieren die berechneten Änderungssignale lediglich auf sich ändernden klimatischen Randbedingungen. Wasserwirtschaftliche Eingriffe, die in der Vergangenheit stattfanden, haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

Um Aussagen zu möglichen zukünftigen Entwicklungen für die Abflüsse an den Referenzpegeln treffen zu können, wurden die statistischen Größen, wie langjährige Monatsmittelwerte oder Hochwasserkennwerte, die aus den Simulationen für die nahe Zukunft Z2 (2021-2050) und für die ferne Zukunft Z3 (2071-2100) ermittelt wurden, verglichen mit denjenigen der Modellläufe in der Referenzperiode (1971-2000). Die Zeiträume orientieren sich am hydrologischen Jahr und beginnen am 1. November und enden am 31. Oktober. Alle Auswertungen wurden analog zum Vorgehen bei der Kalibrierung und Validierung auf Basis von Tagesmittelwerten des Abflusses durchgeführt. Bei der Auswertung lag der Fokus auf den Hochwasserkenngößen MHQ, HQ₅ und HQ₁₀₀. Des Weiteren wurden auch mögliche Veränderungen für das Mittelwasser (MQ) und die langjährigen Monats- und Quartalsmittelwerten betrachtet. Für diese Größen wurde für jeden einzelnen Simulationslauf ein prozentuales Änderungssignal berechnet.

Ergänzend zu den bisherigen Kenngrößen wurden die Auswertung der Abflusssimulationen auch für die neu in KliBiW eingeführten Abflusskenngrößen Hochwasserhäufigkeit, -dauer, -wellenvolumen und -saisonalität (s. Tabelle 4-1 und Kapitel 4.2) durchgeführt. Zusätzlich wurde als weitere neue hydrologische Kenngröße in KliBiW 6 die mittlere Bodenfeuchte im Pegel-einzugsgebiet bei der Auswertung einbezogen. Auch für die Bodenfeuchte wurden die langjährigen Monats- und Quartalsmittelwerte sowie die prozentualen Änderungssignale berechnet.

Um Aussagen zu saisonalen Änderungen von Hochwasserkenngößen treffen zu können, wurden zusätzlich extremwertstatistische Auswertungen für das Sommerhalbjahr (01.05.-31.10.) und das Winterhalbjahr (01.11.-30.04.) durchgeführt. Die Darstellung der Bandbreite der Änderungsfaktoren, die sich aus den Signalen der einzelnen Modellläufe des Ensembles ergibt, erfolgt überwiegend in Boxplots. Diese zeigen neben dem Median des Ensembles

auch das 25%- und 75%-Perzentil („box“) sowie die gesamte Spannweite der Änderungen der einzelnen Modellketten (Länge der Whisker).

Im Folgenden werden die mittleren Änderungssignale zusammen mit den Bandbreiten an allen Referenzpegeln für alle hydrologischen Kenngrößen und beide Zukunftszeiträume dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine detaillierte Darstellung der Änderungsfaktoren bezogen auf die Monats- und Quartalsmittelwerte für die Kenngrößen MQ, MHQ, HQ₅, HQ₂₀, HQ₁₀₀ und die Gebiets-bodenfeuchte sowie die Entwicklung des gleitenden 30-Jahres-Mittelwertes für MQ exemplarisch für die Pegel Herrenhausen (Leine) und Colnrade (Hunte), da diese jeweils ein großes Einzugsgebiet in der westlichen bzw. östlichen Hälfte Niedersachsens repräsentieren.

Für die beiden Referenzpegel der Ilmenau wurden aufgrund der besonderen Gebietseigenschaften mit ausgeprägter landwirtschaftlicher Bewässerung und abweichendem unterirdischen Einzugsgebiet schwächere Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse erreicht als für die anderen Referenzpegel (siehe Kapitel 7.5). Die Ergebnisse hinsichtlich der Änderungssignale für diese beiden Pegel sind daher mit höheren Unsicherheiten behaftet. Für den Pegel Groß Schwülper (Oker) ergaben sich mit den beiden Läufen der Modellkette EC-EARTH_RACMO nur diesen Pegel betreffend schwer ergründbare, unplausible Abflussganglinien, die bei der Berechnung der Änderungssignale der abflussbasierten Kenngrößen und ihrer Bandbreite nicht berücksichtigt wurden. Demnach berechnen sich die Veränderungen der verschiedenen Kenngrößen für diesen Referenzpegel aus den verbliebenen 6 Modellketten.

7.6.1 Entwicklung für Jahresmittelwerte

Die Änderungssignale auf Basis der Abflussprojektionen sind für das RCP8.5-Ensemble in Abbildung 7-4, Abbildung 7-5 und Abbildung 7-6 dargestellt. Der Median des RCP8.5-Ensembles zeigt einen leichten Rückgang des mittleren Abflusses (MQ) in der nahen Zukunft um wenige Prozent. Die Bandbreite innerhalb des Ensembles ist jedoch groß und mit einzelnen Modellketten wird auch eine Zunahme simuliert. In der fernen Zukunft ist bei zunehmender Bandbreite der Simulationsergebnisse mit einer leichten Zunahme des MQs an den meisten Referenzpegel zu rechnen. Diese Zunahme beläuft sich in den Flussgebieten von Hase, Hunte, Vechte, Ilmenau, Wümme und Großer Aue im Ensemble-Mittel aller Referenzpegel auf durchschnittlich 5-15 % (Abbildung 7-6). Abweichungen von dieser Tendenz treten an einigen Pegeln des Aller-Leine-Oker-Einzugsgebietes auf. Im Niedersächsischen Bergland im südlichen Landesteil ist an den dortigen Referenzpegel auch in der fernen Zukunft keine wesentliche Änderung des MQs zu erwarten. Im Harz und an den Referenzpegeln der Oker ergibt sich aus den Simulationen im Ensemble-Mittel eine Abnahme des MQs um 5 bis 15 % gegenüber der Referenzperiode bezogen auf alle 62 Referenzpegel.

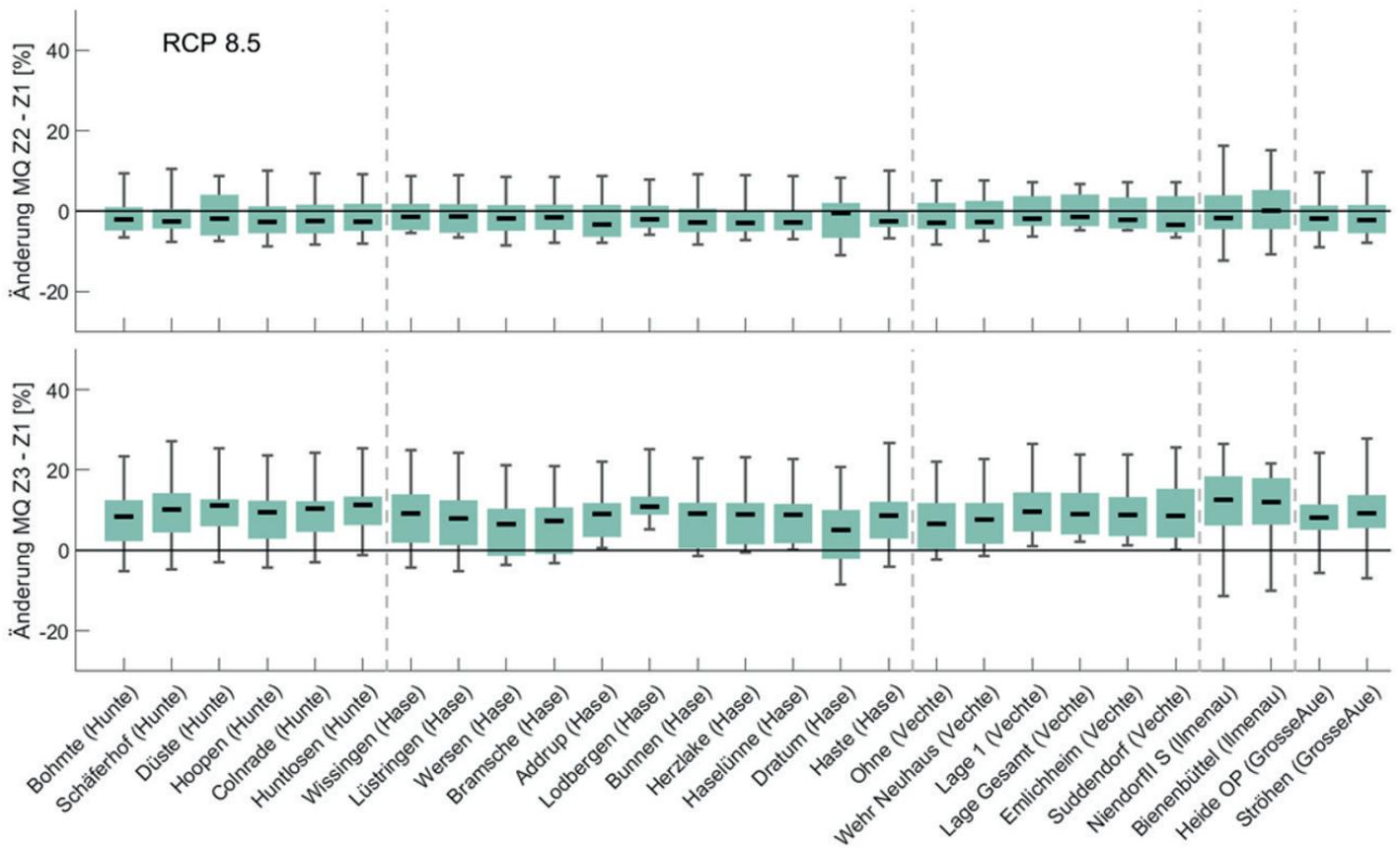


Abbildung 7-4: Änderungssignale für die Jahresmittelwerte des Abflusses (MQ) für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hunte, Hase, Vechte, Ilmenau und Große Aue für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles.

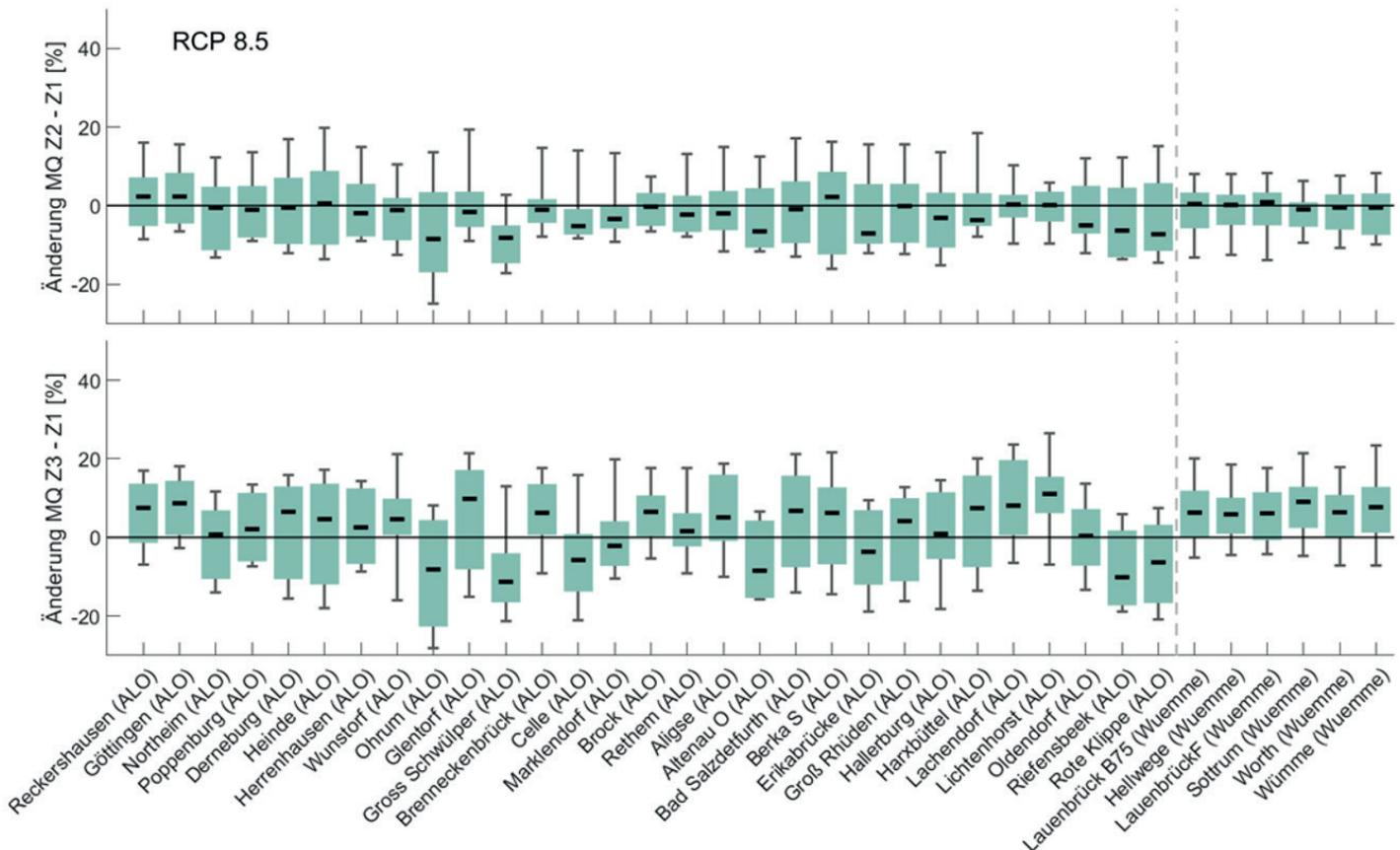


Abbildung 7-5: Änderungssignale für die Jahresmittelwerte des Abflusses (MQ) für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme

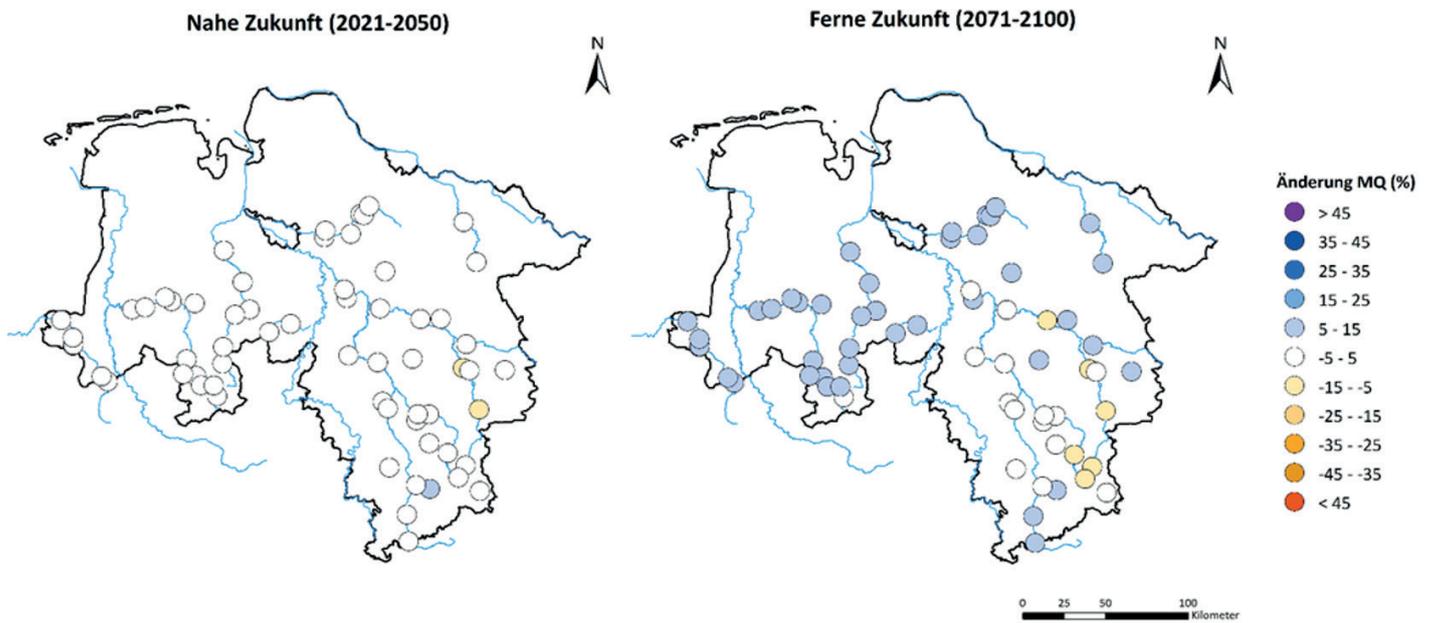


Abbildung 7-6: Mittelwerte der Änderungssignale aller 62 Referenzpegel für den Jahresmittelwert des Abflusses (MQ, Gesamtjahr) für die nahe (links) und ferne Zukunft (rechts) gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.

In Abbildung 7-7 und Abbildung 7-8 sind die MQ-Änderungssignale für die einzelnen Mitglieder des BLFG-Kernensembles exemplarisch für die Pegel Herrenhausen (Leine) und Colnrade (Hunte) dargestellt. Hier zeigt sich, dass sich die Änderungssignale je nach Modellkette deutlich unterscheiden. Am Pegel Herrenhausen liefern insbesondere die Modellketten mit WETTREG2013 als regionales Klimamodell einen deutlichen Rückgang des mittleren Abflusses, während insbesondere die Modellkette EC-EARTH_RACMO wesentlich feuchtere Verhältnisse simuliert. Der Vergleich der Änderungssignale an den beiden Pegeln verdeutlicht außerdem, dass sich die aus derselben Modellkette resultierenden Änderungssignale des mittleren Abflusses für einzelne Referenzpegel unterscheiden. Während die WETTREG2013-Modellketten im (süd-) östlichen Landesteil trockenere Verhältnisse mit einem Rückgang des MQs simulieren, ergeben sich im westlichen Landesteil (Hunte-Einzugsgebiet, Pegel Colnrade) mit derselben Modellkette feuchtere Verhältnisse mit einer Zunahme des MQs gegenüber der Referenzperiode.

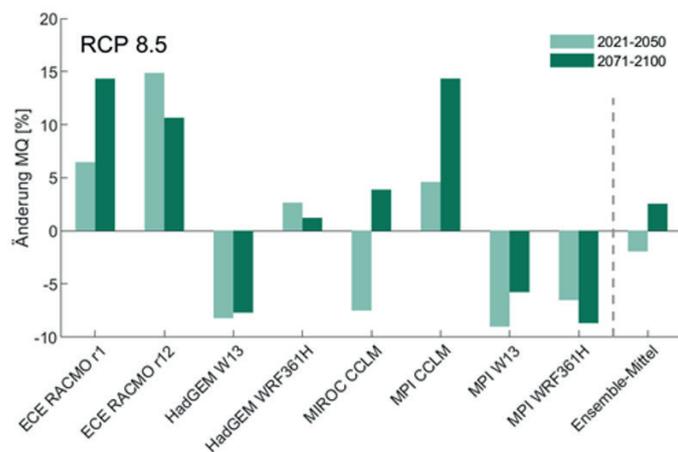


Abbildung 7-7: Änderungssignale für die Jahresmittelwerte des Abflusses (MQ) am Pegel Herrenhausen (Leine) für das RCP8.5-Ensemble mit dem jeweiligen Ensemble-Mittelwert für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.

Die in Abbildung 7-9 und Abbildung 7-10 dargestellten gleichenden Mittelwerte des Abflusses über 30 Jahre für die Pegel Herrenhausen (Leine) und Colnrade (Hunte) zeigen, dass diese Größe im Laufe des Simulationszeitraumes deutliche Schwankungen aufweist. An beiden Pegeln ist im Ensemblemittel in der nahen Zukunft (2021-2050) zunächst mit einem leichten Rückgang des MQs zu rechnen. In der fernen Zukunft ergibt sich aus den Abflusssimulationen an beiden Referenzpegeln eine zunehmende Erhöhung des Mittelwasserabflusses. Diese Schwankungen der errechneten Änderungssignale für die Jahresmittelwerte zeigen, dass diese auch stark beeinflusst sind von der Auswahl der Zeiträume, die miteinander verglichen werden. Außerdem wird deutlich, dass die Bandbreite und damit die Unsicherheit bzgl. der zukünftigen Abflussverhältnisse mit zunehmender Länge der Simulation größer werden.

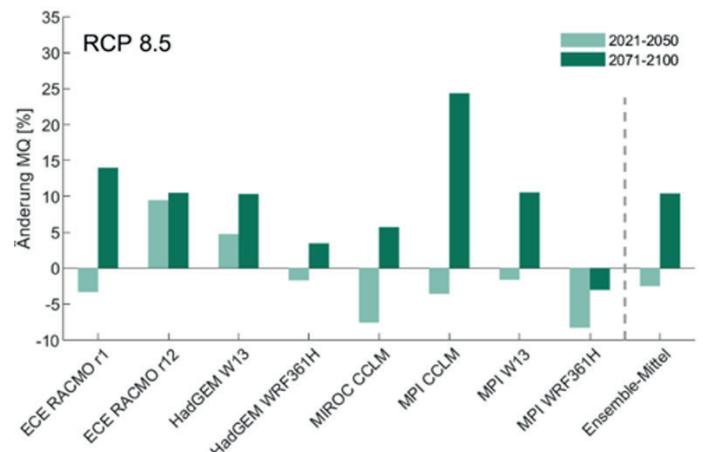


Abbildung 7-8: Änderungssignale für die Jahresmittelwerte des Abflusses (MQ) am Pegel Colnrade (Hunte) für das RCP8.5-Ensemble mit dem jeweiligen Ensemble-Mittelwert für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.

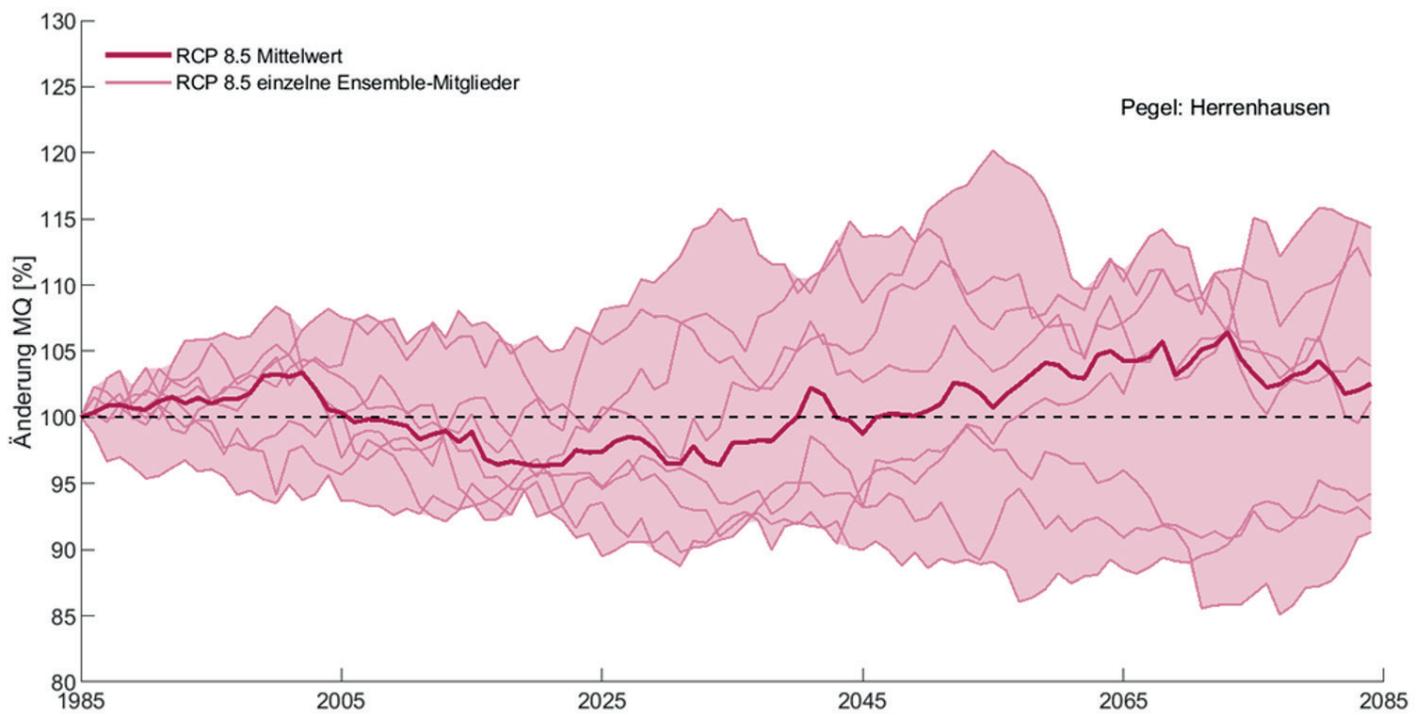


Abbildung 7-9: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwerts des Abflusses für die einzelnen Mitglieder des RCP8.5-Ensembles sowie für den Ensemble-Mittelwert für den Zeitraum 1971-2100 (Mittelwert 1971-2000 entspricht 100%) am Pegel Herrenhausen (Leine). Die transparenten Flächen geben die Spannweiten des Ensembles an.

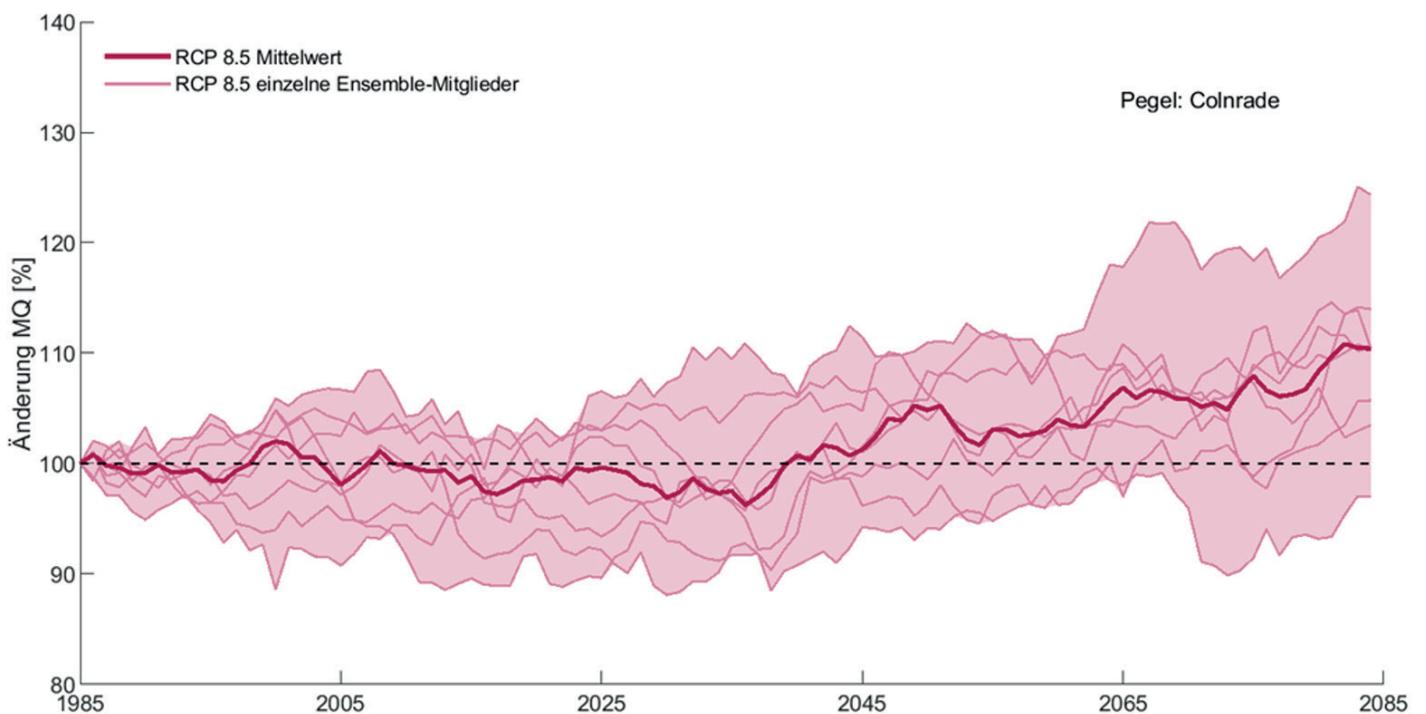


Abbildung 7-10: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwerts des Abflusses für die einzelnen Mitglieder des RCP8.5-Ensembles sowie für den Ensemble-Mittelwert für den Zeitraum 1971-2100 (Mittelwert 1971-2000 entspricht 100%) am Pegel Colnrade (Hunte). Die transparenten Flächen geben die Spannweite des Ensembles an.

7.6.2 Entwicklung der Quartals- und Monatswerte

Hinsichtlich der Quartalsmittelwerte des Abflusses zeigen die Mediane der Referenzpegel Herrenhausen (Abbildung 7-11) und Colnrade (Abbildung 7-12) eine deutliche Zunahme für das Winterquartal. In den übrigen Quartalen sind die mittleren Abflüsse am Pegel Herrenhausen in der nahen Zukunft rückläufig, im Sommerquartal ergibt sich in der fernen Zukunft im Ensemblemedian eine leichte Zunahme des MQs.

Am Pegel Colnrade wird im Frühling-, Sommer- und Herbstquartal ein geringfügiger Rückgang des MQs simuliert, in der fernen Zukunft eine leichte Zunahme. Aus dem Vergleich der Quartal-Änderungssignale des MQs beider Pegel lässt sich folgern, dass zukünftig in der östlichen Landeshälfte Niedersachsens bezogen auf den Mittelwasserabfluss in großen Teilen des Jahres trockenere Verhältnisse herrschen können als in der westlichen Landeshälfte.

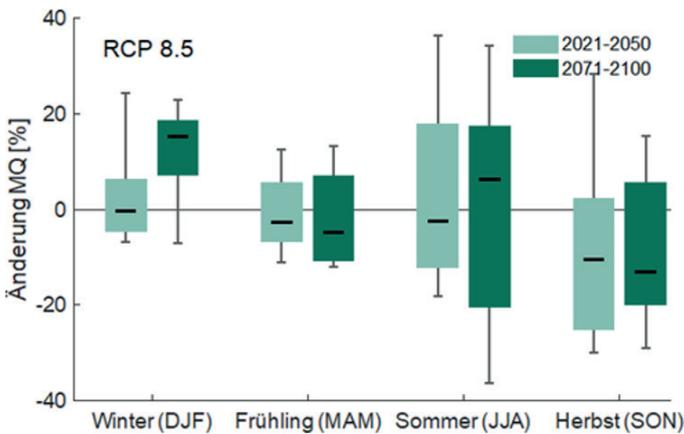


Abbildung 7-11: Änderungssignale für die mittleren Quartalsabflüsse (MQ) am Pegel Herrenhausen (Leine) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber dem Referenzperiode 1971-2000.

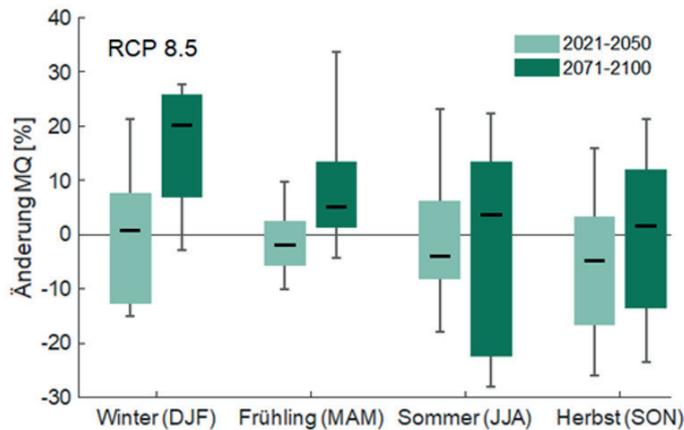


Abbildung 7-12: Änderungssignale für die mittleren Quartalsabflüsse (MQ) am Pegel Colnrade (Hunte) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber dem Referenzperiode 1971-2000.

Abbildung 7-13 und Abbildung 7-14 zeigen die langjährigen monatlichen Mittelwerte des Abflusses für die Pegel Herrenhausen und Colnrade für alle drei betrachteten Zeiträume. Ausgeprägte Unterschiede bestehen vor allem in den Monaten Dezember bis Februar (Herrenhausen) bzw. Dezember bis März (Colnrade). Für diese Monate zeigt der Median des RCP8.5-Ensembles an beiden Referenzpegeln eine deutliche Zunahme des Abflusses, vor allem im Zeitraum 2071-2100.

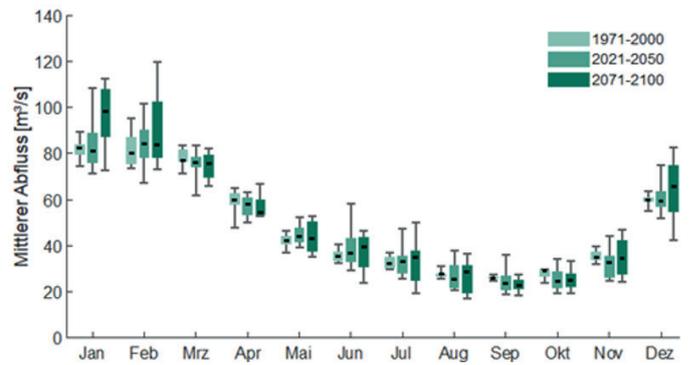


Abbildung 7-13: Box-Whiskers-Plot der langjährigen Monatsmittelwerte des Abflusses (m³/s) am Pegel Herrenhausen für alle drei Zeiträume

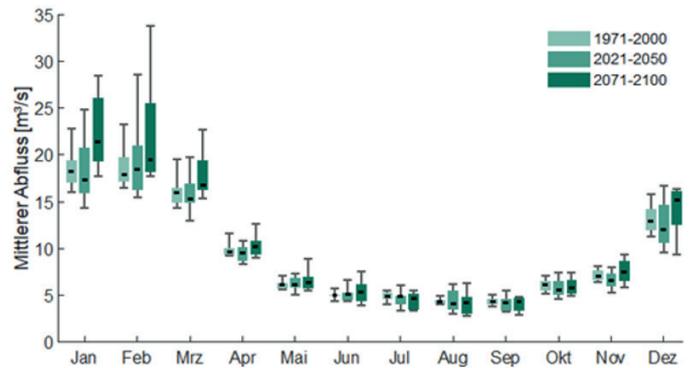


Abbildung 7-14: Box-Whiskers-Plot der langjährigen Monatsmittelwerte des Abflusses (m³/s) am Pegel Colnrade für alle drei Zeiträume

7.6.3 Entwicklung der Hochwasserkenngößen

7.6.3.1 Scheitelabflüsse

Zur Untersuchung der möglichen Hochwasser-scheitelabflüsse der Zukunft werden die Hochwasserkenngößen MHQ (mittlere Jahreshöchstwerte des Abflusses) sowie die simulierten Hochwasserereignisse mit einem statistischen mittleren Wiederkehrintervall von 5, 20 und 100 Jahren (HQ_5 , HQ_{20} und HQ_{100}) berechnet. Für die Ermittlung der Hochwasserkenngößen HQ_5 , HQ_{20} und HQ_{100} wurde aus der simulierten Ganglinie jeweils für die Referenzperiode sowie die nahe und die ferne Zukunft eine Gumbel-Verteilungsfunktion angepasst (Parameterschätzung durch L-Momente).

Die Änderungssignale für MHQ sind in Abbildung 7-15 und Abbildung 7-16 als Box-Whiskers-Plot dargestellt. Aus den Medianen des RCP8.5-Ensembles ergibt sich für die nahe Zukunft an den meisten Referenzpegeln eine leichte Zunahme des MHQs. Für zahlreiche Pegel resultieren aus den Simulationen keine Änderungen oder leichte Rückgänge des MHQs. Rückgänge betreffen v. a. die Referenzpegel im Einzugsgebiet der Vechte und der Wümme sowie einige Pegel im ALO-Gebiet (Harz).

In der fernen Zukunft ist bezogen auf die Mediane des Ensembles an nahezu allen Referenzpegeln mit einer deutlichen Zunahme des MHQs zu rechnen. Diese Zunahme ist regional und von Pegel zu Pegel unterschiedlich stark ausgeprägt. Gemittelt über alle Referenzpegel resultiert aus dem Ensemble-Median eine durchschnittliche Zunahme des MHQs von 14 % gegenüber der Referenzperiode. Die größten Zunahmen für das MHQ werden an den beiden Referenzpegeln der oberen Hunte (Schäferhof und Bohmte) mit über 30 %

berechnet. Insbesondere das Aller-Leine-Oker-Gebiet zeigt sich hinsichtlich der Änderungssignale des MHQs sehr heterogen. Während auch hier an den meisten Pegeln in der fernen Zukunft überwiegend Zunahmen in beträchtlich variierender Größe berechnet werden, wird das MHQ an den Referenzpegeln der Kopfgebiete im Harz deutlich rückläufig berechnet (Abnahme um 6 -18 % gegenüber der Referenzperiode).

In Abbildung 7-17 sind die Mittelwerte der Änderungssignale des MHQs resultierend aus dem RCP8.5-Ensemble für alle 62 Referenzpegel dargestellt. Die Kartendarstellung liefert eine Darstellung der Änderungssignale des MHQs in ihrer saisonalen Differenzierung. In Mitteleuropa finden die größten Hochwasserereignisse gewöhnlich im Winterhalbjahr statt. Daher ähneln die Änderungssignale der HQ-Kennwerte des Winters meist stark denen des Gesamtjahres. Dieses

Muster ist auch in den Karten der HQ-Kennwerte für die Referenzpegel offensichtlich. Die Mittelwerte der MHQ-Änderungssignale für das Sommerhalbjahr zeigen an den meisten Referenzpegeln bereits in der nahen Zukunft eine deutliche Zunahme des MHQs. Besonders starke Zunahmen werden für die Oberläufe von Hase und Hunte (+ 15-25 % verglichen mit der Referenzperiode) sowie einigen Referenzpegeln im Niedersächsischen Bergland (+ 15-35 %) berechnet. Als Ausnahme treten die Referenzpegel in den Kopfgebieten des Harzes mit Abnahmen von 5-25 % in Z2 gegenüber der Referenzperiode hervor. In der fernen Zukunft wird eine weitere, teils starke Zunahme des Sommer-MHQs von landesweit verbreitet 15-35 %, teils auch 35-45 % oder mehr berechnet. Die Boxplots der Änderungssignale des MHQs bezogen auf das Sommer- und Winterhalbjahr sind in Abbildung 12-1 bis Abbildung 12-4 im Anhang dargestellt.

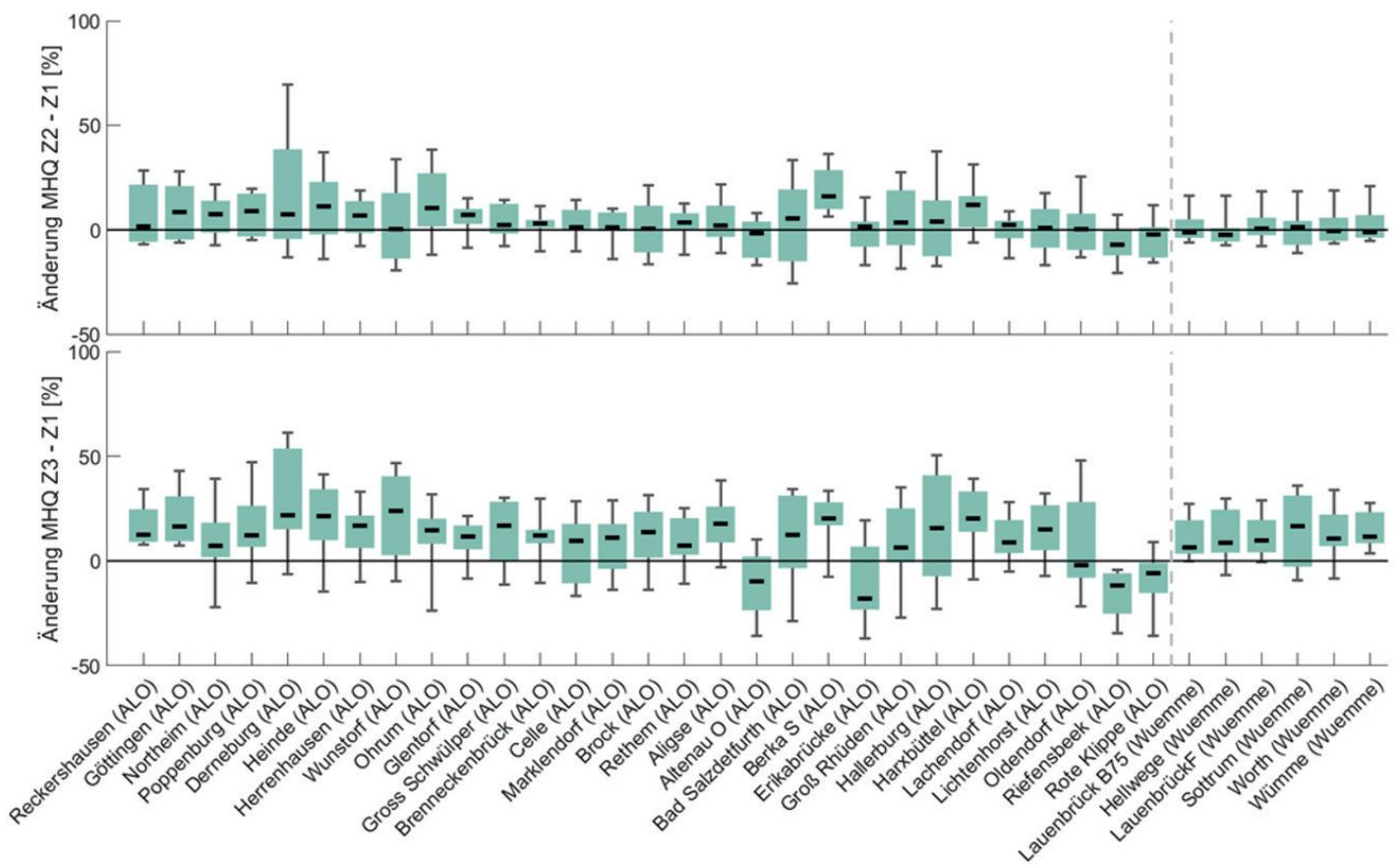


Abbildung 7-15: Änderungssignale des MHQs für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme für die 8 Modellketten des RCP8.5-Kernensembles

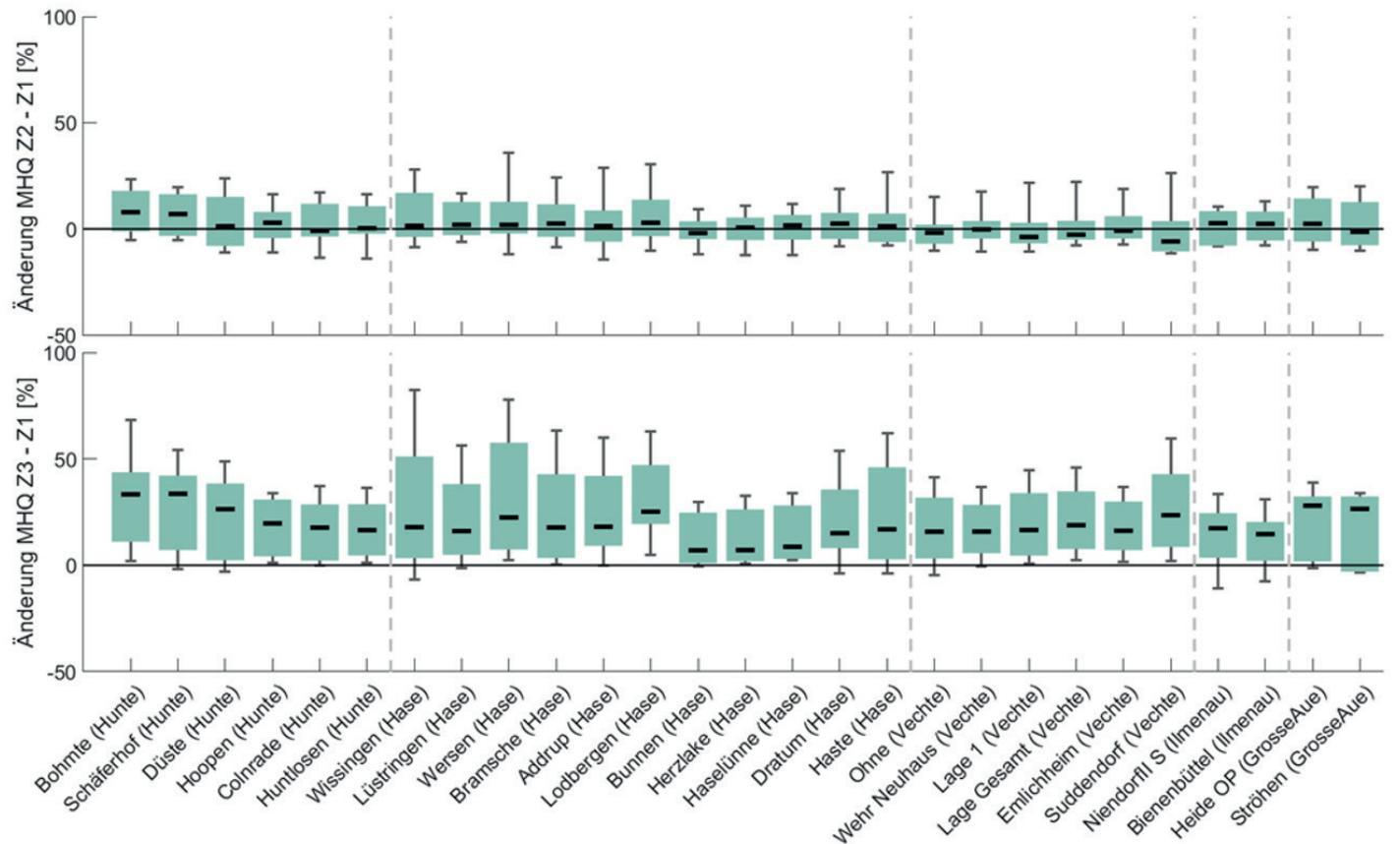


Abbildung 7-16: Änderungssignale des MHQs für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hunte, Hase, Vechte, Ilmenau und Große Aue für die 8 Modellketten des RCP8.5-Kernensembles

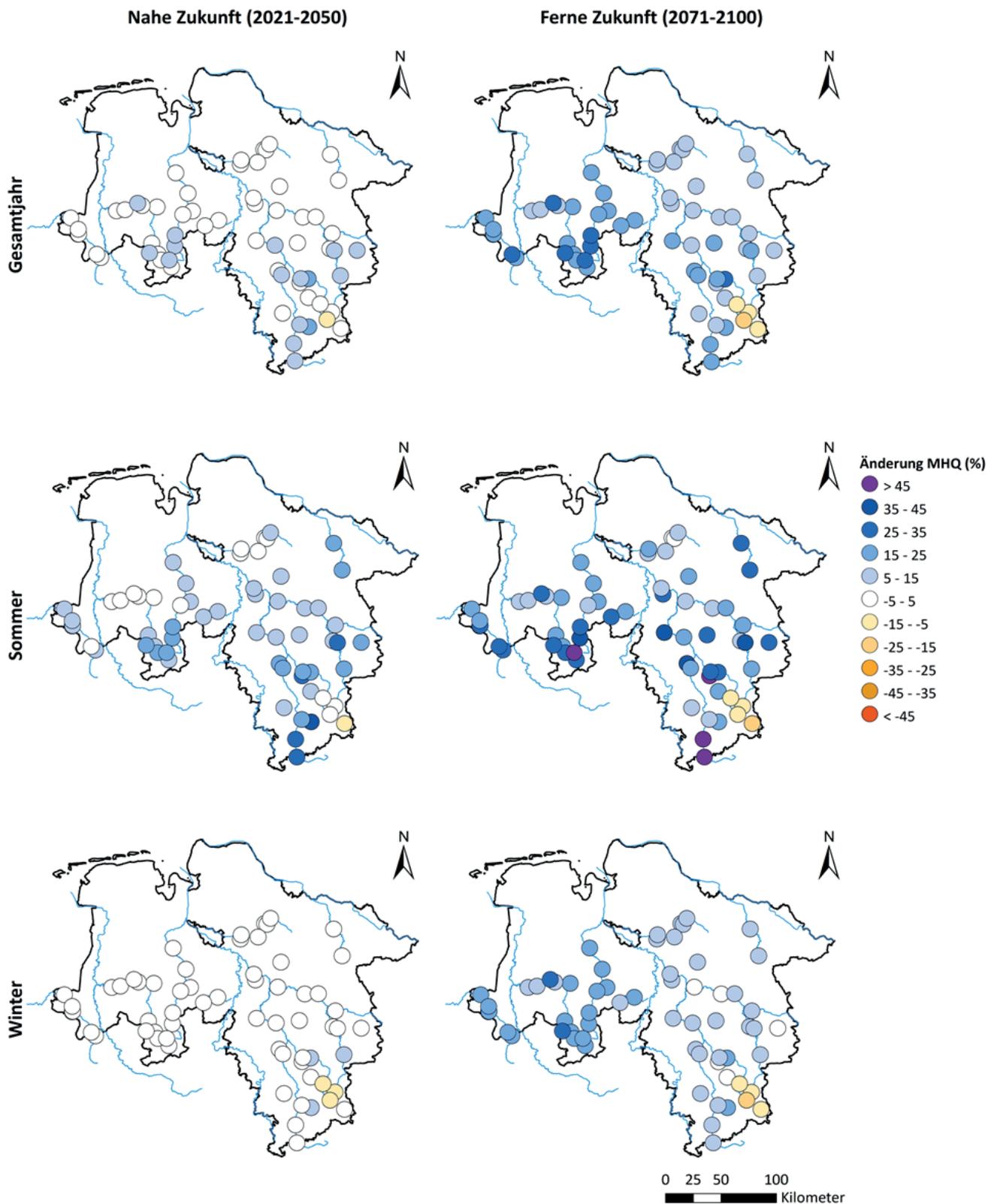


Abbildung 7-17: Ensemble-Mittel der Änderungssignale aller 62 Referenzpegel für MHQ für das Gesamtjahr sowie das Sommerhalbjahr (01.05.-31.10.) und das Winterhalbjahr (01.11.-30.04.) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode (1971-2000)

Die Änderungssignale für das HQ₅ bezogen auf das Gesamtjahr sind in Abbildung 7-18 bis Abbildung 7-20 dargestellt. Da sich die Änderungssignale für die Hochwasserkenngrößen – auch in ihrer saisonalen Differenzierung – sehr ähneln, werden diese im Folgenden zusammengefasst beschrieben. Die Ensemble-Mediane der Änderungssignale für das HQ₅ zeigen für den überwiegenden Teil der Referenzpegel eine leichte Zunahme in der nahen Zukunft. An einigen Referenzpegeln im Aller-Leine-Oker-Gebiet und den Referenzpegeln im Vechte-Einzugsgebiet und vereinzelt an weiteren Referenzpegeln in anderen Landesteilen wird ein leichter Rück-

gang des HQ₅ berechnet. Im ALO-Gebiet betrifft der Rückgang des HQ₅ die Referenzpegel in den Kopfgebieten des Harzes.

In der fernen Zukunft ist mit Ausnahme der Referenzpegel im Harz (hier Rückgänge des HQ₅ zwischen 5 % und 17 %) an allen Referenzpegeln mit einer unterschiedlich starken Zunahme des HQ₅ zu rechnen. Die Zunahmen liegen je nach Pegel zwischen wenigen Prozent und deutlich über 30 %. Auch für das HQ₅ entsprechen die Zunahmen im Winter-

halbjahr weitgehend denen des Gesamtjahres. Abbildung 7- 20 verdeutlicht, dass – wie bei dem MHQ – insbesondere im Sommerhalbjahr eine sehr starke Zunahme des statistisch fünfjährlichen Scheitelabflusses (HQ₅) zu erwarten ist.

Im Allgemeinen ähneln die räumlich-zeitlichen Muster der Änderungssignale bezogen auf das Gesamtjahr für das HQ₂₀ und das HQ₁₀₀ (Abbildung 7-21 bis Abbildung 7-26) sehr stark denen des HQ₅. Als größerer Unterschied fällt auf, dass die Zunahme für das HQ₁₀₀ als Extremhochwasserereignis in beiden Zeiträumen etwas stärker ist als die des HQ₅. Für die Kenngröße HQ₁₀₀ ergibt sich für 14 von 62 Referenzpegeln bezogen auf den Ensemble-Median ein Rückgang von 4,4 % (gemittelt über diese Pegel). Für die übrigen Referenzpegel wird eine Zunahme des HQ₁₀₀ zwischen 0,1 % (Pegel Worth) und 31,5 % (Pegel Derneburg) berechnet. In der fer-

nen Zukunft wird lediglich für die vier Referenzpegel im Harz (Kopfgebiete) ein Rückgang von 13,5 % gemittelt über diese Pegel berechnet. Für 58 von 62 Referenzpegel resultieren teils sehr starke Zunahmen des HQ₁₀₀ zwischen 6 % (Pegel Oldendorf) und 42,8 % (Pegel Bohmte). Gemittelt über diese Pegel beläuft sich die Zunahme des HQ₁₀₀ in Bezug auf das Gesamtjahr auf 21,3 %.

Bei allen die Entwicklung der Scheitelabflüsse abbildenden Hochwasserkenngrößen resultiert aus den Simulationen für die ferne Zukunft eine größere Bandbreite der Änderungssignale als für die nahe Zukunft. Die Boxplots der Änderungssignale für HQ₅, HQ₂₀ und HQ₁₀₀ für das Sommer- und Winterhalbjahr sind in Abbildung 12 5 bis Abbildung 12 16 im Anhang dargestellt.

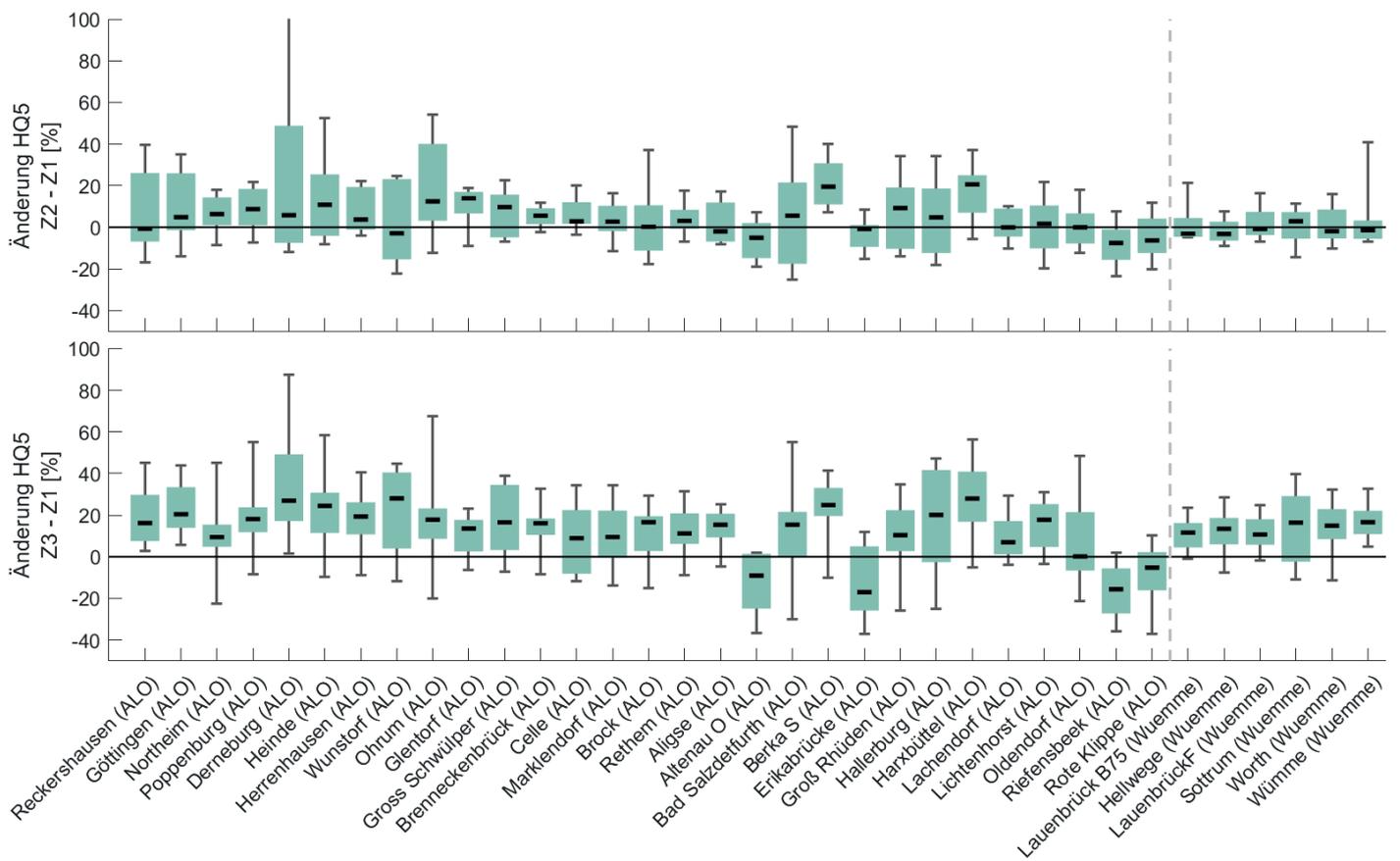


Abbildung 7-18: Änderungssignale des HQ5 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme

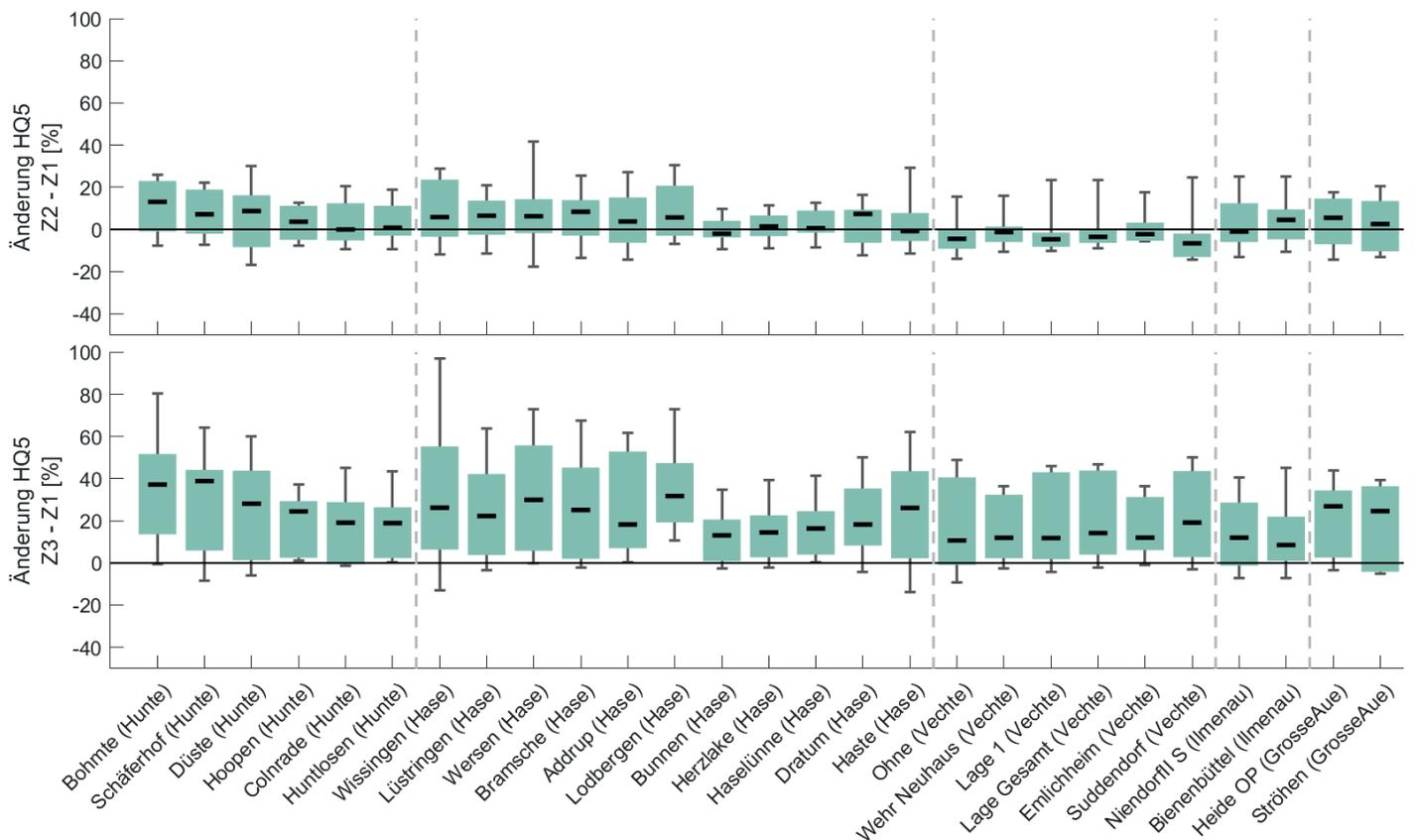


Abbildung 7-19: Änderungssignale des HQ5 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hunte, Hase, Vechte, Ilmenau und Große Aue

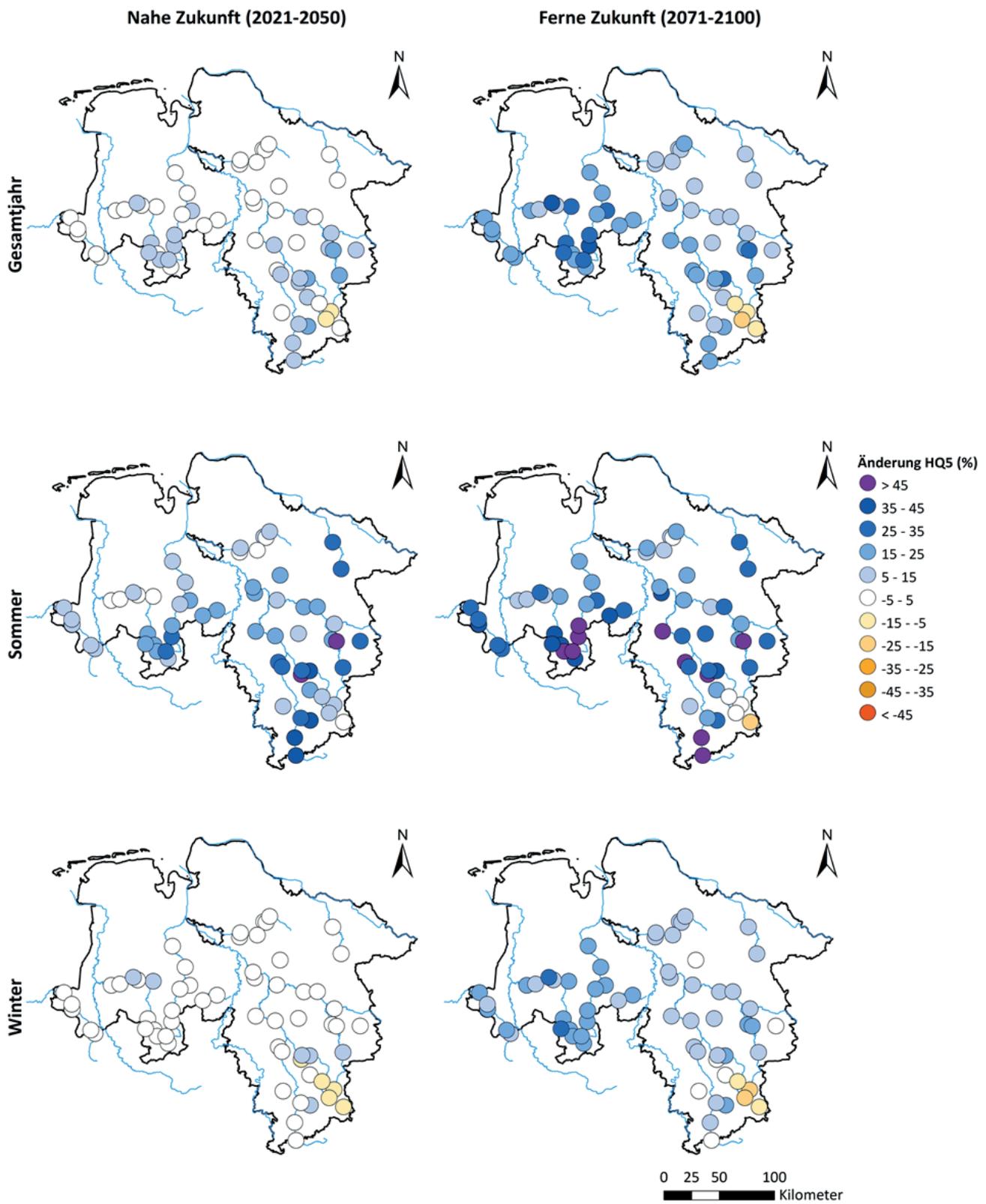


Abbildung 7-20: Ensemble-Mittel der Änderungssignale aller 62 Referenzpegel für HQ5 aus den 8 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles für das Gesamtjahr sowie das Sommerhalbjahr (01.05.-31.10.) und das Winterhalbjahr (01.11.-30.04.) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode (1971-2000)

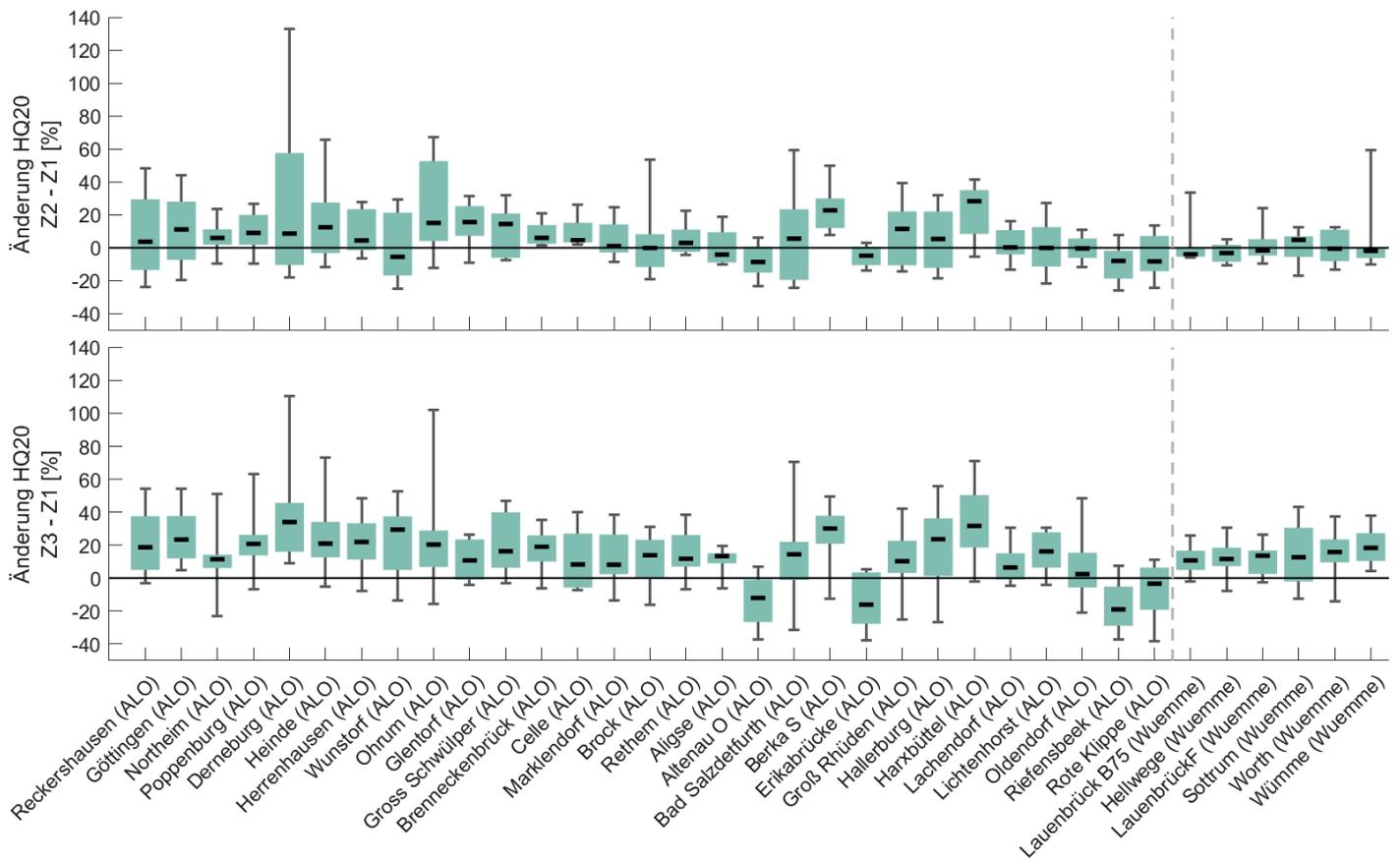


Abbildung 7-21: Änderungssignale des HQ20 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme

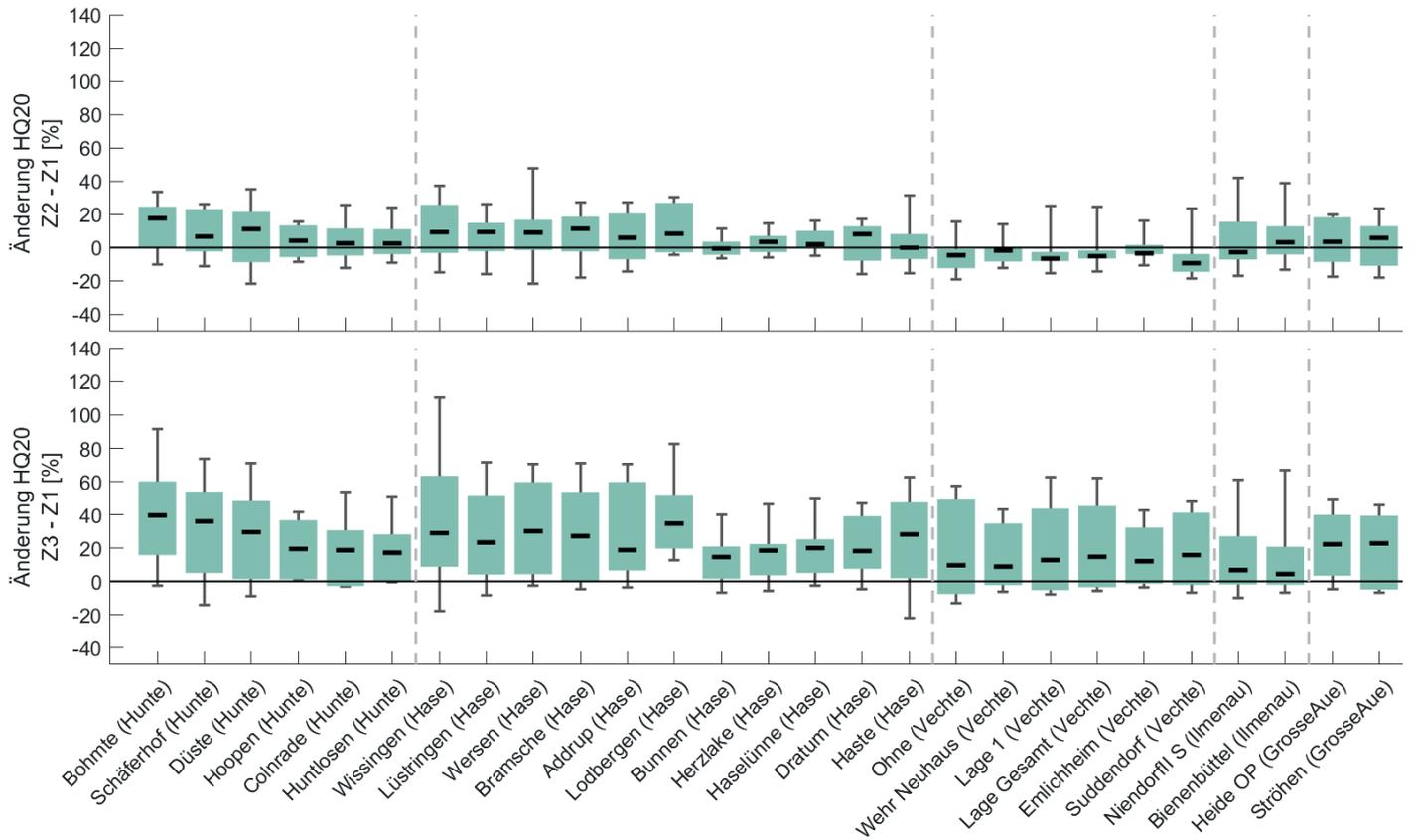


Abbildung 7-22: Änderungssignale des HQ20 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hunte, Hase, Vechte, Ilmenau und Große Aue

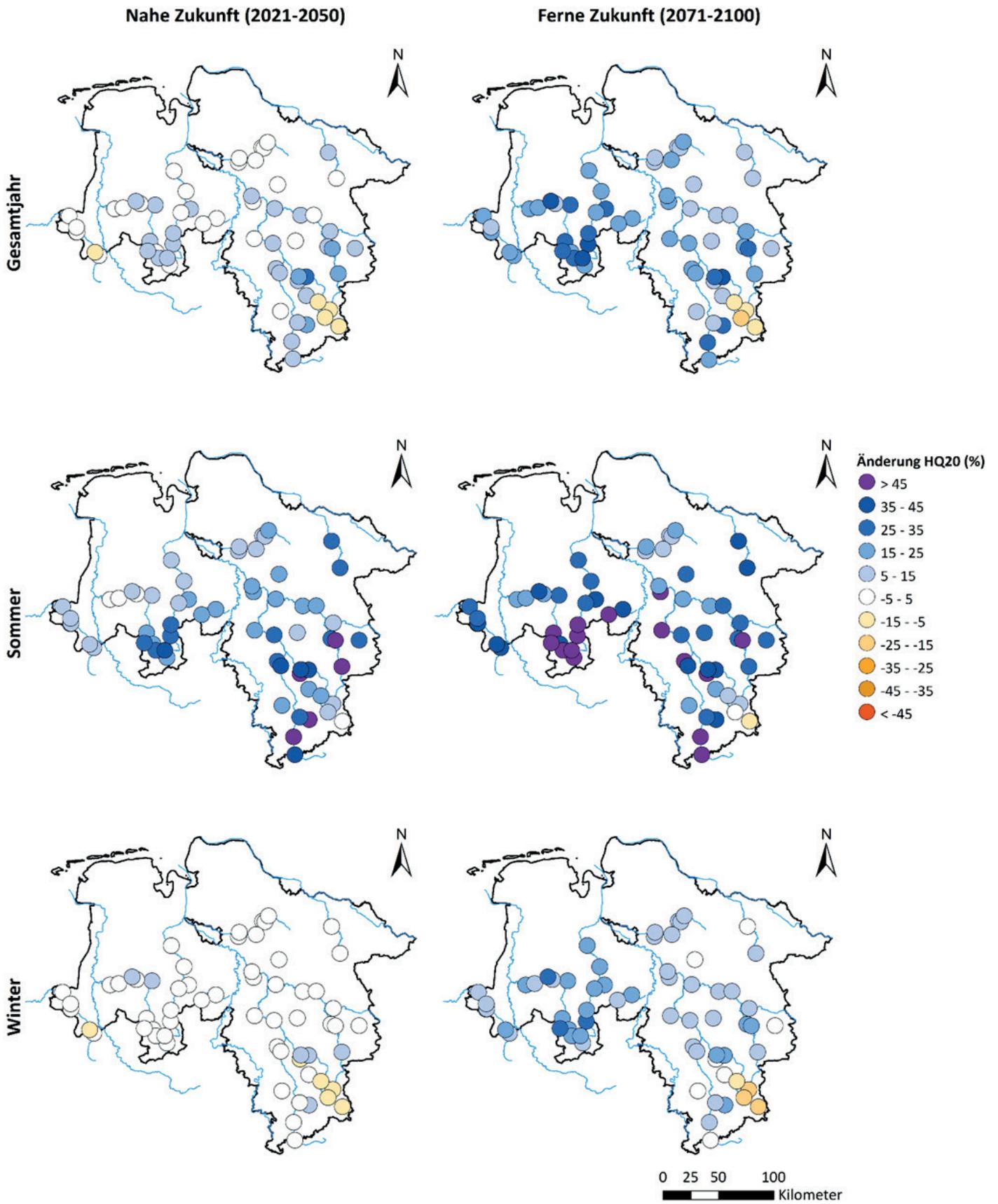


Abbildung 7-23: Ensemblemittel der Änderungssignale aller 62 Referenzpegel für HQ20 aus den 8 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles für das Gesamtjahr sowie das Sommerhalbjahr (01.05.-31.10.) und das Winterhalbjahr (01.11.-30.04.) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode (1971-2000)

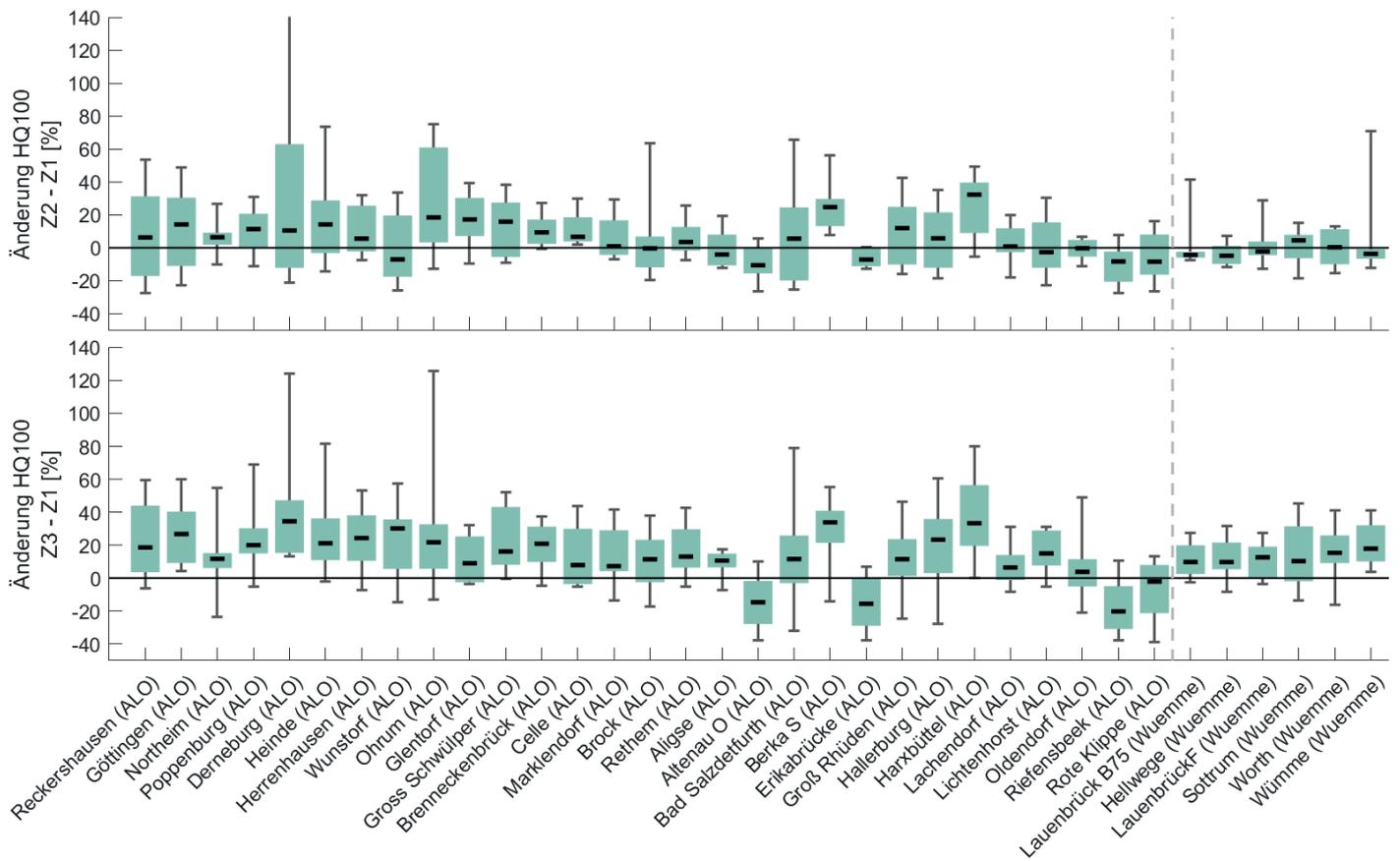


Abbildung 7-24: Änderungssignale des HQ100 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme

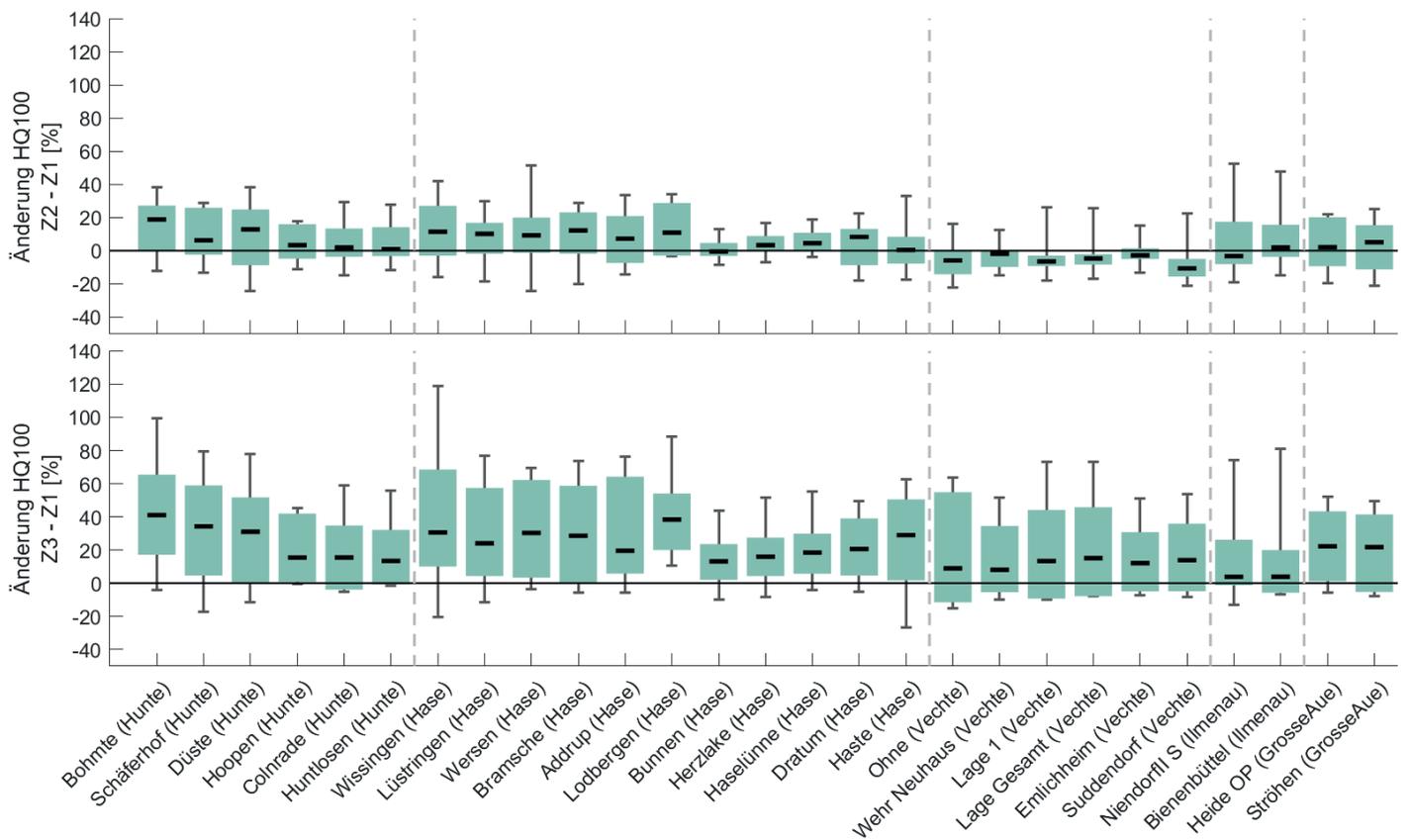


Abbildung 7-25: Änderungssignale des HQ100 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hunte, Hase, Vechte, Ilmenau und Große Aue

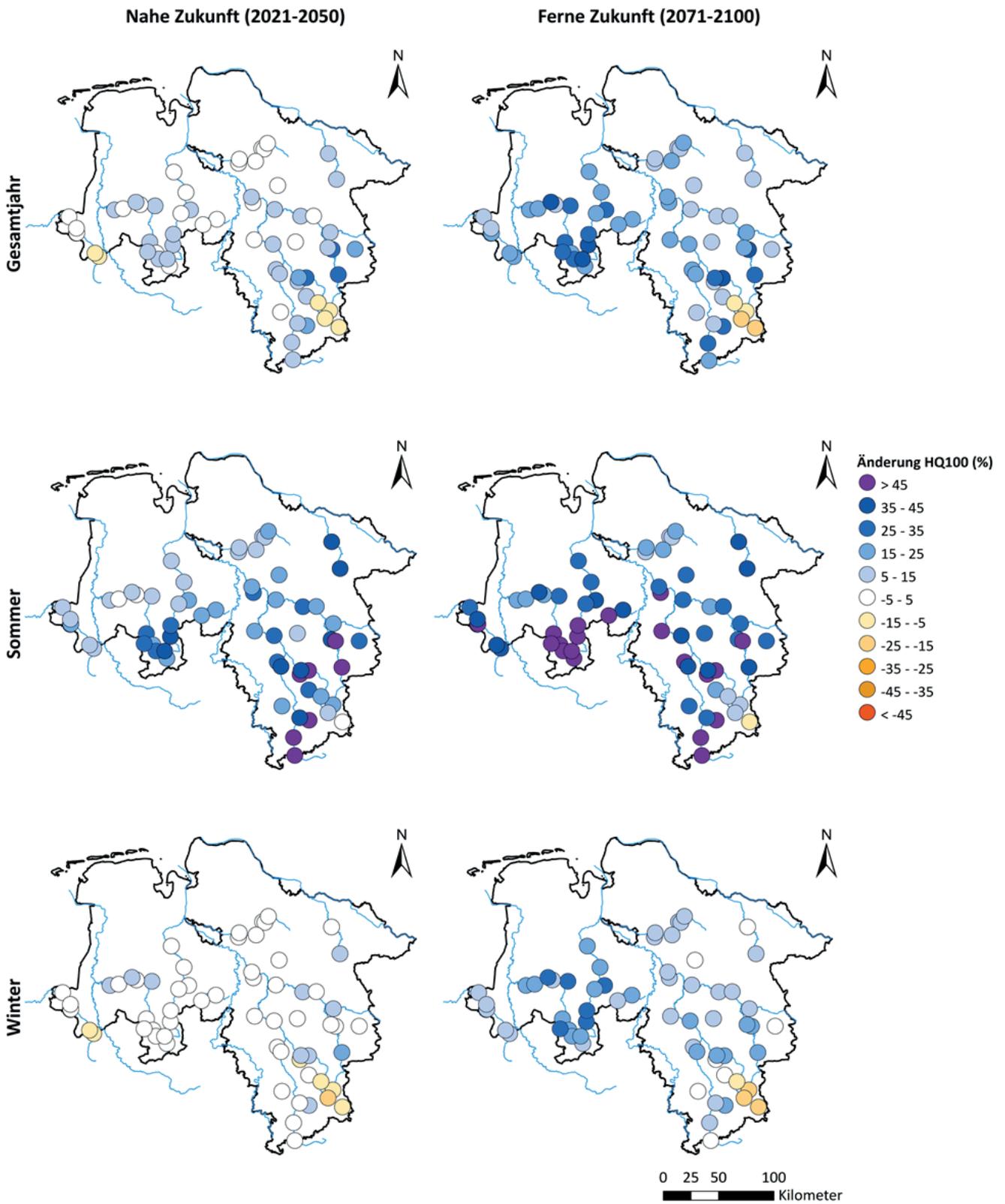


Abbildung 7-26: Ensemblemittel der Änderungssignale aller 62 Referenzpegel für HQ100 aus den 8 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles für das Gesamtjahr sowie das Sommerhalbjahr (01.05.-31.10.) und das Winterhalbjahr (01.11.-30.04.) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000

7.6.3.2 Bodenfeuchte

Der Boden als bedeutender hydrologischer Speicher und als leitendes Medium hat bezüglich des Auftretens und der Intensität des Abflussbildungsprozesses und damit der Hochwasserentstehung eine entscheidende Steuerfunktion. Hohe Bodenfeuchten im Vorfeld eines größeren Niederschlagsereignisses wirken begünstigend für die Hochwasserentstehung.

Aus diesem Grund wurde in KliBiW 6 die Bodenfeuchte als ergänzende hydrologische Kenngröße in der Auswertung der Wasserhaushaltssimulationen und der möglichen zukünftigen Hochwasserverhältnisse berücksichtigt.

Als Kenngröße fungiert die mittlere Bodenfeuchte im Referenzpegeleinzugsgebiet, die daher als Gebietsbodenfeuchte bezeichnet wird. Dabei handelt es sich um die flächengewichtete mittlere Bodenfeuchte im Referenzpegeleinzugsgebiet, die in PANTA RHEI für jedes Hydrotop berechnet wird. Die Änderungssignale der Gebietsbodenfeuchte wurden für das Gesamtjahr und saisonal differenziert nach Sommer- und Winterhalbjahr sowie Quartalen berechnet und ausgewertet.

Die Quartalsmittelwerte der Gebietsbodenfeuchte im Einzugsgebiet des Pegels Herrenhausen (Abbildung 7-27) zeigen bezogen auf den Ensemble-Median vor allem im Sommer- und Herbstquartal einen starken Rückgang der Gebietsbodenfeuchte. Auch im Frühjahr ist die Gebietsbodenfeuchte in beiden Zukunftszeiträumen niedriger als in der Referenzperiode. Lediglich im Winterquartal, hier in der fernen Zukunft, werden um wenige Prozent höhere Bodenfeuchten gegenüber der Referenzperiode berechnet. Im Einzugsgebiet der Hunte (Referenzpegel Colnrade, Abbildung 7-28) werden ebenfalls, bezogen auf den Ensemble-Median, deutliche Rückgänge der Gebietsbodenfeuchte im Sommer- und Herbstquartal sowie einer leichten Zunahme im Frühjahr simuliert.

Die Änderungssignale der Gebietsbodenfeuchte in Bezug auf das Gesamtjahr sind für alle Referenzpegel in Abbildung 7-29 und Abbildung 7-30 dargestellt. Die Lage der Mediane im Box-Whiskers-Plot deutet für alle Referenzpegel auf einen Rückgang der Gebietsbodenfeuchte im Jahresmittel hin. Gemittelt über alle Referenzpegel beträgt die Abnahme -3,5 % mit Maximum am Pegel Ohrum (-8,1 %) und der geringsten Abnahme am Leine-Pegel Göttingen (-1,8 %). Für die ferne Zukunft wird ein weiterer Rückgang des Jahresmittels der Gebietsbodenfeuchte um -7,7 % im Referenzpegelmittel berechnet. Der Rückgang variiert zwischen -3,6 % am Pegel Lodbergen (Hase) und -17,6 % am Pegel Ohrum (Oker).

Die Kartendarstellung der Ensemble-Mittelwerte der Änderungssignale (Abbildung 7-31) zeigt für die nahe Zukunft in Z2 zunächst keine großen Unterschiede zwischen dem Sommer- und Winterhalbjahr. Für das Winterhalbjahr unterscheiden sich die Signale für Z2 und Z3 ebenfalls kaum. In Z3 werden für das Sommerhalbjahr jedoch deutlich stärkere Rückgänge von 13,4 % im Mittel aller 62 Referenzpegel simuliert. Infolge des deutlichen Rückgangs der Gebietsbodenfeuchte im Sommerhalbjahr ergibt sich aus den Änderungssignalen für das Gesamtjahr ebenfalls ein deutlicher Rückgang der Gebietsbodenfeuchte für die ferne Zukunft.

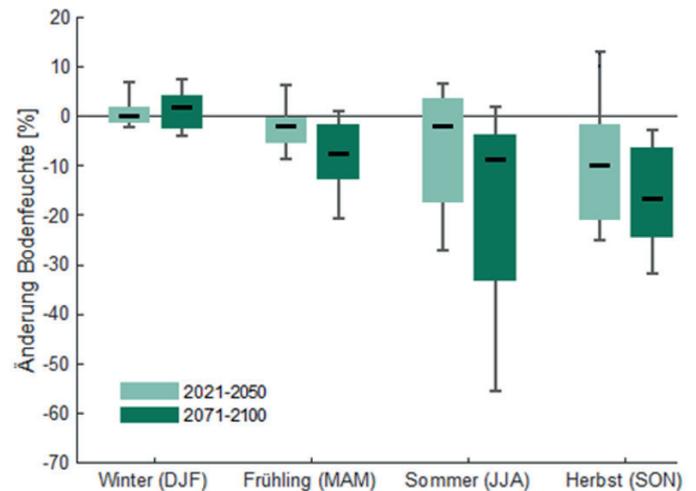


Abbildung 7-27: Änderungssignale für die mittlere Bodenfeuchte im Einzugsgebiet des Referenzpegels Herrenhausen (Leine) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.

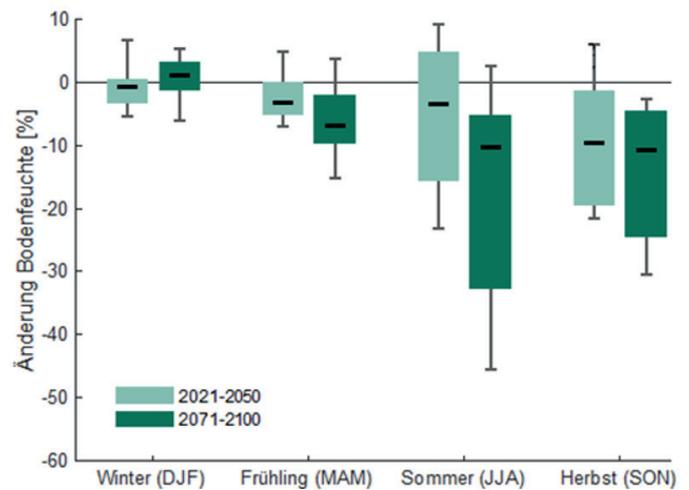


Abbildung 7-28: Änderungssignale für die mittlere Bodenfeuchte im Einzugsgebiet des Referenzpegels Colnrade (Hunte) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.

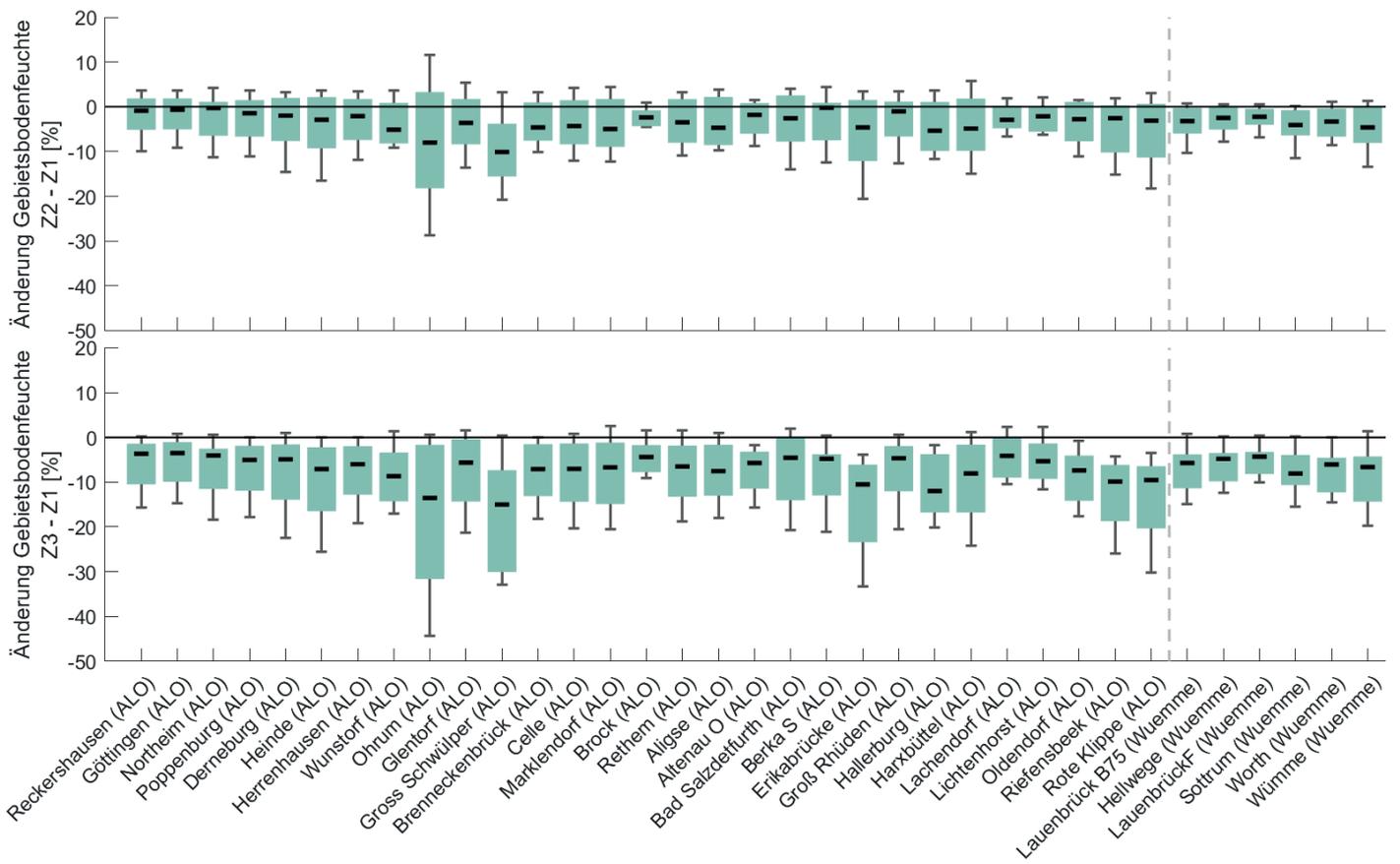


Abbildung 7-29: Änderungssignale der mittleren Gebietsbodenfeuchte für die Einzugsgebiete der Referenzpegel in den Flussgebieten Aller-Leine-Oker und der Wümme für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode

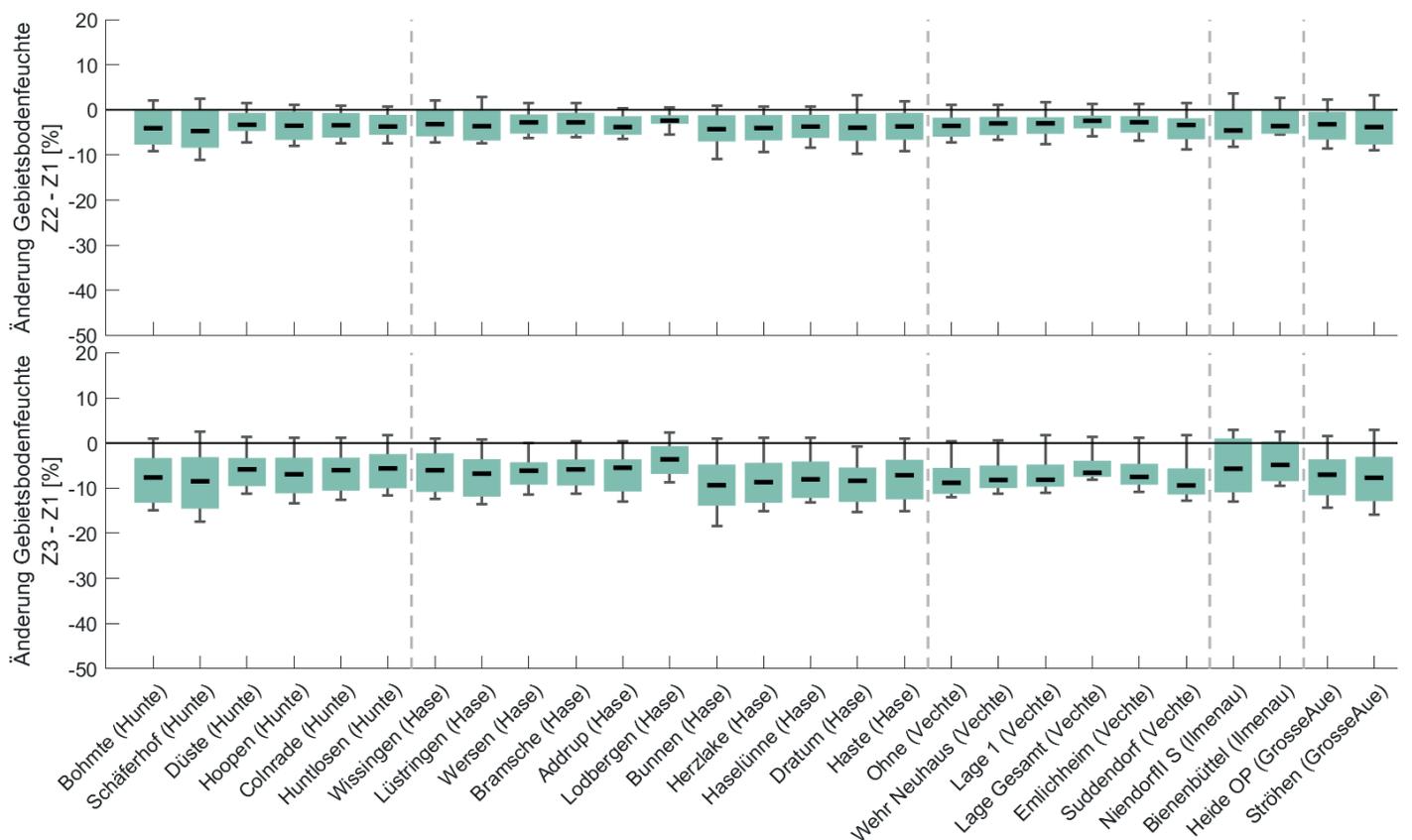


Abbildung 7-30: Änderungssignale der mittleren Gebietsbodenfeuchte für die Einzugsgebiete der Referenzpegel in den Flussgebieten der Hunte, Hase, Vechte, Ilmenau und Große Aue für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode

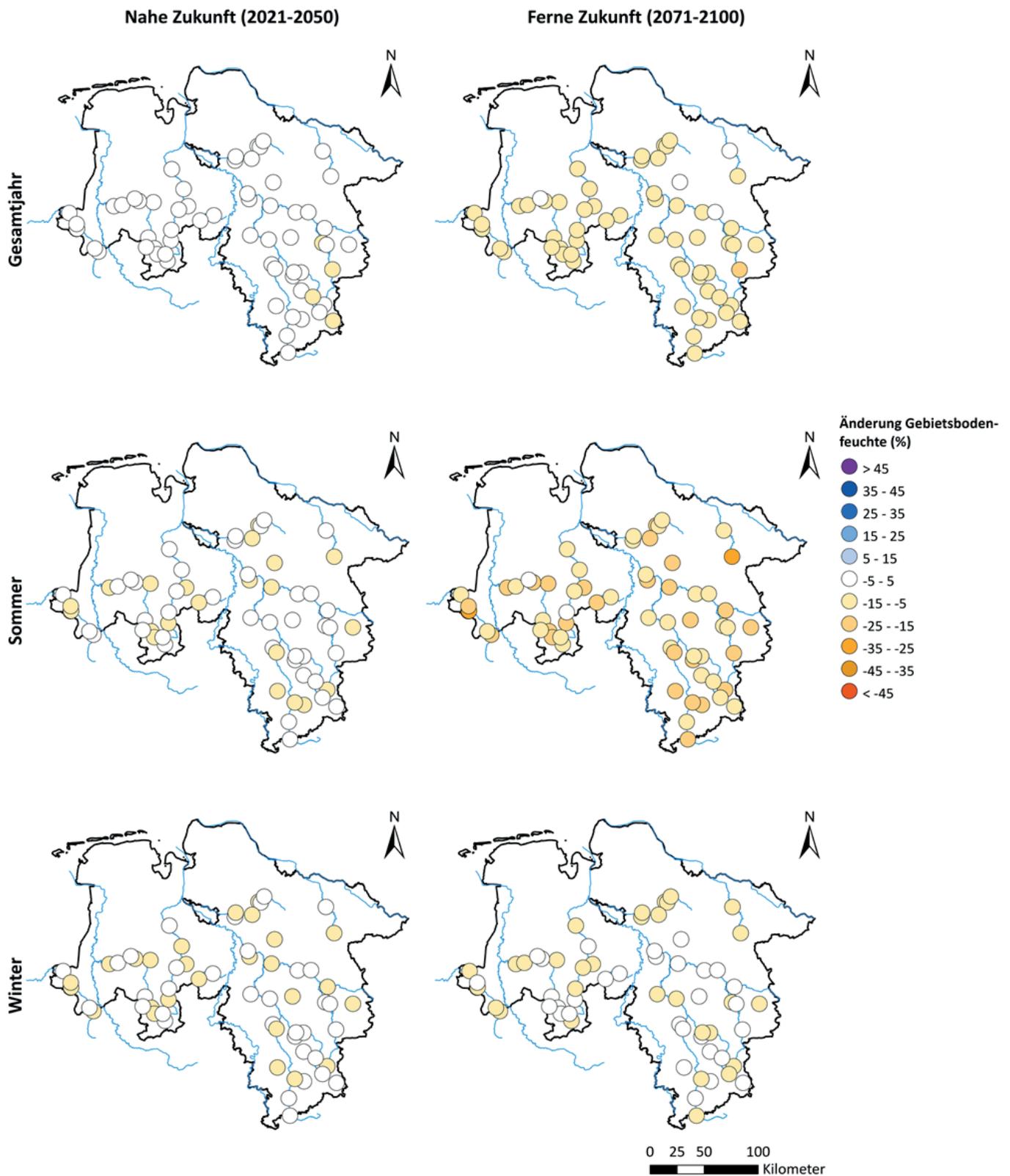


Abbildung 7-31: Ensemblemittel der Änderungssignale aller 62 Referenzpegel für die mittlere Gebietsbodenfeuchte aus den 8 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles für das Gesamtjahr sowie das Sommerhalbjahr (01.05.-31.10.) und das Winterhalbjahr (01.11.-30.04.) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode (1971-2000)

7.6.3.3 Hochwasserhäufigkeit

Für die vertiefte Analyse möglicher Änderung der Hochwasserhältnisse unter Klimawandeleinfluss in Niedersachsen wurden in der KliBiW-Projektphase 6 die hydrologischen Kenngrößen Hochwasserhäufigkeit, Hochwasserdauer und Hochwassersaisonalität und das Hochwasserwellenvolumen (Fülle) eingeführt (vgl. Kapitel 4.2). Ähnlich wie bei der Analyse der Abflussverhältnisse der Vergangenheit wurde für die Ermittlung der Häufigkeiten, der Dauer und Volu-

mina ein Hochwasserereignis als solches identifiziert, wenn der Abfluss wenigstens einen vorgegebenen Schwellenwert erreicht. Als Schwellenwert wurde für jede Modellkette auf Basis der Abflusssimulationen für die Referenzperiode (1971-2000) klimamodellspezifisch der Abfluss berechnet, der im statistischen langjährigen Mittel alle zwei Jahre vorkommt (HQ₂). Für die Kenngrößen Hochwasserdauer und Wellenvolumen bei Hochwasser wurde auf Basis dieser Schwelle

jeweils eine partielle Serie gebildet, d.h. es wurde jedes Mal ein Wert (Dauer bzw. Volumen) berechnet, wenn der Abfluss oberhalb dieser Schwelle lag oder gleich dem Schwellenwert war.

In Abbildung 7-32 ist die mittlere Anzahl von größeren Hochwasserereignissen (Scheitelabfluss \geq HQ₂ der Referenzperiode, vgl. Kapitel 10) in den drei Zeiträumen (Z1-Z3) für die Referenzpegel Herrenhausen und Colnrade dargestellt. Hier zeigt sich, dass sich die mittlere Anzahl von solchen Hochwasserereignissen zwischen den einzelnen Klimamodellen stark unterscheidet. Während die Modellkette MPI_CCLM und MPI_WRF361H in der Referenzperiode und Z2 zwischen fünf und zehn Hochwasserereignissen für den Referenzpegel Herrenhausen hervorbringt, sind es mit der Modellkette ECE_RACMO zwischen 15 und 20 Hochwasserereignissen. Gegenüber der Referenzperiode ist bei drei von acht Modellketten eine Zunahme der Anzahl von Hochwasserereignissen festzustellen, bei zwei Modellketten keine Änderung und bei einer Modellkette (MPI_CCLM) ein Rückgang der Hochwasserhäufigkeit. Bezogen auf den Ensemble-Mittelwert ergibt sich eine Zunahme der Hochwasserhäufigkeit am Pegel Herrenhausen von 13 Ereignissen in 30 Jahren (Referenzperiode) auf 15 Ereignisse (Z2) bzw. 18 Ereignisse (Z3) in 30 Jahren. Die zeitliche Verteilung der Hochwasserereignisse am Pegel Herrenhausen im Jahresverlauf zeigt Abbildung 7-33. Am häufigsten treten größere Hochwasserereignisse in den Monaten Dezember bis März auf, wobei der Monat mit den meisten Hochwasserereignissen der Dezember ist. Bezogen auf das in dieser Abbildung dargestellte Ensemble-Mittel der Hochwasserhäufigkeit ist in den Monaten Dezember bis Februar – insbesondere in der fernen Zukunft – mit einer deutlichen Erhöhung der Hochwasserhäufigkeit zu rechnen, im März mit einer schwachen Abnahme. Neben den genannten Haupthochwassermonaten treten größere Hochwasser auch in den Sommermonaten Juni, Juli und August auf. Für diese Monate ergibt sich aus den Abflusssimulationen ebenfalls ein leichter Anstieg der Hochwasserhäufigkeit. Demnach können größere Hochwasserereignisse künftig auch im Sommer häufiger auftreten.

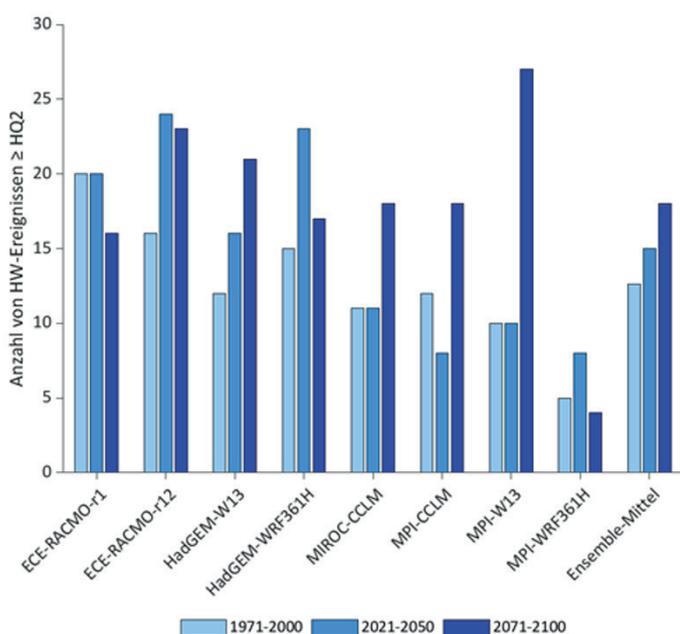


Abbildung 7-32: Anzahl von Hochwasserereignissen mit Scheitelabfluss \geq HQ₂ am Pegel Herrenhausen aufgeschlüsselt nach Klimamodellen für die Referenzperiode sowie die nahe und ferne Zukunft

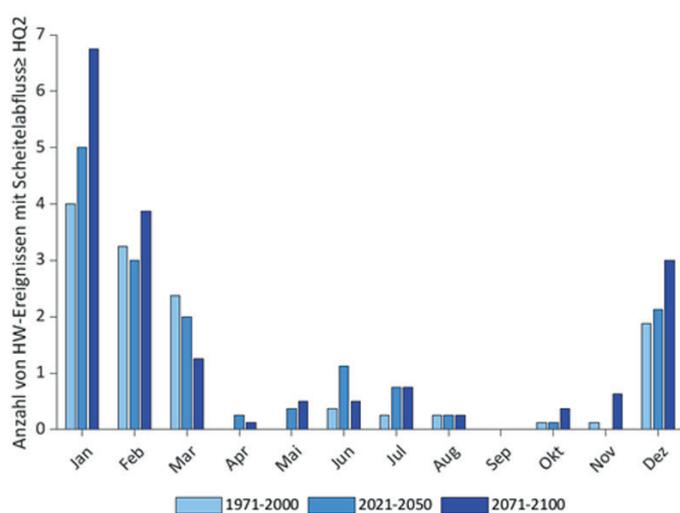


Abbildung 7-33: Ensemblemittel der mittleren Anzahl von Hochwasser je Monat mit Scheitelabfluss \geq HQ₂ am Pegel Herrenhausen für die Referenzperiode sowie die nahe und ferne Zukunft

Die relativen Änderungssignale der Hochwasserhäufigkeit sind in der Abbildung 7-34 und Abbildung 7-35 zusammen mit ihrer Bandbreite dargestellt. Für die nahe Zukunft ergibt sich ein recht heterogenes Bild. Während an vielen Referenzpegeln bezogen auf den Ensemble-Median eine Zunahme der Hochwasserhäufigkeit berechnet wird, ergibt sich für zahlreiche andere Referenzpegel eine Abnahme der Hochwasserhäufigkeit. Große Interquartilsabstände zwischen 50 und 75 % und insbesondere die Spannweite der Whiskers der Box-Plots verdeutlichen die hohe Bandbreite der möglichen Änderungen. Für die ferne Zukunft zeichnet sich ein deutlicheres Bild. Hier ist für den weit überwiegenden Teil der Referenzpegel mit einem deutlichen Anstieg der Hochwasserhäufigkeit zwischen 30 % und 75 % bezogen auf den Ensemble-Median zu rechnen. Als Ausnahme hiervon treten die Referenzpegel im Harz mit einem Rückgang der Hochwasserhäufigkeit in Erscheinung. Die Darstellung der Ensemble-Mittelwerte der Änderungssignale aller 62 Referenzpegel in der Karte (Abbildung 7-36) verdeutlicht ebenfalls das heterogene Bild von Zu- und Abnahmen der Hochwasserhäufigkeit in der nahen Zukunft je nach Referenzpegel. Für die ferne Zukunft ergeben sich mit Ausnahme des Harzes deutliche Zunahmen der Häufigkeit von größeren Hochwasserereignissen. Dabei ist eine stärkere Häufung von größeren Hochwasserereignissen in der westlichen Landeshälfte gegenüber dem südöstlichen Landesteil zu erkennen.

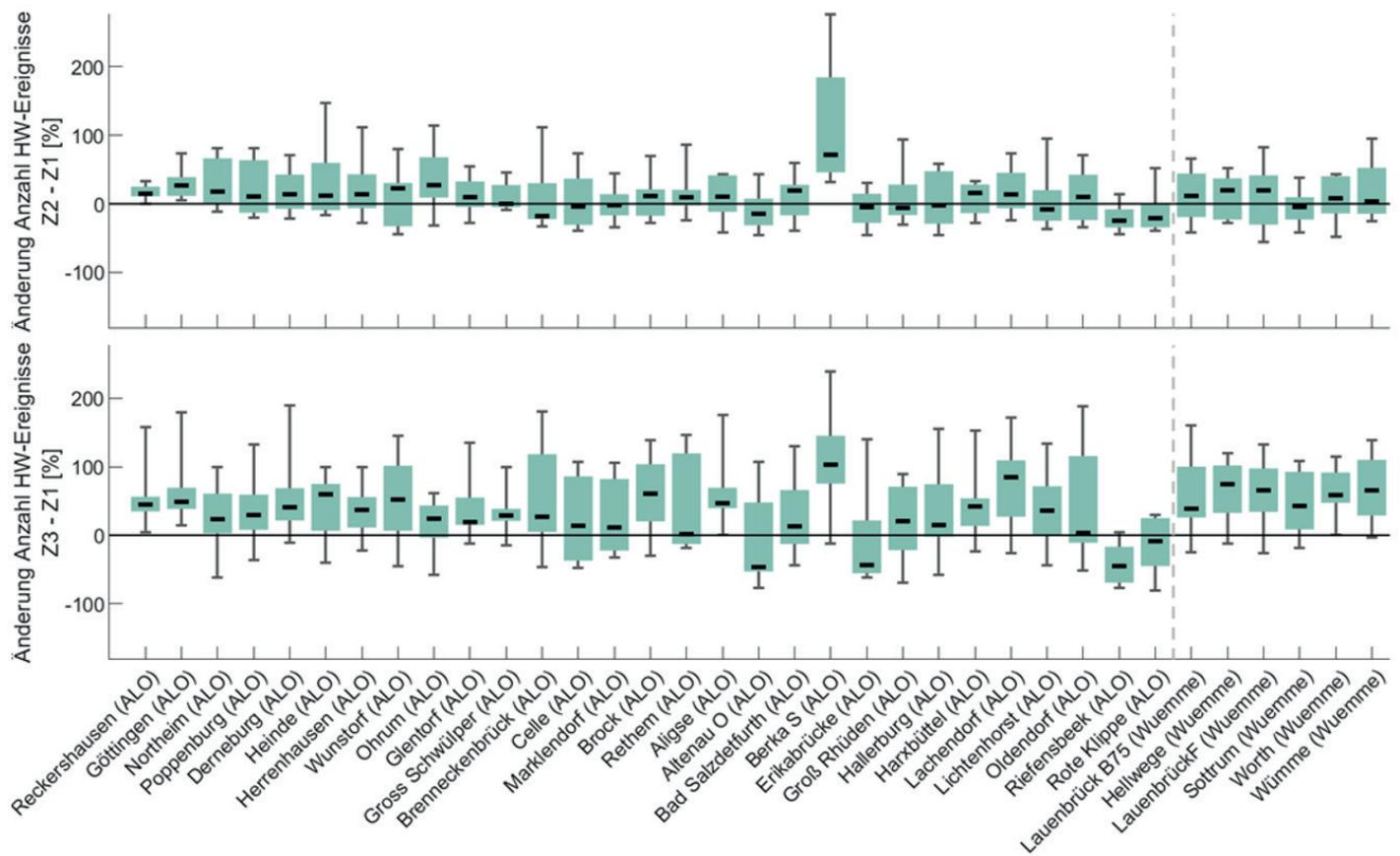


Abbildung 7-34: Änderungssignale der Hochwasserhäufigkeit für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode (1971-2000) für die Referenzpegel im Aller-Leine-Oker-Gebiet und im Einzugsgebiet der Wümme.

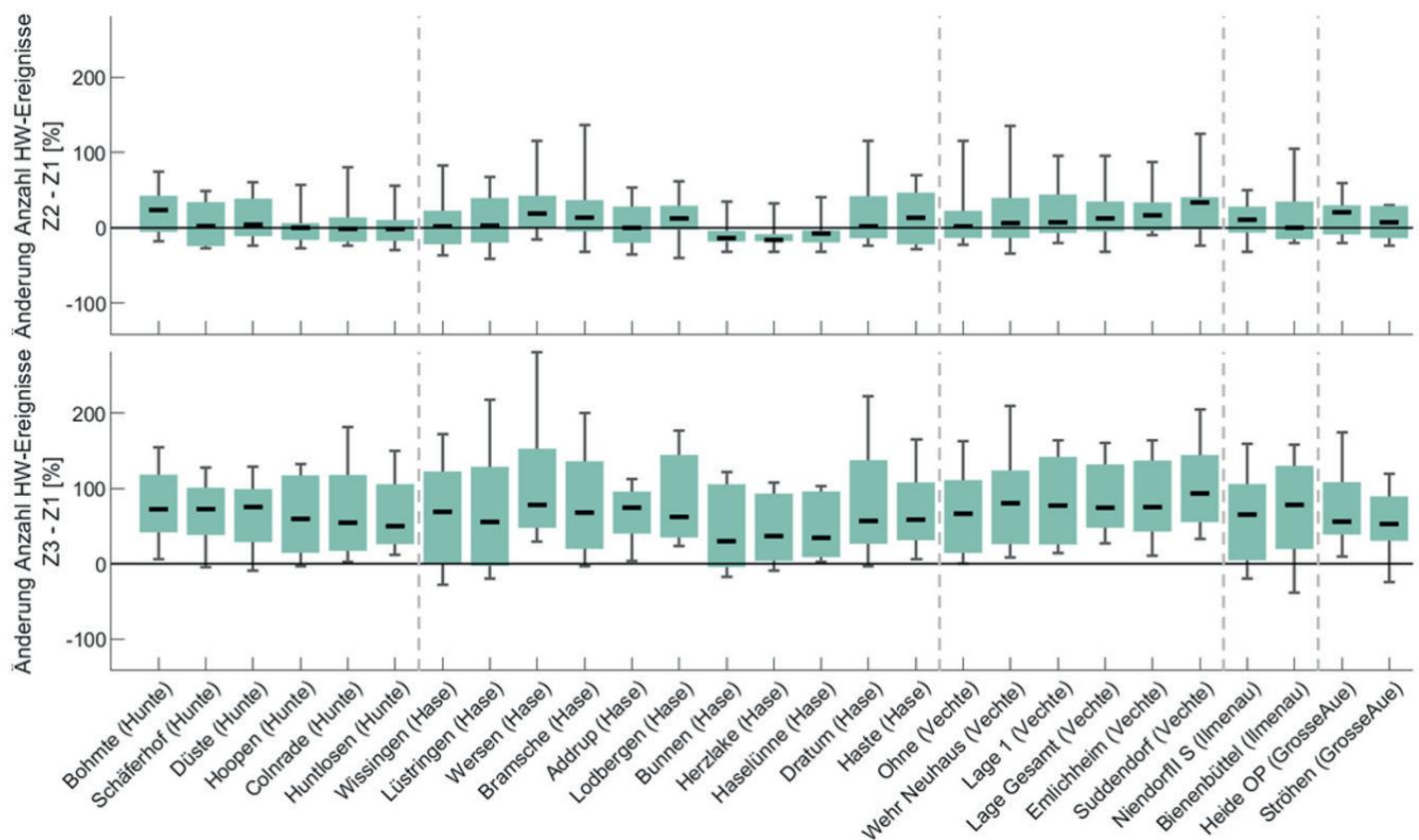


Abbildung 7-35: Änderungssignale der Hochwasserhäufigkeit für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode (1971-2000) für die Referenzpegel in den Einzugsgebieten von Hunte, Hase, Vechte, Ilmenau und Großer Aue

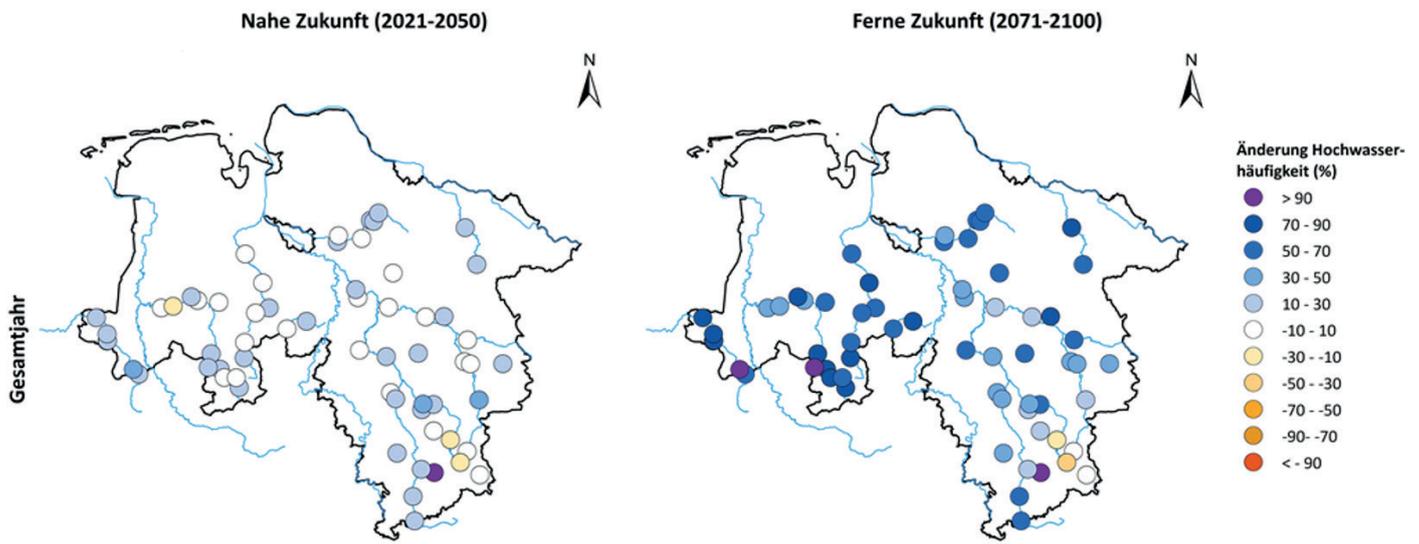


Abbildung 7-36: Ensemble-Mittelwerte der Änderungssignale der Hochwasserhäufigkeit aller 62 Referenzpegel für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode (1971-2000) bezogen auf das Gesamtjahr

7.6.3.4 Hochwasserdauer

Ergänzend zur Hochwasserhäufigkeit wurde in KliBiW 6 die zukünftige Entwicklung der Dauer von größeren Hochwasserereignissen untersucht (vgl. auch Kapitel 4.2). Die mögliche künftige Entwicklung der Hochwasserdauer am Referenzpegel Herrenhausen zeigt Abbildung 7-37. Ähnlich wie bei der Hochwasserhäufigkeit unterscheidet sich die mittlere Dauer eines größeren Hochwasserereignisses deutlich zwischen den verschiedenen Klimamodellen. Für die Modellkette MPI_CCLM ergibt sich für die Referenzperiode eine mittlere Hochwasserdauer von 3,2 Tagen und für die Modellkette HadGEM_W13 von 7,5 Tagen. Mit 6 von 8 Modellketten ergibt sich eine Erhöhung der mittleren Hochwasserdauer von im Ensemble-Mittel 4,7 Tagen auf 5,1 Tage. Für die ferne Zukunft berechnet sich aus den Abflusssimulationen ebenfalls eine Zunahme der Hochwasserdauer bei 6 von 8 Modellketten. Im Ensemble-Mittel resultiert für die ferne Zukunft eine Erhöhung der mittleren Dauer eines größeren Hochwasserereignisses um 1,6 Tage auf 5,3 Tage.

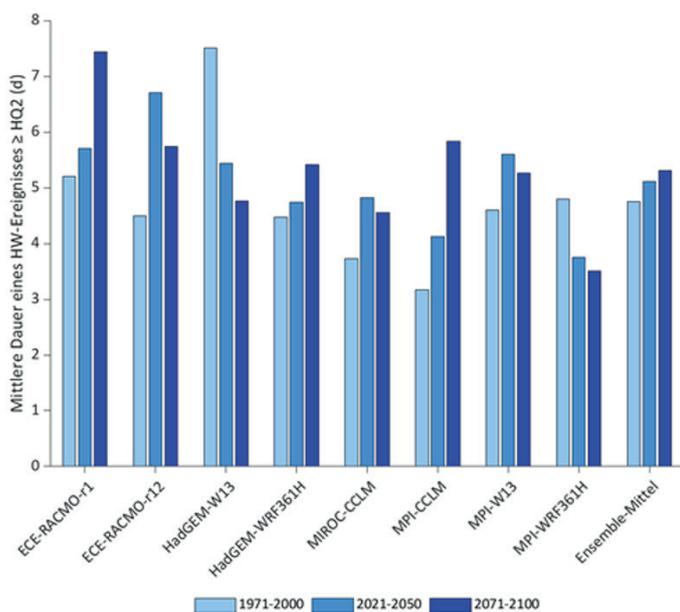


Abbildung 7-37: Mittlere Dauer (Tage) von Hochwasserereignissen mit Scheitelabfluss \geq HQ2 am Pegel Herrenhausen aufgeschlüsselt nach Klimamodellen für die Referenzperiode sowie die nahe und ferne Zukunft

Die am Beispiel des Pegels Herrenhausen beschriebenen Ergebnisse und Änderungen treffen auf eine Vielzahl weiterer Referenzpegel zu. Die Änderungssignale der Hochwasserdauer für die 62 Referenzpegel sind in Abbildung 7-38 und Abbildung 7-39 dargestellt. Bezogen auf den Ensemble-Median der Änderungssignale ergibt sich für die nahe Zukunft an 23 der 62 Referenzpegel eine Abnahme der durchschnittlichen Hochwasserdauer um 5,8 % gemittelt über diese Pegel. Für die übrigen Referenzpegel mit einer Zunahme der Hochwasserdauer beträgt diese gemittelt über diese Pegel 9,9 % (bezogen auf den Ensemble-Median).

Für die ferne Zukunft ist an 47 von 62 Referenzpegeln mit einer Zunahme der mittleren Dauer von größeren Hochwasserereignissen zu rechnen. Die durchschnittliche Zunahme beträgt – bezogen auf die Ensemble-Mediane – gemittelt über diese 47 Referenzpegel 14 %. An den übrigen Referenzpegeln wird eine Abnahme der mittleren Hochwasserdauer um 5,8 % berechnet. Diese Pegel sind weit überwiegend im Aller-Leine-Oker-Gebiet verortet.

Die Karte der mittleren Änderungssignale der Hochwasserdauer (Abbildung 7-40) zeigt wie die Box-Whiskers-Plots ein heterogenes Bild. Räumlich betrachtet zeigt sich, dass die Zunahmen der Hochwasserdauer schwerpunktmäßig für die Referenzpegel in der westlichen Landeshälfte (Flussgebiete der Hase, Hunte und Große Aue) berechnet werden. Dies gilt insbesondere für die ferne Zukunft. Im Einzugsgebiet der Wümme sowie an den Pegeln des Harzes und im Niedersächsischen Bergland werden für zahlreiche Referenzpegel abnehmende Hochwasserdauern in der nahen und fernen Zukunft berechnet.

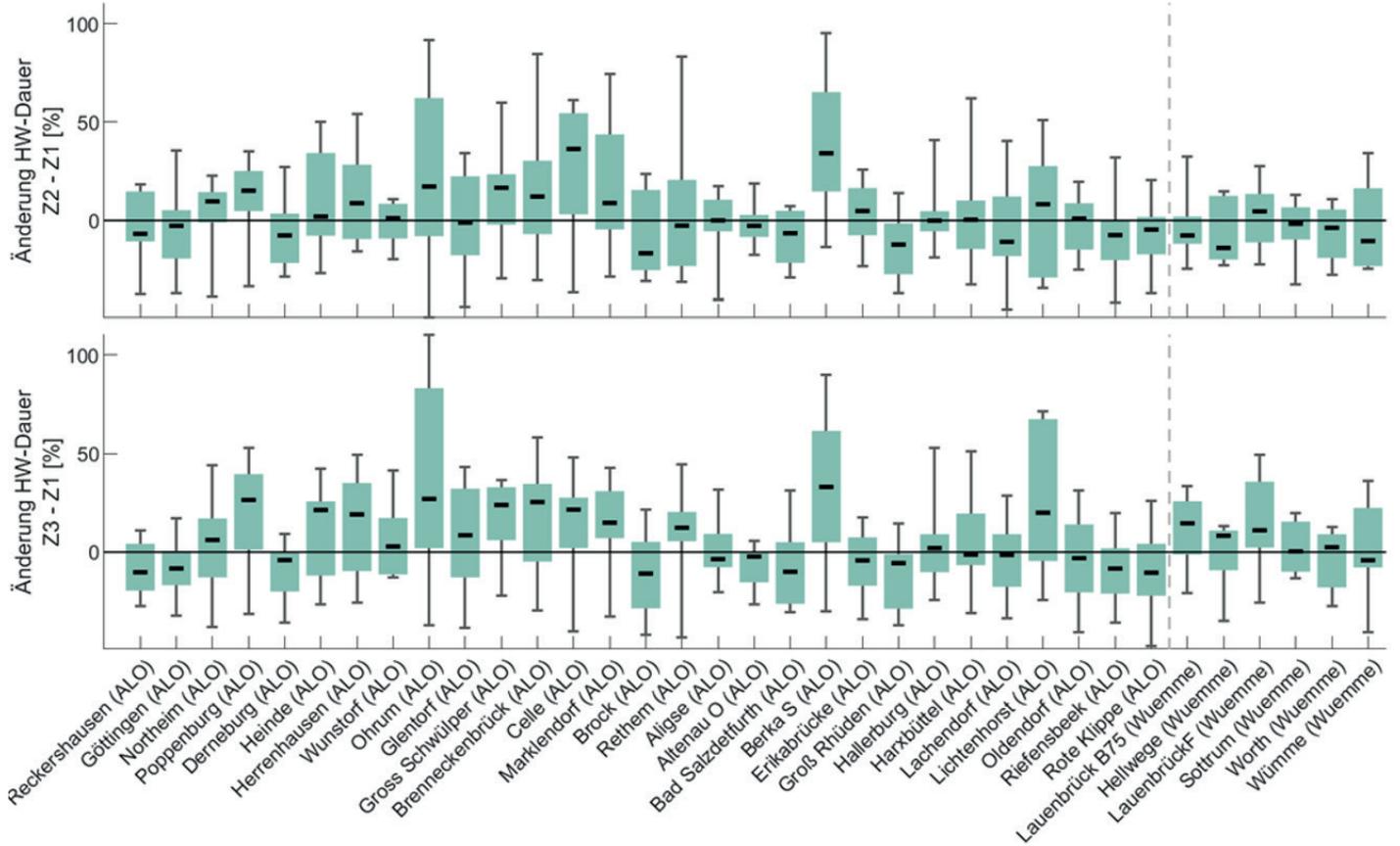


Abbildung 7-38: Änderungssignale der mittleren Dauer eines größeren Hochwasserereignisses (Scheitelabfluss \geq HQ₂) für die nahe und die ferne Zukunft für die Referenzpegel im Aller-Leine-Oker-Gebiet und im Einzugsgebiet der Wümme.

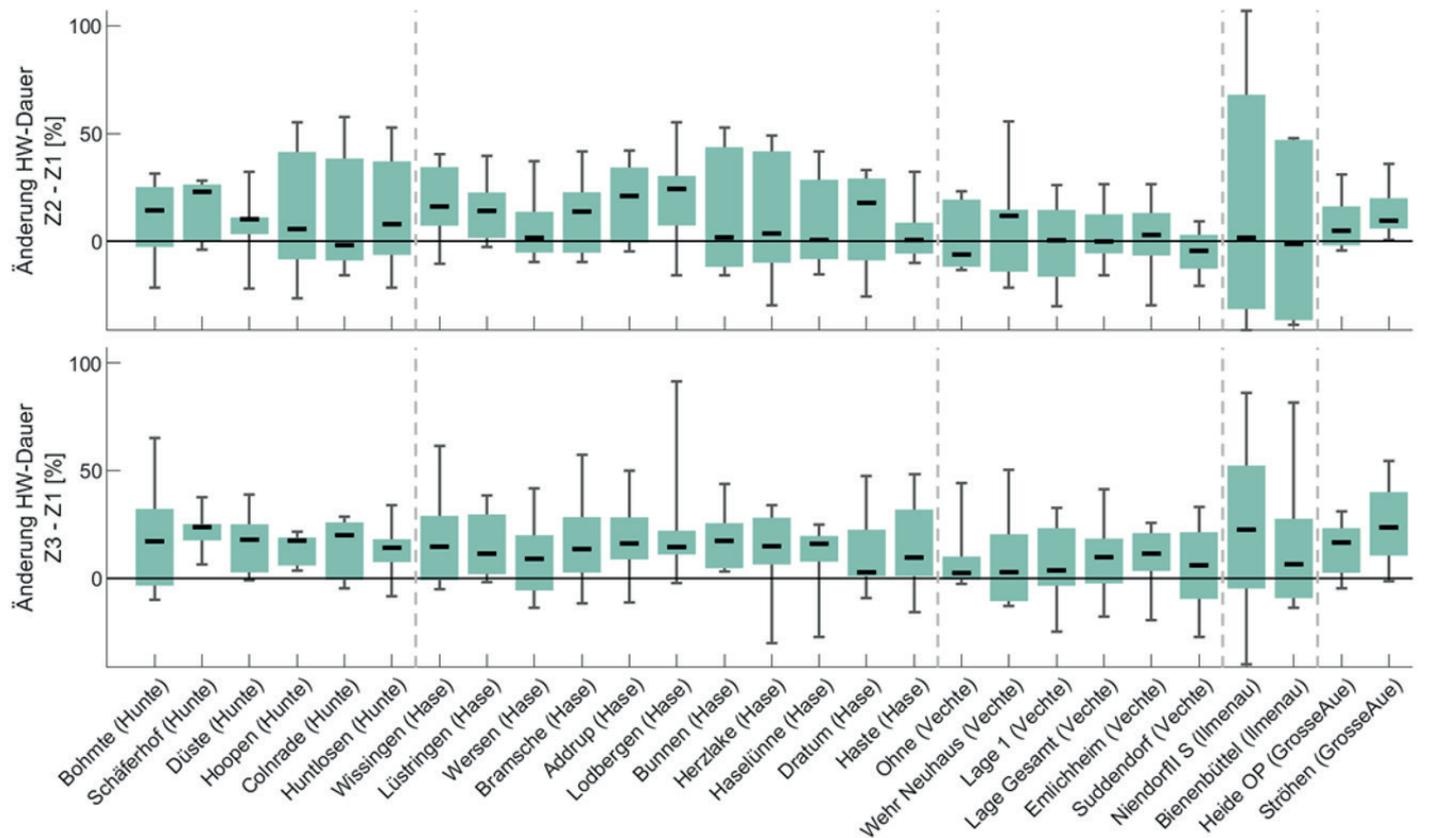


Abbildung 7-39: Änderungssignale der mittleren Dauer eines größeren Hochwasserereignisses (Scheitelabfluss \geq HQ₂) für die nahe und die ferne Zukunft für die Referenzpegel in den Einzugsgebieten von Hunte, Hase, Vechte, Ilmenau und Großer Aue

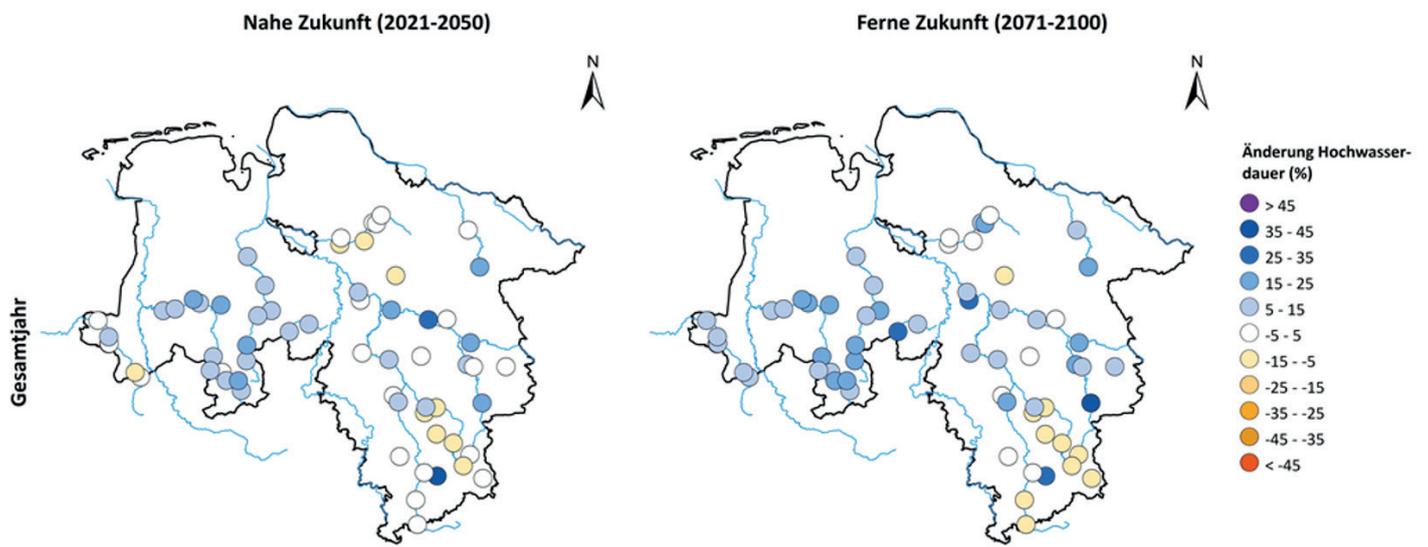


Abbildung 7-40: Ensemble-Mittelwerte der Änderungssignale der mittleren Dauer eines größeren Hochwasserereignisses (Scheitelabfluss \geq HQ₂) für 62 Referenzpegel für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode (1971-2000) bezogen auf das Gesamtjahr

7.6.3.5 Hochwasservolumen

Das mittlere Abflussvolumen eines größeren Hochwasserereignisses mit Scheitelabfluss \geq HQ₂ (Wellenvolumen, auch als „Fülle“ bezeichnet) ergänzt als Hochwasserkenngröße die Analyse der möglichen Hochwasserverhältnisse der Zukunft. Die Änderungssignale für das mittlere Abflussvolumen eines größeren Hochwasserereignisses sind exemplarisch für den Referenzpegel Herrenhausen in Abbildung 7-41 differenziert nach Klimamodell für die drei Zeiträume dargestellt. Das mittlere Wellenvolumen unterscheidet sich zwischen den einzelnen Modellketten teils deutlich und variiert für die Referenzperiode (1971-2000) zwischen 15,6 Mio. m³ (MPI_W13) und 37,6 Mio. m³. In der nahen Zukunft ist im Vergleich zur Referenzperiode bei 6 von 8 Modellketten mit einer Zunahme des mittleren Wellenvolumens zu rechnen. Im Ensemble-Mittel resultiert eine Zunahme des mittleren Wellenvolumens um 15,5 % auf 28,2 Mio. m³. Für die ferne Zukunft wird eine deutliche Zunahme des Wellenvolumens um 57,2 % gegenüber der Referenzperiode auf 38,3 Mio. m³ berechnet.

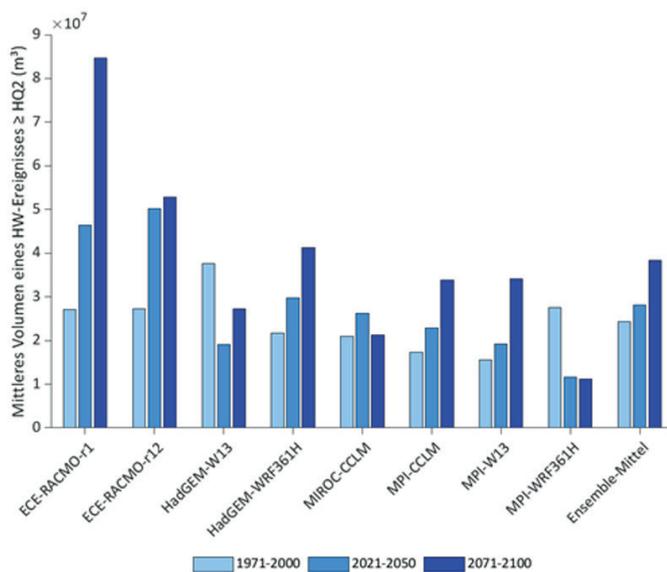


Abbildung 7-41: Mittleres Abflussvolumen (Fülle) eines Hochwasserereignisses mit Scheitelabfluss \geq HQ₂ am Pegel Herrenhausen differenziert nach Klimamodell und Zeitraum

Die Änderungssignale des Hochwasserwellenvolumens für alle 62 Referenzpegel sind als Box-Whiskers-Plot in Abbildung 7-42 und Abbildung 7-43 dargestellt. Bezogen auf den Ensemble-Median wird für die nahe Zukunft an zwei Dritteln der Referenzpegel eine unterschiedlich große Zunahme des mittleren Wellenvolumens eines größeren Hochwassers berechnet. Die durchschnittliche Zunahme beträgt gemittelt über diese Pegel 24,2 %, wobei die größte Zunahme mit 89,1 % auf den Pegel Harxbüttel (Schunter) und die geringste Zunahme mit 1,7 % auf den Pegel Lauenbrück (Fintau) entfällt. An den übrigen Pegeln ergibt sich aus den Abflusssimulationen ein Rückgang des mittleren Wellenvolumens von 25,1 % am Pegel Wümme (Wümme) und 0,4 % am Pegel Göttingen (Leine). Gemittelt über alle Referenzpegel mit rückläufigen Wellenvolumina ergibt sich bezogen auf den Ensemble-Median ein Rückgang von -8,6 %.

Die Mediane des Ensembles ergeben für die ferne Zukunft eine starke Zunahme des mittleren Hochwasserwellenvolumens gegenüber der Referenzperiode. Für diesen Zeitraum wird für 54 von 62 Referenzpegeln ein Anstieg des Hochwasserwellenvolumens berechnet. Der Anstieg beläuft sich für diese Pegel, bezogen auf den Ensemble-Median, auf durchschnittlich 41 % und variiert zwischen 2,7 % am Pegel Reckershausen (Leine) und 91,4 % am Pegel Ströhen (Große Aue). Für die Pegel im Harz sowie die Pegel Brock (Böhme) und Bad Salzdetfurth (Lamme) ergibt sich ein deutlicher Rückgang des mittleren Hochwasserwellenvolumens zwischen 6,3 % und 28,6 %. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist die große Bandbreite der Änderungssignale zu beachten. Diese beträgt für beide Zukunftszeiträume (Z2 und Z3) bezogen auf den Interquartilsabstand mehrheitlich 20-100 % bei noch wesentlich größeren Spannweiten zwischen Minima und Maxima von teils mehreren hundert Prozent.

Die Kartendarstellung der Ensemble-Mittelwerte der Änderungssignale des mittleren Hochwasserwellenvolumens (Abbildung 7-44) zeigt wie die Boxplots für die meisten Referenzpegel in Niedersachsen eine Zunahme für die Hochwasserkenngröße „Wellenvolumen“ verglichen mit der Referenzperiode. Diese Zunahme ist für die ferne Zukunft mehrheitlich etwas stärker ausgeprägt als für die nahe Zukunft. Räumlich betrachtet treten als Schwerpunkt zunehmender Hochwasserwellenvolumina die Referenzpegel in der westlichen Landeshälfte (Flussgebiete der Hase, Hunte und Große Aue) hervor. Dies gilt in besonderem Maße für die ferne Zukunft.

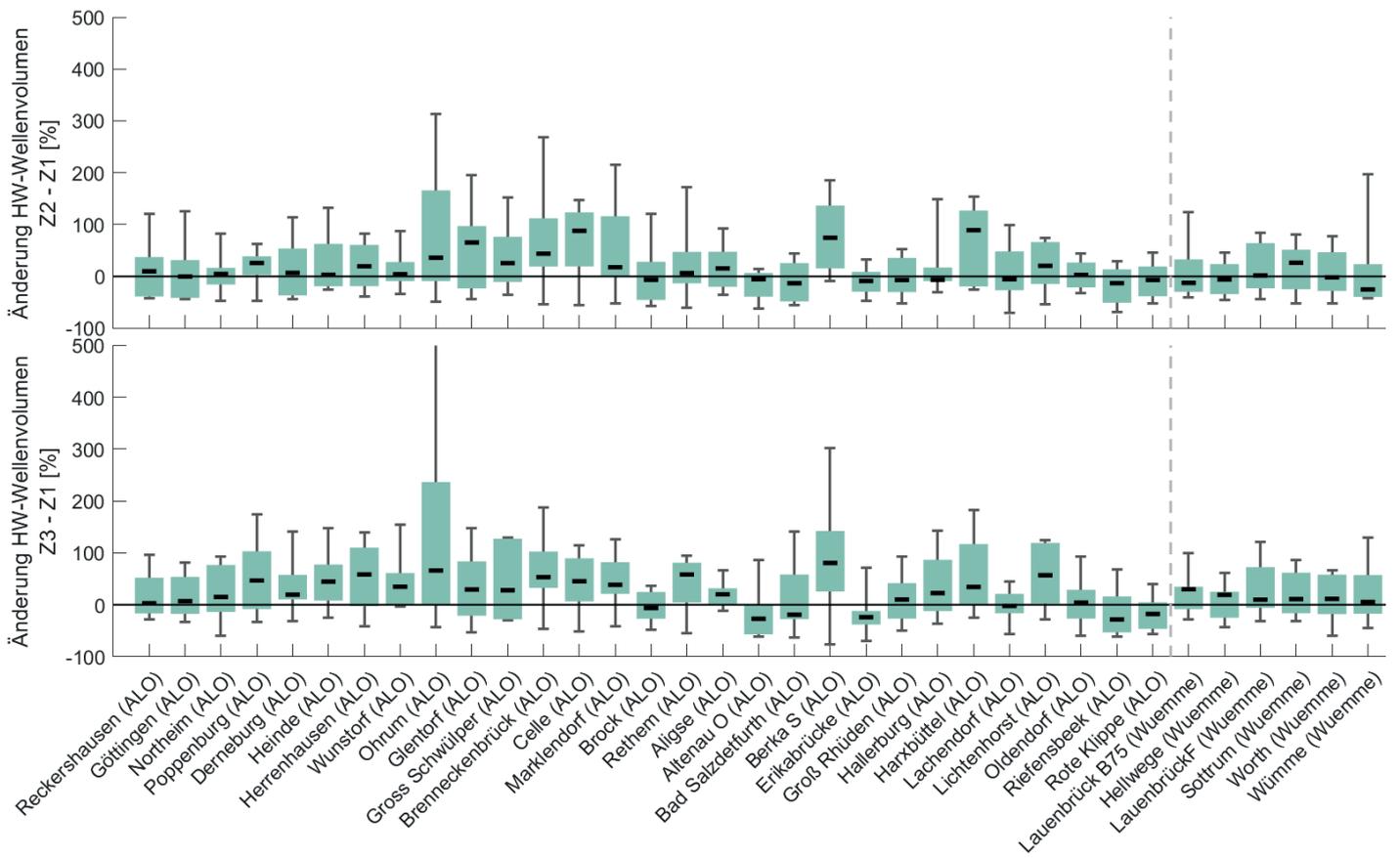


Abbildung 7-42: Änderungssignale des mittleren Wellenvolumens eines größeren Hochwasserereignisses (Scheitelabfluss \geq HQ2) für die nahe und die ferne Zukunft für die Referenzpegel im Aller-Leine-Oker-Gebiet und im Einzugsgebiet der Wümme bezogen auf die Referenzperiode.

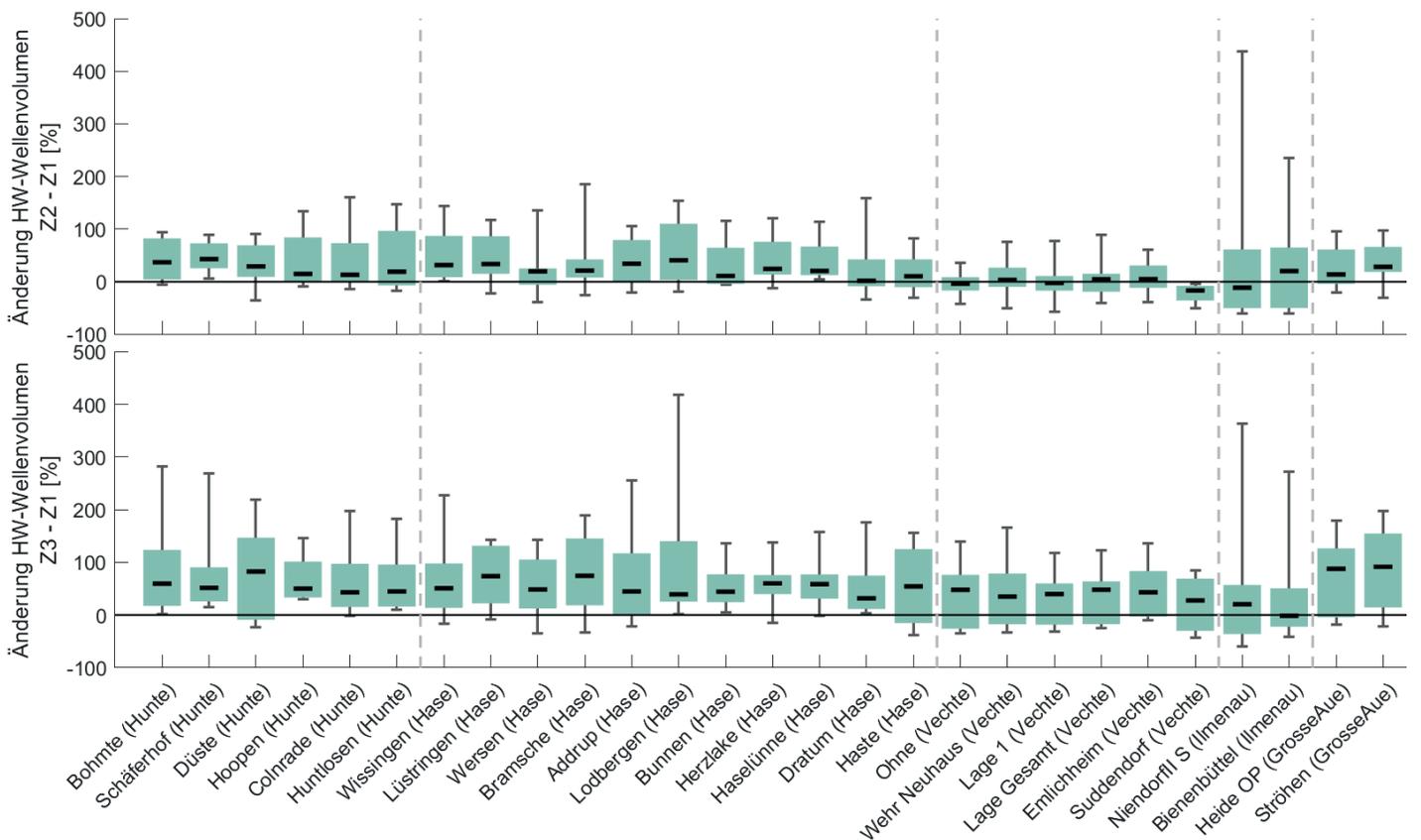


Abbildung 7-43: Änderungssignale des mittleren Wellenvolumens eines größeren Hochwasserereignisses (Scheitelabfluss \geq HQ2) für die nahe und die ferne Zukunft für die Referenzpegel in den Einzugsgebieten von Hunte, Hase, Vechte, Ilmenau und Großer Aue bezogen auf die Referenzperiode

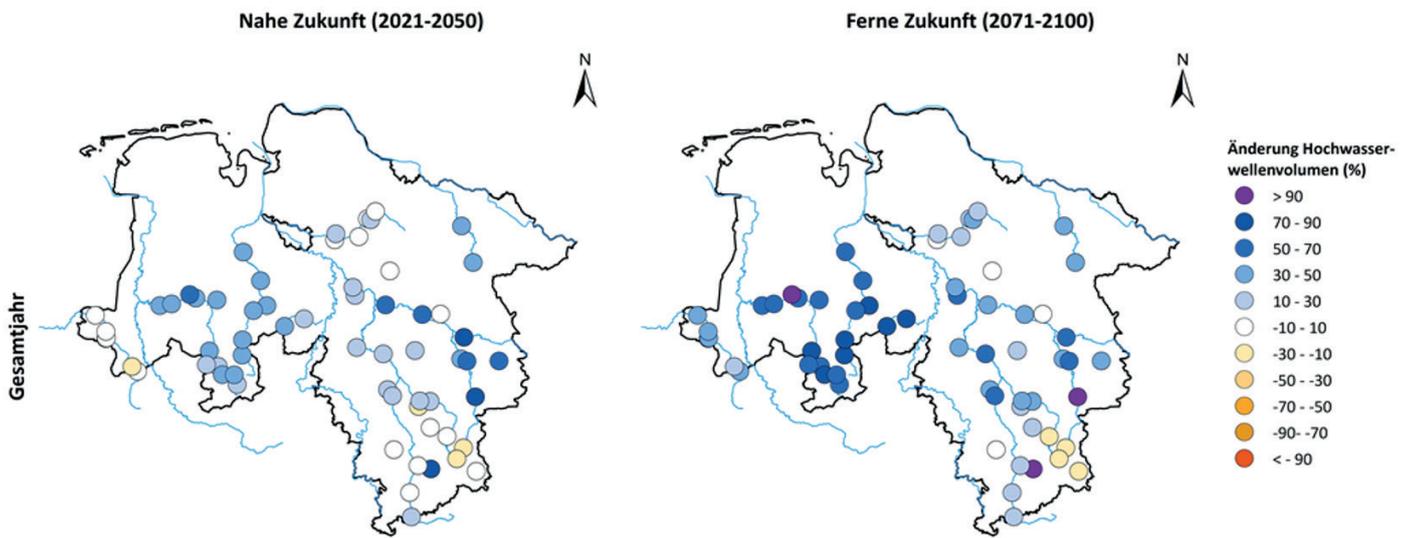


Abbildung 7-44: Ensemble-Mittelwerte der Änderungssignale des mittleren Wellenvolumens eines größeren Hochwasserereignisses (Scheitelabfluss \geq HQ₂) für 62 Referenzpegel für die nahe und ferne Zukunft bezogen auf das Gesamtjahr

7.6.3.6 Hochwassersaisonalität

Die Saisonalität, das heißt der mittlere Zeitpunkt des Auftretens von Hochwassern innerhalb eines Jahres, ist eine bedeutende Charakteristik von Hochwasserprozessen. Ähnlichkeiten im mittleren Eintrittszeitraum der Hochwasser können aus Ähnlichkeiten in mehreren hochwasserbeeinflussenden physiographischen und meteorologischen Bedingungen resultieren. Solche Bedingungen sind beispielsweise räumlich-zeitliche Muster der Niederschläge, die Schneeschmelze, die Wetterlagen und das Gebietsverhalten. Inwieweit klimatische Veränderungen die Eintrittszeitpunkte von größeren Hochwasserereignissen verändern, wurde in der KliBiW-Projektphase 6 durch die Auswertung der Hochwasserkenngröße „Hochwassersaisonalität“ berücksichtigt. Dazu wurde die Hochwassersaisonalität nach der Methode von Burn (1997), erweitert nach Schuhmann & Dietrich (2007), als mittlerer Eintrittszeitpunkt eines Hochwasserereignisses mit Scheitelabfluss \geq HQ₂ berechnet und ausgewertet (Methodik s. Kapitel 10).

Die mittlere Saisonalität von größeren Hochwasserereignissen ist exemplarisch für den Pegel Herrenhausen in Abbildung 7-45 als Burn-Diagramm dargestellt. Die Abbildung zeigt (in teilweiser Überlagerung) die mittlere Saisonalität für alle drei Zeiträume differenziert nach Klimamodell als breiteren Streifen und den Ensemble-Mittelwert als dunkler gefärbte Linie. Die Länge des Streifens bzw. der Linie ist ein Maß für die Streuung der Hochwasserereignisse im Jahresverlauf. Dabei gilt, je stärker gehäuft die Hochwasserereignisse im Jahresverlauf auftreten, desto länger ist die Linie.

Für den Pegel Herrenhausen (Abbildung 7-45) variiert die mittlere Saisonalität in der Referenzperiode zwischen dem 12.01. und dem 11.02., in Z2 zwischen dem 21.01. und

dem 08.02. und in Z3 zwischen dem 04.01. und dem 03.02. eines Jahres. Damit stellen die Monate Januar und Februar die Monate dar, in denen größere Hochwasserereignisse im Mittel auftreten. Gegenüber der Referenzperiode berechnet sich in der nahen Zukunft (Z2) eine leichte Verschiebung des mittleren Hochwassereintrittszeitpunktes um 8 Tage in den Februar hinein. In der fernen Zukunft (Z3) ergibt sich aus dem Simulationen im Ensemble-Mittel eine Verfrühung des mittleren Eintrittszeitpunktes um 9 Tage in den Januar hinein.

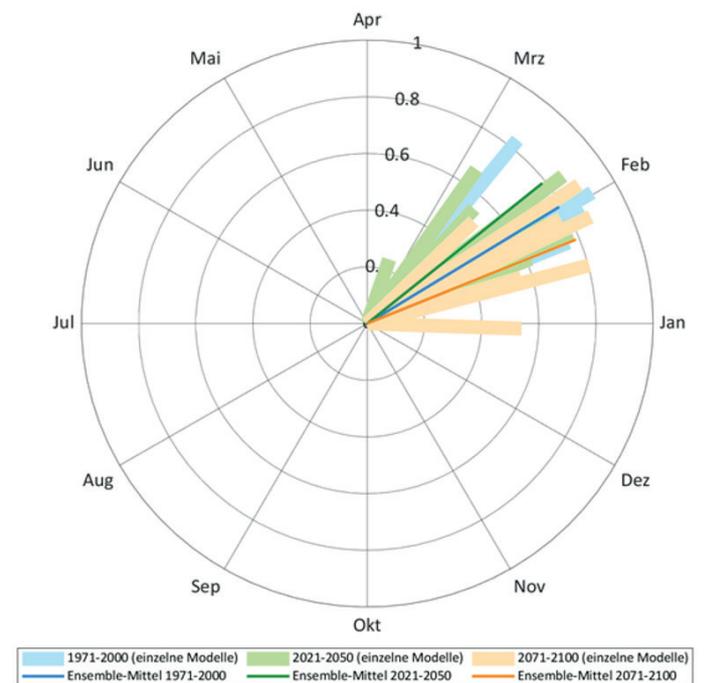


Abbildung 7-45: Burn-Diagramm für den Pegel Herrenhausen (Leine)

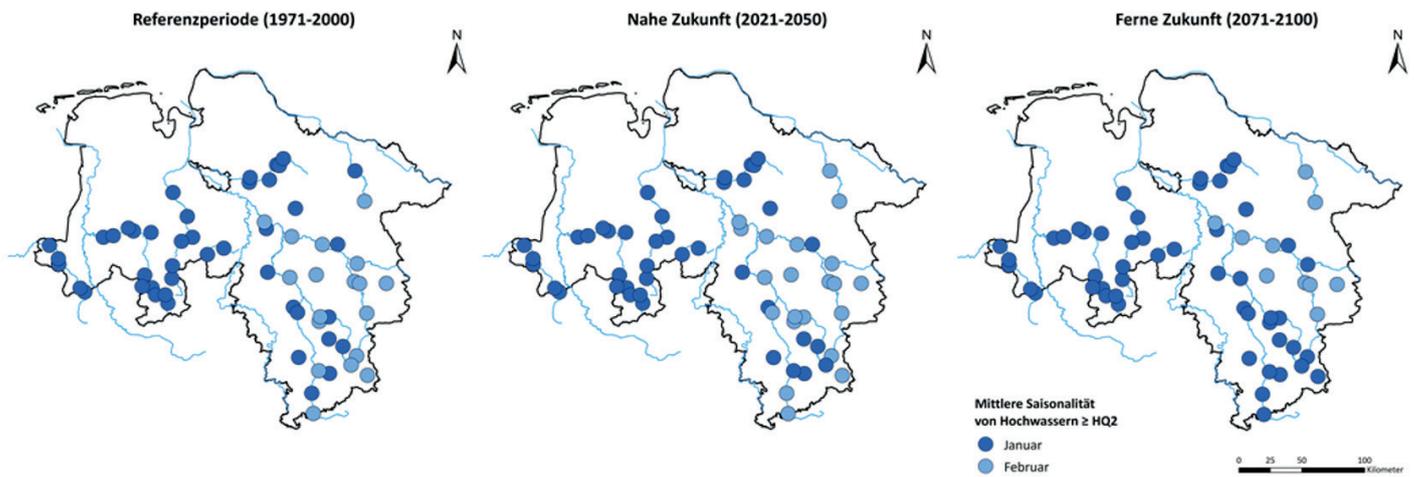


Abbildung 7-46: Mittlerer Eintrittszeitpunkt von Hochwassern mit Scheitelabfluss \geq HQ₂ an den 62 Referenzpegel für die nahe und die ferne Zukunft

Die Kartendarstellung der Ensemble-Mittelwerte der Hochwassersaisonalität (Abbildung 7-46) verdeutlicht, wie auch für den Pegel Herrenhausen gezeigt, dass der mittlere Eintrittszeitpunkt von größeren Hochwasserereignissen, bezogen auf die Referenzperiode 1971-2000, an allen Referenzpegel im Januar oder Februar liegt. Hierbei zeigt sich ein leichter Gradient von West nach Ost. In der westlichen Landeshälfte treten Hochwasser im Mittel im Januar auf, in der östlichen Landeshälfte mit Ausnahme der Pegel im Harz und einiger Pegel im Niedersächsischen Bergland im Februar. In der nahen und der fernen Zukunft ergibt sich an den meisten Pegeln eine Verschiebung des mittleren Hochwassereintrittszeitpunktes um einige Tage hin zu einem früheren oder späteren Zeitpunkt. Dennoch bleiben die Monate Januar und Februar die Monate, in denen Hochwasser im Mittel auftreten.

Die Änderungssignale der Hochwasser-saisonalität sind in Abbildung 7-47 und Abbildung 7-48 als Box-Whiskers-Plot dargestellt. Die simulierten Änderungen der mittleren Saisonalität unterscheiden sich zwischen den einzelnen Referenzpegeln deutlich. Für die nahe Zukunft wird an 20 von 62 Referenzpegeln bezogen auf den Ensemble-Median eine Verfrühung des mittleren Hochwassereintrittszeitpunktes zwischen 0,5 Tagen (Pegel Ohrum) und 17,5 Tagen (Pegel Riefensbeek) simuliert. Für die übrigen Referenzpegel werden Verschiebungen des mittleren Hochwassereintrittszeitpunktes zwischen 0,5 Tagen (Pegel Bramsche und Wunstorf) und 12 Tagen (Pegel Harxbüttel) berechnet.

In der fernen Zukunft werden größere Änderungen der mittleren Saisonalität für die meisten Referenzpegel berechnet,

als in der nahen Zukunft. Für 32 Referenzpegel wird eine Verfrühung des mittleren Hochwassereintrittszeitpunktes berechnet. Diese beträgt bezogen auf die Ensemble-Mediane im Mittel dieser Pegel 9,3 Tage und variiert zwischen 32 Tagen (Pegel Erikabrücke) und 0,5 Tagen (Pegel Worth und Harxbüttel). An den übrigen Pegeln wird eine Verschiebung des mittleren Eintrittszeitpunktes zwischen 1,5 Tagen (mehrere Pegel) und 10 Tagen (Pegel Düste und Colnrade) zu einem späteren Zeitpunkt im Jahr berechnet. Bezogen auf beide Zukunftszeiträume ist eine hohe Bandbreite der Änderungssignale festzustellen. Für die meisten Referenzpegel gibt es sowohl Modelle, mit denen ein früherer Eintrittszeitpunkt gegenüber der Referenzperiode berechnet wird, als auch solche, mit denen Hochwasser im Mittel später im Jahr auftreten.

Die Karte der Ensemble-Mittelwerte der Änderungssignale für die Hochwassersaisonalität (Abbildung 7-49) zeigt für die nahe Zukunft zunächst ein recht heterogenes Bild aus Pegeln mit Verschiebungen der Hochwassersaisonalität zu einem früheren oder späteren Zeitpunkt. Für die ferne Zukunft ergibt sich ein differenzierteres Bild eines Gradienten der Änderungssignale von West nach Ost. Für die Referenzpegel in der Westhälfte Niedersachsens und dem Einzugsgebiet der Wümme ist für den Großteil ein früherer mittlerer Eintrittszeitpunkt größerer Hochwasserereignisse zu erwarten. In der Osthälfte Niedersachsens, insbesondere an den Referenzpegeln im Niedersächsischen Bergland und dem Harz, wird für die ferne Zukunft eine deutliche Verfrühung des mittleren Hochwassereintrittszeitpunktes prognostiziert. Daraus ergibt sich, dass in der fernen Zukunft größere Hochwässer in diesen Regionen im Mittel im Januar auftreten.

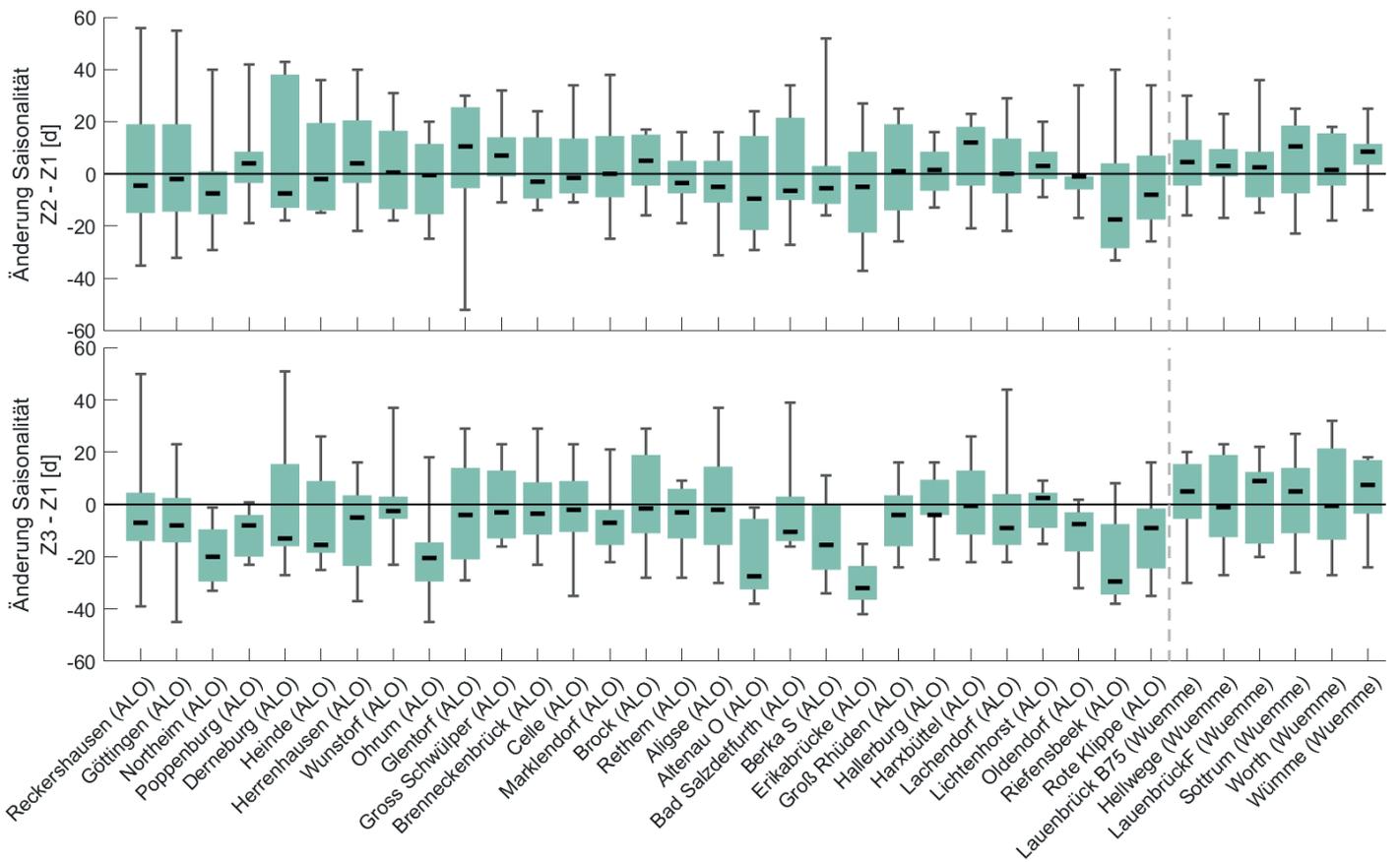


Abbildung 7-47: Absolute Änderungssignale (Tage) des mittleren Eintrittszeitpunkts eines größeren Hochwasserereignisses (Scheitelabfluss \geq HQ₂) für die nahe und die ferne Zukunft für die Referenzpegel im Aller-Leine-Oker-Gebiet und im Einzugsgebiet der Wümme bezogen auf die Referenzperiode

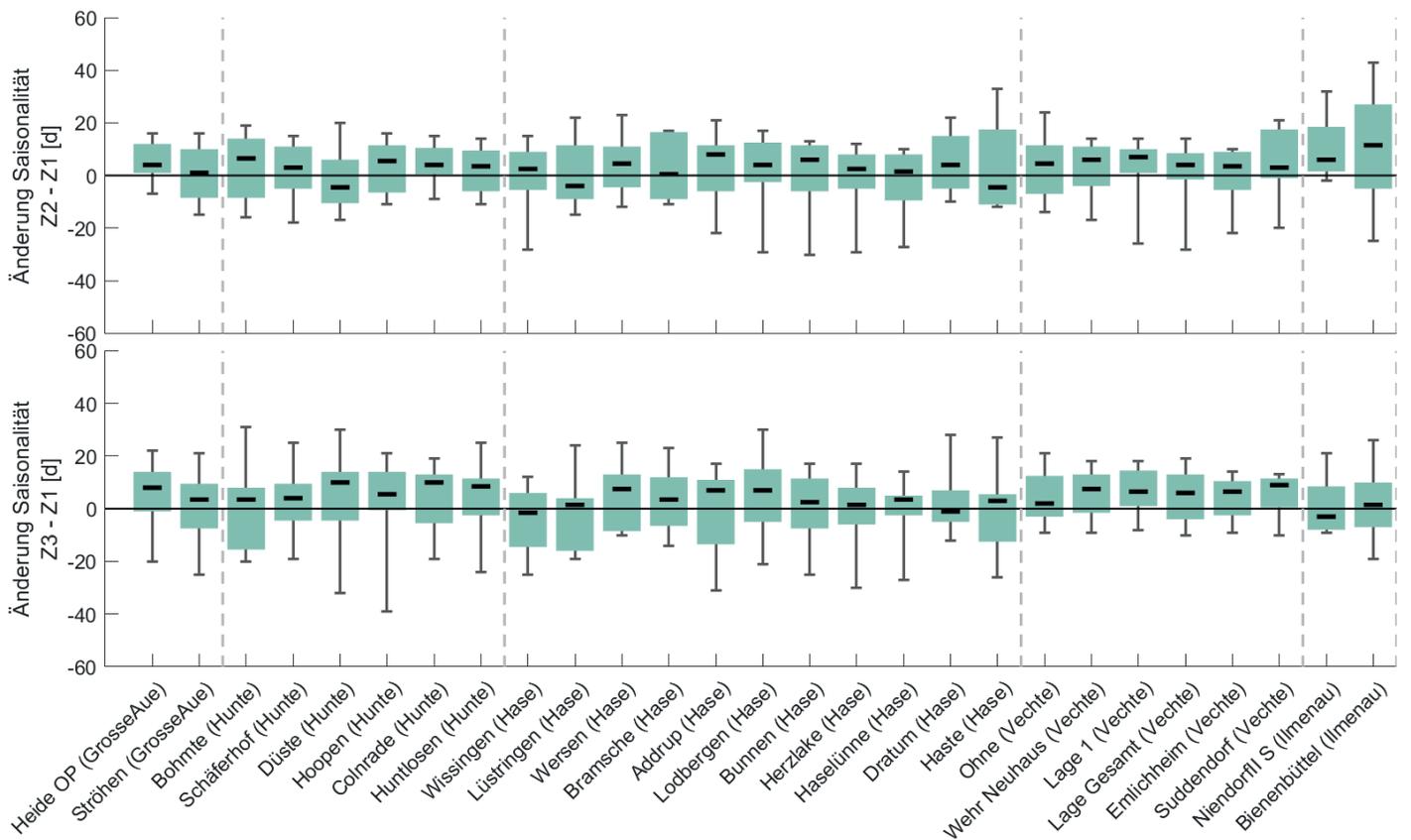


Abbildung 7-48: Absolute Änderungssignale (Tage) des mittleren Eintrittszeitpunkts eines größeren Hochwasserereignisses (Scheitelabfluss \geq HQ₂) für die nahe und die ferne Zukunft für die Referenzpegel in den Einzugsgebieten von Großer Aue, Hunte, Hase, Vechte und Ilmenau bezogen auf die Referenzperiode

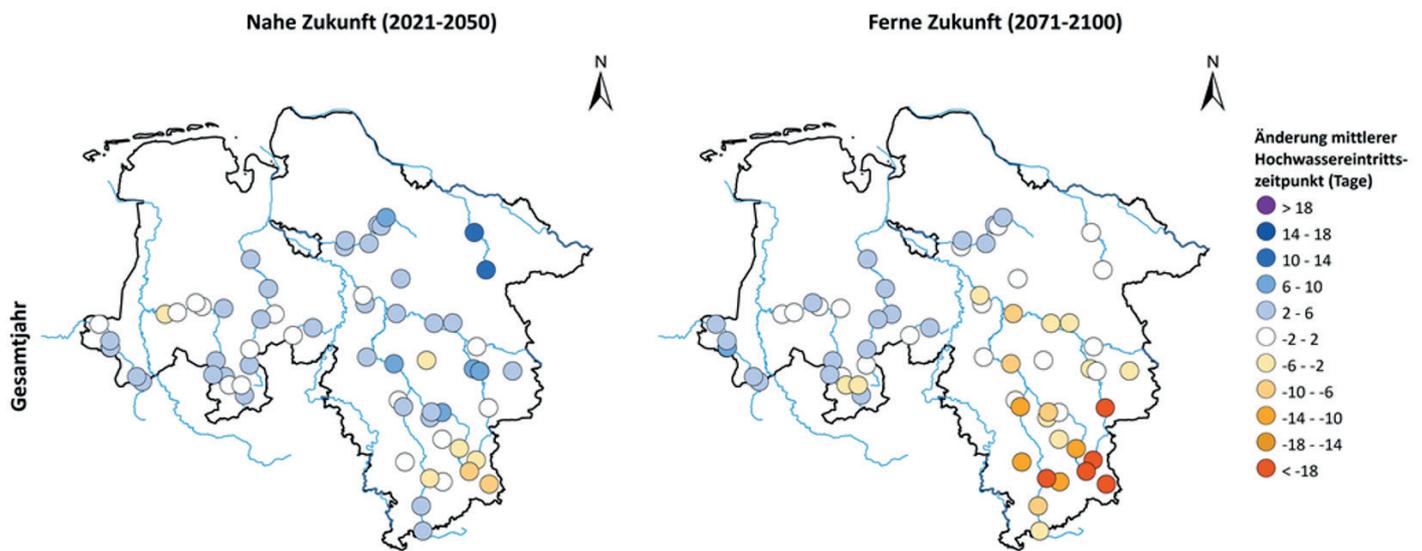


Abbildung 7-49: Ensemble-Mittelwert der Änderung des mittleren Eintrittszeitpunkts von Hochwassern mit Scheitelabfluss \geq HQ₂ an den 62 Referenzpegeln für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode (1971-2000)

7.7 Vergleich mit Ergebnissen aus KliBiW Phase 4

Umfangreiche Untersuchungen zur möglichen Entwicklung der Hochwasserverhältnisse in der Zukunft wurden bereits in der Projektphase 4 von KliBiW durchgeführt (NLWKN 2017). In dieser Projektphase wurden die Änderungen von Abflüssen und Hochwasserkenngrößen auf Basis eines SRES A1B-Ensembles und eines RCP8.5-Ensembles simuliert und ausgewertet. Mit dem BLFG-Kernensemble wurde in der Projektphase 6 von KliBiW erneut ein RCP8.5-Ensemble gewählt (s. Kapitel 5). Diese Auswahl erfolgte unter anderem mit der Intention, die bisherigen Ergebnisse aus Projektphase 4 abzusichern und zu ergänzen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der beiden Projektphasen, basierend auf dem jeweiligen RCP8.5-Ensemble, anhand der hydrologischen Kenngrößen MQ sowie den Scheitelabflüssen (MHQ, und HQ₁₀₀) gegenübergestellt.

In Abbildung 7-50 und Abbildung 7-51 sind die gleitenden Mittelwerte des Jahresmittelwerts des Abflusses über 30 Jahre für die Pegel Herrenhausen (Leine) und Colnrade (Hunte) dargestellt. Mit dem RCP8.5-Ensemble aus KliBiW 4 ergibt sich für beide Referenzpegel eine stetige Zunahme des MQs um 10-20 % in der fernen Zukunft gegenüber der Referenzperiode. Mit dem BLFG-Kernensemble aus Projektphase 6 wird in der nahen Zukunft zunächst ein leichter Rückgang des Abflusses simuliert. Für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts wird ebenfalls eine Zunahme des MQs berechnet. Die Bandbreite beider Ensembles ähnelt sich sehr stark. Bezüglich des mittleren Abflusses gibt es demnach größere Unterschiede in den Abflussprojektionen mit den beiden RCP8.5-Ensembles. Das BLFG-Kernensemble aus Projektphase 6 kann hinsichtlich des mittleren Abflusses als „trockener“ aufgefasst werden.

Die Änderungssignale aus den KliBiW-Projektphasen 4 und 6 für die Hochwasserkenngröße MHQ sind in Tabelle 7-2 gegenübergestellt. Die Tabelle enthält die mittleren Änderungssignale des Sets von 41 Referenzpegel aus Projektphase 4 sowie die Minima, Maxima und die Standardabweichung jeweils basierend auf den RCP8.5-Ensemble-Medianen

des jeweiligen Referenzpegels. Die Gegenüberstellung der Änderungssignale für das MHQ offenbart neben der Gemeinsamkeit einer deutlichen Zunahme des MHQs in beiden Zukunftszeiträumen auch einige Unterschiede. Diese Unterschiede ergeben sich hinsichtlich der Zeiträume und der saisonalen Ausprägung der Änderungssignale. Bezogen auf das Gesamtjahr ist der Mittelwert der Änderungssignale in Z2 und Z3 in KliBiW4 deutlich höher als in KliBiW6. Dieser Unterschied ergibt sich hauptsächlich aus den wesentlich stärkeren Zunahmen des MHQs im Sommerhalbjahr im Vergleich zum BLFG-Kernensemble aus KliBiW6. Auch im Winterhalbjahr wird mit dem RCP8.5-Ensemble aus KliBiW4 eine deutlich stärkere Zunahme des MHQs vor allem in Z2 simuliert. Die Bandbreite der Änderungssignale, ausgedrückt durch die Standardabweichung, ist in Z2 mit dem RCP8.5-Ensemble aus KliBiW 4 etwas größer. In Z3 ergibt sich mit dem BLFG-Kernensemble aus KliBiW 6 eine größere Bandbreite, auch im Vergleich zu der für Z2.

Die Änderungssignale aus den Projektphasen 4 und 6 für ein Hochwasserereignis mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren (HQ₁₀₀) sind in Tabelle 7-3 gegenübergestellt. Mit dem neuen BLFG-Kernensemble werden bei einer etwas höheren Bandbreite für das Winterhalbjahr und das Gesamtjahr etwas schwächere Zunahmen für das HQ₁₀₀ berechnet als in KliBiW 4. Bezogen auf das Sommerhalbjahr werden mit dem RCP8.5-Ensemble deutlich stärkere Zunahmen zusammen mit einer etwas geringeren Standardabweichung, aber deutlich größeren Spanne zwischen Minimum und Maximum simuliert. Trotz der genannten Unterschiede wird eine starke Zunahme des HQ₁₀₀ als ein Hauptergebnis aus Projektphase 4 durch die neuen Ergebnisse mit dem BLFG-Kernensemble bestätigt.

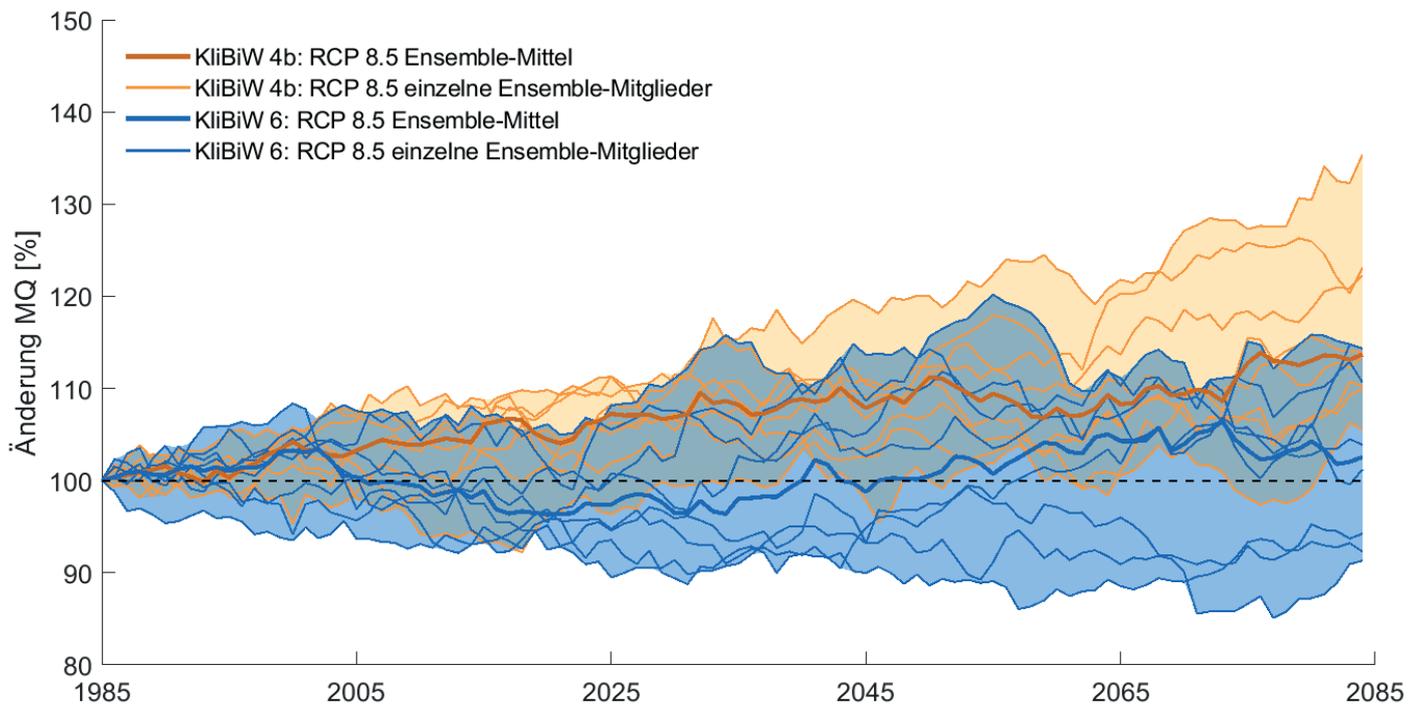


Abbildung 7-50: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwerts des Jahresmittelwerts des Abflusses (MQ) für die einzelnen der RCP8.5-Ensembles aus KliBiW-Projektphase 4 (hellblau) und Projektphase 6 (dunkelblau) sowie die Ensemble-Mittelwerte für den Zeitraum 1971-2000 (entspricht 100%) für den Pegel Herrenhausen. Die transparenten Flächen geben die Spannweite des jeweiligen Ensembles an.

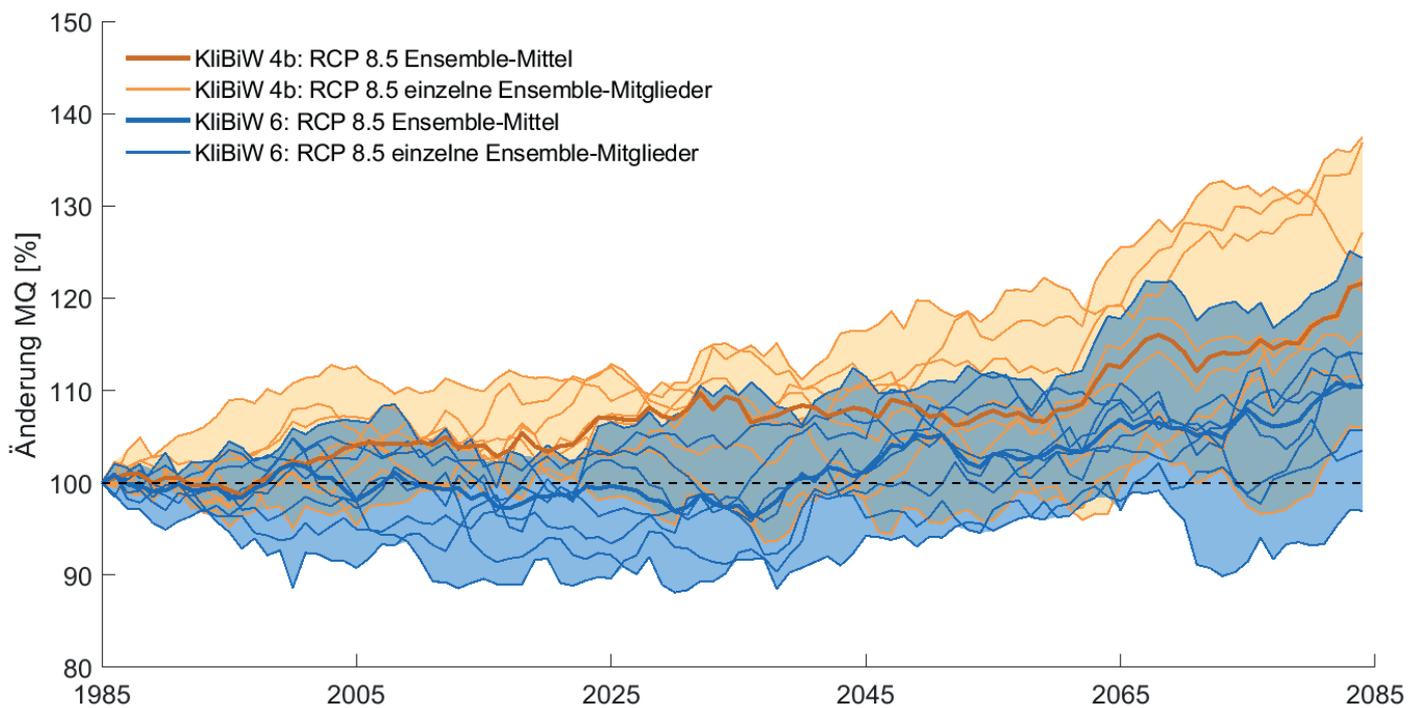


Abbildung 7-51: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwerts des Jahresmittelwerts des Abflusses (MQ) für die einzelnen der RCP8.5-Ensembles aus KliBiW-Projektphase 4b (hellblau) und Projektphase 6 (dunkelblau) sowie die Ensemble-Mittelwerte für den Zeitraum 1971-2100 (Mittelwert 1971-2000 entspricht 100%) für den Pegel Colnrade. Die transparenten Flächen geben die Spannweite des jeweiligen Ensembles an.

Tabelle 7-2: Mittelwerte, Minima und Maxima sowie Standardabweichung der Änderungssignale des MHQs (%) für die 41 Referenzpegel aus KliBiW4 differenziert nach Sommer- und Winterhalbjahr und für das Gesamtjahr

MHQ	KliBiW 4 (RCP 8.5)			KliBiW 6 (RCP 8.5)		
	Gesamtjahr	Sommer	Winter	Gesamtjahr	Sommer	Winter
Mittelwert Z2 (%)	9,3	16,1	6,4	2,9	12,2	0,6
Mittelwert Z3 (%)	25,2	26,8	23,2	16,4	22,5	9,7
Minimum Z2 (%)	-1,8	1,4	-1,3	-3,8	-0,9	-6,8
Minimum Z3 (%)	16,8	9,1	13,5	6,4	3,0	-1,4
Maximum Z2 (%)	20,0	36,6	14,5	14,7	26,8	7,8
Maximum Z3 (%)	42,6	41,5	35,2	33,7	48,4	24,4
Standardabweichung Z2 (%)	4,7	9,3	3,4	4,2	7,0	2,7
Standardabweichung Z3 (%)	6,3	6,6	5,9	6,7	10,5	7,6

Tabelle 7-3: Mittelwerte, Minima und Maxima sowie Standardabweichung der Änderungssignale des HQ₁₀₀ (%) für die 41 Referenzpegel aus KliBiW4b differenziert nach Sommer- und Winterhalbjahr und für das Gesamtjahr

HQ ₁₀₀	KliBiW 4 (RCP 8.5)			KliBiW 6 (RCP 8.5)		
	Gesamtjahr	Sommer	Winter	Gesamtjahr	Sommer	Winter
Mittelwert Z2 (%)	7,0	24,0	1,9	5,4	22,9	0,5
Mittelwert Z3 (%)	25,2	39,6	23,0	18,9	41,0	13,7
Minimum Z2 (%)	-0,4	-7,1	-7,5	-7,1	-1,6	-8,2
Minimum Z3 (%)	13,5	17,0	12,4	3,8	13,5	-7,5
Maximum Z2 (%)	17,3	69,9	13,9	21,7	45,2	23,2
Maximum Z3 (%)	50,0	70,2	39,6	41,0	102,1	34,2
Standardabweichung Z2 (%)	4,9	18,1	4,5	7,6	13,1	5,5
Standardabweichung Z3 (%)	9,0	8,8	6,4	9,6	21,3	9,9

8 Schlussfolgerungen

Das Ziel von KliBiW ist die Identifikation und Quantifizierung des Klimawandels sowie seiner Folgen für die Wasserwirtschaft im niedersächsischen Binnenland. Eine fundierte Datenbasis und fachliche Grundlagen sollen es ermöglichen, angemessene Maßnahmen im Sinne von nachhaltigen Vorsorge- und Anpassungsstrategien zu entwickeln. Die vertiefenden Analysen auf Basis aktueller Erkenntnisse aus der Klimaforschung haben es in der jetzigen Projektphase ermöglicht, das vorhandene Klimawissen weiter auszubauen. Gleichzeitig konnten bisherige Ergebnisse aus vorangegangenen Projektphasen abgesichert werden.

Die Änderungssignale der verschiedenen Hochwasserkenngrößen und der Gebietsbodenfeuchte unterscheiden sich für die einzelnen Klimamodelle und Referenzpegel teilweise deutlich. Dennoch zeigen sich für einige Kenngrößen klare und eindeutige Tendenzen. Zu beachten ist, dass bei den meisten Kenngrößen die Referenzpegel in den Einzugsgebieten im Harz abweichende Tendenzen im Vergleich zu den übrigen Referenzpegeln in Niedersachsen liefern. Diese Harzer Einzugsgebiete sind orographisch stark gegliedert und weisen kurze Konzentrationszeiten aufgrund hoher Geländeneigungen auf. Einerseits können maßgebliche extreme Hochwasser in solch kleinen Gebieten durch sehr kurze, intensive Niederschlagsereignisse hervorgerufen werden, die sodann rasch ablaufen. Zum anderen liegt die Größe dieser

Einzugsgebiete unterhalb der empfohlenen Maßstabsskala, für welche die Klimamodelle der aktuellen Generation die Prozesse des Klimasystems vollständig abbilden können (vgl. Linke et al., 2017). Diese Begebenheiten zusammen mit Unsicherheiten der Klimamodelldaten, insbesondere für solch kleine Einzugsgebiete (< 100 km²) unter Anwendung tageswertbasierter Eingangs- und Ergebniszeitreihen, erfordern es, die Modellergebnisse entsprechend vorsichtig zu interpretieren.

Die Auswertung der möglichen zukünftigen Scheitelabflüsse (Kenngrößen MHQ, HQ₅, HQ₂₀ und HQ₁₀₀) zeigt, dass bereits in der nahen Zukunft mit einer deutlichen Zunahme für diese Kenngrößen zu rechnen ist. Als Ausnahme von dieser Tendenz treten einige Referenzpegel im Vechte-Einzugsgebiet und die Referenzpegel im Harz mit leicht rückläufigen Scheitelabflüssen in der nahen Zukunft auf. In der fernen Zukunft ist mit Ausnahme der Pegel im Harz mit einer teils deutlichen Zunahme der Hochwasserscheitelabflüsse gegenüber der Referenzperiode (1971-2000) zu rechnen. Hierbei sind die Zunahmen für extreme Hochwasserereignisse (HQ₂₀, HQ₁₀₀) etwas stärker, als für kleinere Hochwasserereignisse (MHQ, HQ₅). Im Vergleich mit den Ergebnissen für das RCP8.5-Ensemble aus der KliBiW-Projektphase 4 sind die prognostizierten Zunahmen der Scheitelabflüsse größerer Hochwasserereignisse in KliBiW 6, bezogen auf das Gesamtjahr und das Winterhalbjahr, etwas geringer, im Sommerhalbjahr jedoch höher.

Insgesamt werden die Ergebnisse für die zukünftige Entwicklung von Scheitelabflüssen aus der Projektphase 4 bestätigt. Folglich ist weiterhin eine Zunahme der Abflussscheitel von Hochwasserereignissen (innerhalb einer Jährlichkeit, z.B. HQ₅, HQ₂₀, HQ₁₀₀) in Niedersachsen zu erwarten. Die großen Bandbreiten der Änderungssignale für diese Kenngrößen indizieren etwas größere Unsicherheiten in den Abflussprojektionen der aktuellen Projektphase 6, aber die klare Tendenz der Änderungssignale signalisiert deutlich einen Handlungsbedarf im Hochwasserschutz, wie z.B. in der hydrologischen Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen.

Für die mittleren Abflussverhältnisse wird bezogen auf das Gesamtjahr zunächst an den meisten Referenzpegeln eine leichte Abnahme des MQs berechnet. Für die ferne Zukunft ergeben die Abflusssimulationen eine leichte Zunahme des MQs für die meisten Referenzpegel. Der zunächst leichte Rückgang der MQs in der nahen Zukunft stellt, verglichen mit den Ergebnissen aus KliBiW4, einen größeren Unterschied dar. Die Zunahme des MQs in der fernen Zukunft fällt im Vergleich mit dem RCP8.5-Ensemble in KliBiW4 etwas geringer aus.

Die Auswertung der Wasserhaushalts-simulationen anhand der Kenngröße Gebietsbodenfeuchte lässt künftig in großen Teilen des Jahres deutlich trockenere Bodenverhältnisse erwarten. Besonders ausgeprägt sind die berechneten Rückgänge im Sommerhalbjahr bzw. im Sommer- und im Herbstquartal. Lediglich für das Winterquartal wird für die meisten Referenzpegeleinzugsgebiete eine geringfügige Zunahme der Gebietsbodenfeuchte berechnet. Da höhere Bodenfeuchten grundsätzlich die Hochwasserentstehung begünstigen und die Zunahme in die Hochwasserschwerpunktmonate Januar und Februar fällt, lässt sich daraus ein leicht erhöhtes Hochwasserpotential in diesen Monaten ableiten. Der deutliche Rückgang der Gebietsbodenfeuchte insbesondere in den Sommer- und Herbstmonaten kann als Indikator

für einen künftig erhöhten Bewässerungsbedarf und eine rückläufige Grundwasserneubildung aufgefasst werden.

Durch die Einführung der Hochwasserkenngößen Hochwasserhäufigkeit, -dauer, -wellenvolumen und -saisonalität konnten die bisherigen Erkenntnisse zu möglichen künftigen Veränderungen der Hochwasserhältnisse wesentlich erweitert und vertieft werden. Die Auswertungen der Abflusssimulationen anhand dieser Kenngrößen deuten auf größere Veränderungen im Hochwasserregime in Niedersachsen hin. Die Analyse der Hochwasserhäufigkeit zeigt, dass größere Hochwasserereignisse landesweit künftig insgesamt häufiger auftreten können, auch im Sommer. Bereits in der nahen Zukunft ist an zahlreichen Referenzpegeln mit einer Zunahme der Häufigkeit von größeren Hochwasserereignissen zu rechnen. Auch die Hochwasserdauern verändern sich: Regional ist mit deutlichen Zunahmen zu rechnen, wobei die Änderungen insgesamt sehr unterschiedlich ausgeprägt sind und teils auch Rückgänge bei allgemein hoher Bandbreite berechnet werden. Die Auswertung der Hochwasserwellenvolumina zeigt – ebenfalls regional unterschiedlich stark ausgeprägt – dass größere Hochwasser künftig mit einer größeren Fülle einhergehen können. Ursächlich hierfür sind vor allem die zunehmenden Hochwasserdauern und die Zunahme der Scheitelabflüsse. Größere Hochwasser werden auch künftig überwiegend im Januar und im Februar auftreten, doch auch in den Sommermonaten sind häufiger größere Hochwasserereignisse zu erwarten.

Die Kombination aus stark zunehmenden Scheitelabflüssen und Hochwasserdauern bedeutet für die Zukunft ein erhöhtes Hochwasserrisiko und damit verbundene mögliche Schäden. Diese zukünftig verschärften Hochwassersituationen sollten in Planungsprozessen vorausschauend und vorsorgend berücksichtigt werden. Dazu sollte auch die (Weiter-)Entwicklung von Anpassungsstrategien vorangetrieben werden.

9 Öffentlichkeitsarbeit

Für die aktuelle Projektphase von KliBiW wurden die neuesten Daten der Klimaforschung für Deutschland verwendet und bei der Durchführung weitergehender Analysen der Hochwasserverhältnisse berücksichtigt. Die gewonnenen wissenschaftlichen Ergebnisse wurden leicht verständlich aufbereitet und anschaulich präsentiert. Auf diese Weise sollen die Erkenntnisse in die Politik und die breite Öffentlichkeit durch eine zielgruppengerechte Kommunikation besser transferiert werden.

Da Hochwasserschutz eine kommunale Aufgabe ist, wurden die Ergebnisse der verschiedenen Teilprojekte von KliBiW so aufgearbeitet, dass sie auch Entscheidungsträgern vor Ort und einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden können. Kernaufgabe war die Entwicklung und Umsetzung der Internetseite „Klimawandel kompakt“ sowie die Wanderausstellung „KlimaEinFluss“. Diese Form des Ergebnistransfers soll die beteiligten Akteure für das Thema sensibilisieren und Handlungen im Sinne einer zukunftsfähigen Vorsorge initiieren.

Auf den Internetseiten des NLWKN ist unter www.nlwkn.niedersachsen.de/klimawandelkompakt eine neue Rubrik „Klimawandel kompakt“ entstanden. Diese Rubrik präsentiert Inhalte zu den Themen:

- Klimawandel - Was ist das?
- Klimafolgenmodellierung
- Klimawandel in Niedersachsen: Veränderung von Temperatur und Niederschlag
- Klimafolgen - Betroffene Bereiche
- Klimafolgen in Niedersachsen: Hoch- und Niedrigwasser
- Klimaanpassung
- Klimaschutz
- Wanderausstellung KlimaEinFluss auf die Binnengewässer Niedersachsens

Die Inhalte sind in allgemein verständlicher Form aufbereitet und beziehen sich vor allem auf die Erkenntnisse aus dem Projekt KliBiW. In den Kapiteln werden zu den unterschiedlichen Themen Verlinkungen aufgeführt, die den Leser bei vertiefendem Interesse an die entsprechenden Internetseiten von Akteuren oder wissenschaftlichen Beiträgen weiterleiten.

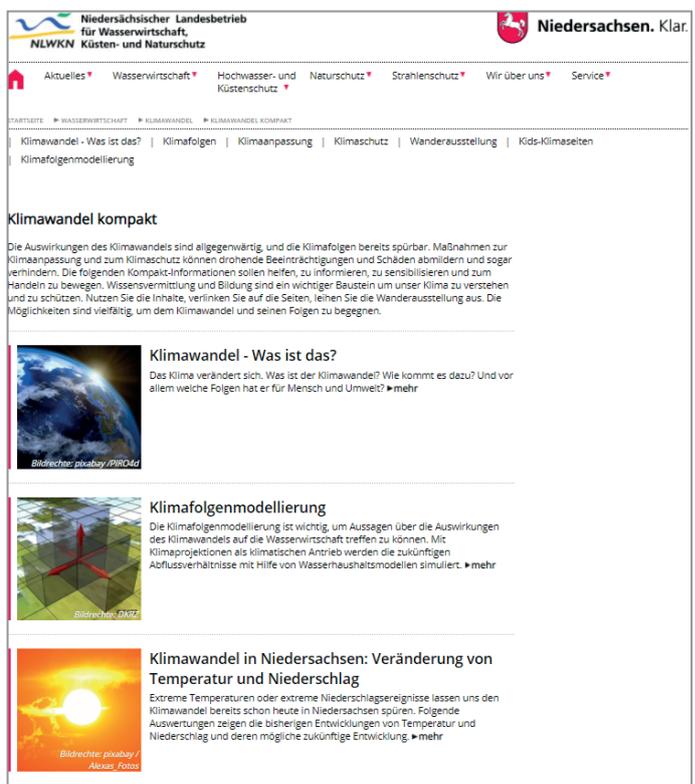


Abbildung 9-1: Startseite Ausschnitt „Klimawandel kompakt“ auf der Homepage des NLWKN

Der Themenpunkt „Klimawandel – Was ist das?“ gibt einen Einblick über die globale Veränderung des Klimas in der Vergangenheit und seit Beginn der Industrialisierung. Auf der Internetseite wird der Zusammenhang zwischen der Zunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre und der Änderung der mittleren Erdoberflächentemperatur sowie des mittleren Niederschlags und die damit einhergehende Zunahme von extremen Wetterphänomenen erklärt.

Das Thema „Klimafolgenmodellierung“ beschreibt die Ableitung und Darstellung der zukünftigen Klimaentwicklung auf Basis von Modellketten. In dem Kapitel werden die Begriffe Klimaszenarien, Klimamodelle und Klimaprojektionen im Detail beschrieben. Hier finden sich auch Verlinkungen zum Thema Wasserhaushaltsmodellierung und zur Vorgehensweise der Klimafolgenmodellierung im Projekt KliBiW.

Auf der Seite des Themenpunkts „Klimawandel in Niedersachsen: Veränderung von Temperatur und Niederschlag“ sind für den Nutzer anhand von Grafiken die Temperaturverläufe bis zur Gegenwart und bis zur fernen Zukunft in Niedersachsen dargestellt. Die Änderungen der Niederschlagssummen für die Sommer- und Winterhalbjahre im Hinblick auf die Vergangenheit und Zukunft werden ebenfalls grafisch dargestellt.

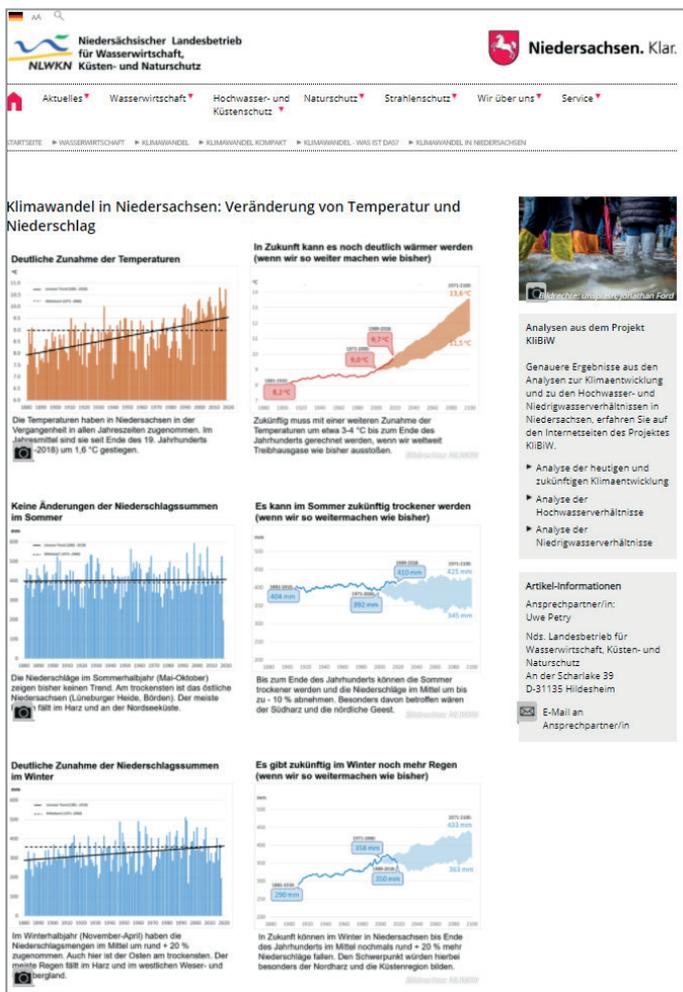


Abbildung 9-2: Internetseite des NLWKN zum Thema „Klimawandel in Niedersachsen: Veränderung von Temperatur und Niederschlag“

Das Thema „Klimafolgen – Welche Bereiche sind betroffen?“ befasst sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf unterschiedliche sektorale Handlungsfelder in Niedersachsen. Im Jahre 2012 wurden aus den bereits gewonnen Erkenntnissen zu den Klimafolgen Empfehlungen für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels der Regierungskommission Klimaschutz veröffentlicht (Regierungskommission Klimaschutz, 2012). Klimatische Wirkungen, wie extreme Niederschläge und Trockenzeiten, haben demnach unmittelbar Einfluss auf die Wasserwirtschaft.

Insbesondere wurden hier die Handlungsfelder Küstenschutz, Hochwasserschutz, Grund- und Trinkwasserschutz, Talsperrenbewirtschaftung, Siedlungswasserwirtschaft, Meeresschutz, Landwirtschaft, Garten- und Obstbau, Fischerei, Wald- und Forstwirtschaft, Biodiversität und Naturschutz, Bodenschutz, Industrie und Gewerbe, Energiewirtschaft, Bauwesen, Verkehrswege- und Netze, Tourismus, Gesundheitswesen, Katastrophenschutz sowie Räumliche Planung betrachtet.

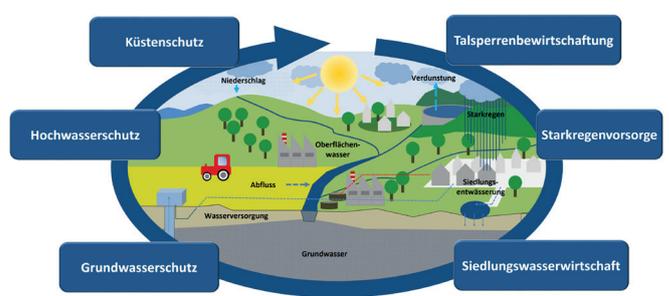


Abbildung 9-3: Beeinflusste Handlungsfelder der Wasserwirtschaft durch den Klimawandel

„Klimafolgen in Niedersachsen: Hoch- und Niedrigwasser“ ist ein weiterer Themenkomplex innerhalb der Rubrik von „Klimawandel kompakt“. Hier wird ein kurzer Einblick in die Ergebnisse aus dem Projekt KliBiW gegeben. Dabei geht es zum einen um die aktuellen Hoch- und Niedrigwasser-Verhältnisse in den unterschiedlichen Regionen von Niedersachsen, zum anderen um die Entwicklung der zukünftigen Situationen.

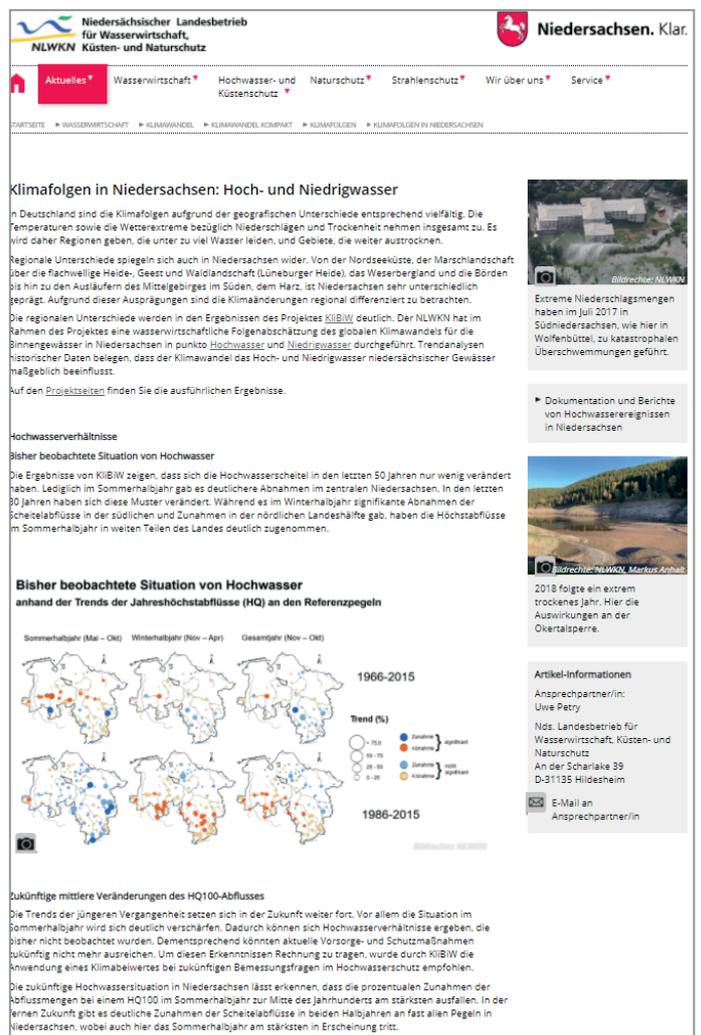


Abbildung 9-4: Internetauftritt des NLWKN zum Thema „Klimafolgen in Niedersachsen: Hoch- und Niedrigwasser“

Um die Auswirkungen des Klimawandels zu thematisieren, ist auf den Internetseiten zusätzlich das Kapitel „Klimaanpassung“ entstanden. In diesem Kapitel von „Klimawandel kompakt“ wird die Relevanz und Aktualität dieses wichtigen Themas verdeutlicht. Klimaanpassungen sind notwendig, um rechtzeitig auf die nicht mehr vermeidbaren Auswirkungen des Klimawandels reagieren zu können, mit dem Ziel, sich so auf das sich ändernde Klima einzustellen. Schäden können so zukünftig noch vermieden oder zumindest vermindert werden.

Daher ist die Klimaanpassung eine wichtige Aufgabe, die angesichts steigender Auswirkungen immer bedeutender wird, insbesondere für die Kommunen. Für die Umsetzung kommunaler Anpassungsstrategien ist die öffentliche Kommunikation wichtig, um eine Akzeptanz der Maßnahmen zu schaffen.

Auf der Seite sind Beispiele für Klimaanpassungen im Bereich der Oberflächengewässer aufgeführt. Außerdem ist eine Liste mit Verlinkungen zu Portalen und Berichten, die sich mit dem Thema Kommunale Klimaanpassung beschäftigen, integriert.

The screenshot shows the website interface for the Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). The main content area is titled 'Klimaanpassung' and includes a sub-section 'Klimawandel bewältigen'. The text discusses the need for adaptation measures and provides information on how to implement them. A sidebar on the right contains 'Artikel-Informationen' with contact details for Uwe Petry, including an email address and phone number.

Abbildung 9-5: Internetauftritt des NLWKN zum Thema „Klimaanpassung“

Anpassungen an den Klimawandel und Klimaschutz stehen keineswegs in Konkurrenz zueinander. Im Kapitel „Klimaschutz“ wird auf das Thema Klimaschutzmaßnahmen eingegangen. Hierzu gehören die Reduktion des Treibhausgas-Ausstoßes beziehungsweise der Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre, der Ausbau regenerativer Energien, das Einsparen von Energie sowie Energieeffizienzsteigerungen. Weiterer wichtiger Baustein ist die Informationsvermittlung, die Öffentlichkeitsarbeit oder das Konsumverhalten. Nur durch die schnelle und konsequente Umsetzung dieser Maßnahmen kann das Ziel, die Treibhausgase zu reduzieren, erreicht und die Erderwärmung begrenzt werden.

Dazu werden die notwendigen gesetzlichen Regelungen, Verordnungen und Rahmenbedingungen auf internationaler, nationaler und landesregierender Ebene getroffen. Die praktische Umsetzung der Klimaschutzmaßnahmen erfolgt jedoch weitestgehend in den Kommunen und Landkreisen. Bei der Unterstützung zur Umsetzung von Klimaschutzkonzepten und der Vernetzung der unterschiedlichen regionalen und überregionalen Akteure werden die Kommunen im Rahmen der Kommunalrichtlinie, einer Initiative des Bundes, durch den Projektträger Jülich (PTJ) gefördert.

Auf der Internetseite findet der Nutzer als weitere Informationsquelle Verlinkungen zu Literatur und Einrichtungen, die sich dem Thema Klimaschutz gewidmet haben.

The screenshot shows the website interface for the Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). The main content area is titled 'Klimaschutz' and includes a sub-section 'Klimaschutz'. The text discusses the need for adaptation measures and provides information on how to implement them. A sidebar on the right contains 'Artikel-Informationen' with contact details for Uwe Petry, including an email address and phone number.

Abbildung 9-6: Internetauftritt des NLWKN zum Thema „Klimaschutz“

Der letzte Themenpunkt bezieht sich auf die „Wanderausstellung KlimaEinfluss auf die Binnengewässer Niedersachsens“. Die bisher beschriebenen Themenpunkte Klimawandel, Klimafolgen, Klimaanpassung und die Ergebnisse aus dem Projekt KliBiW auf der Internetseite sollen innerhalb der Wanderausstellung die breite Öffentlichkeit kompakt und leicht verständlich informieren.

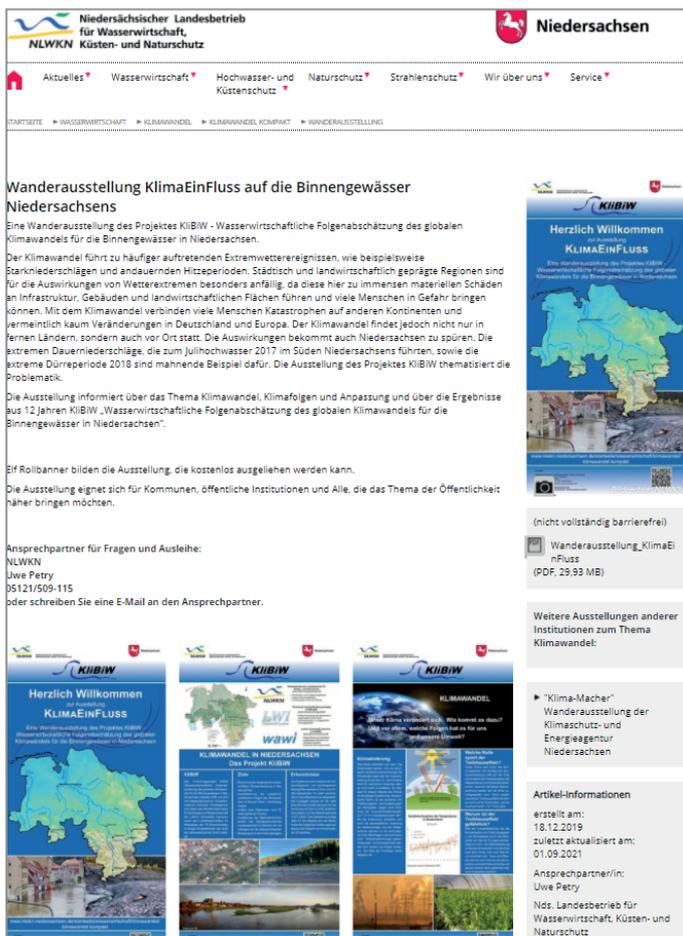


Abbildung 9-7: Internetauftritt des NLWKN zum Thema „Wanderausstellung KlimaEinfluss auf die Binnengewässer Niedersachsens“

Die Ausstellung eignet sich für Kommunen, öffentliche Institutionen und alle, die das Thema der Öffentlichkeit ein Stück näherbringen möchten.

Für die Wanderausstellung wurden insgesamt elf Seiten (als mobile Rollup-Variante) gefertigt. Diese können auf der genannten Internetseite als PDF eingesehen und bei Interesse kostenfrei über den NLWKN ausgeliehen werden.

Folgende Themen werden auf den Bannern präsentiert:

1. Willkommensbanner für die Ausstellung KlimaEinfluss
2. Klimawandel – Klimaänderung
3. Klimawandel in Niedersachsen – Das Projekt KliBiW
4. Klimafolgenmodellierung
5. Wasserhaushaltsmodellierung
6. Klimawandel in Niedersachsen – Veränderung von Temperatur und Niederschlag
7. Klimawandel in Niedersachsen – Veränderung der Hochwasserverhältnisse
8. Klimawandel in Niedersachsen – Veränderung der Niedrigwasserverhältnisse
9. Klimawandel und betroffene Handlungsfelder in der Wasserwirtschaft
10. Klimaanpassung in Niedersachsen
11. Infos Klimawandel in Niedersachsen

Eine Eröffnung der Wanderausstellung erfolgte im Herbst 2021 in den Räumlichkeiten des MU.

Der NLWKN erhält bei der Organisation bzw. der zukünftigen Nutzung der Wanderausstellung Unterstützung von der Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen (KEAN) und der Kommunalen UmweltAktioN (UAN). Dies ist eine Kooperation, die am Anfang 2020 mit dem Ministerium und dem NLWKN abgestimmt wurde.

Die Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen (KEAN) mit Sitz in Hannover entwickelt Lösungen rund um die Themen Energieeffizienz und erneuerbare Energien. Die KEAN fungiert als Berater und Netzwerk für alle relevanten Akteure in Niedersachsen, die gerne einen positiven Beitrag zum Klimaschutz wahrnehmen möchten.

Um insbesondere auch die nächste Generation für das Thema Klima zu sensibilisieren, hat die KEAN mit Unterstützung von RENN.nord die Wanderausstellung „Klima-Macher“ entwickelt. Diese Ausstellung wird insbesondere an Schulen genutzt. Um das Angebot der Klima-Macher zu erweitern, werden ausgewählte Banner von KlimaEinfluss des NLWKN für diese Ausstellung bereitgestellt. Zudem ist auf der Internetseite des NLWKN die KEAN mit der Ausstellung „Klima-Macher“ verlinkt.

Die kommunale UmweltAktioN e.V. (UAN) ist ein kommunaler Umweltverband mit Sitz in Hannover, der Kommunen, kommunale Verbände und kommunale Unternehmen bei der Lösung örtlicher und regionaler Umwelt- und Nachhaltigkeitsaufgaben unterstützt.

Ein Aufgabenfeld, dem sich die UAN widmet, ist das Thema Hochwasser. Zu diesem Thema begleitet die UAN sogenannte Hochwasserpartnerschaften (HWP) in ganz Niedersachsen. In den letzten Jahren haben sich innerhalb Niedersachsens eine Vielzahl von HWPs gebildet, um durch ein kooperatives und integratives Vorgehen von Städten und Gemeinden Maßnahmen zum Hochwasserschutz besser planen und umsetzen zu können. Im Rahmen des Projekts „Kommunale InfoBörse Hochwasservorsorge“ (hib) stehen die UAN für die Begleitung der HWP in Niedersachsen sowie der NLWKN als Ansprechpartner zur Verfügung.

Der NLWKN ist auf der Seite der UAN verlinkt, so wie die UAN ebenfalls auf den Internetseiten „Klimawandel kompakt“ des NLWKN verlinkt ist.

Die Wanderausstellung kommt zwischen Herbst 2021 und Frühjahr 2022 in der HWP Aller zum Einsatz. Die Ausstellung wandert im Zuge einer Veranstaltungsreihe alle 14 Tage zu einer neuen Stadt bzw. Gemeinde innerhalb der HWP. Insgesamt werden dies sechs Standorte sein. Für die Ausstellung stellt der NLWKN die elf oben beschriebenen Banner zur Verfügung. Ergänzt wird die Wanderausstellung hierbei durch drei Banner zum Thema Hochwasservorsorge der UAN sowie ein Banner des Hochwasserkompetenzzentrums des NLWKN.

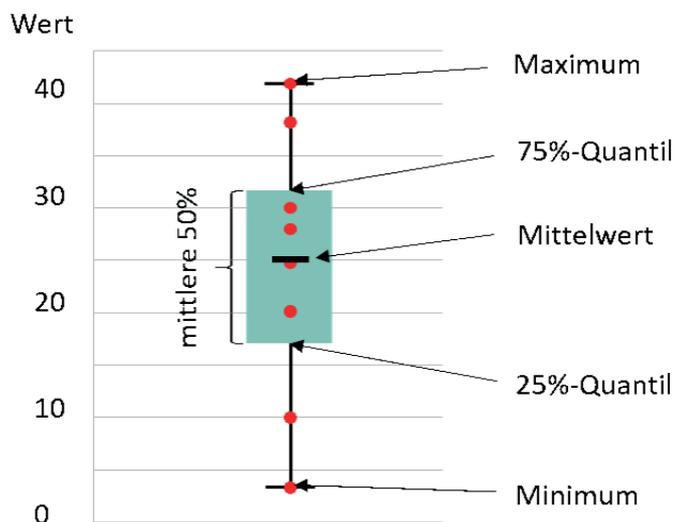
10 Glossar

ALO: Einzugsgebiet der Flüsse Aller, Leine und Oker

ATKIS: Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (Landnutzungsdaten)

Bias-Adjustierung: Empirisch-statistisches Verfahren zur Minimierung des systematischen Fehlers (d.h. Abweichungen) von Klimamodelldaten 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.

Boxplot: Diagramm zur Darstellung der Verteilung von Werten, hier der Änderungssignale der einzelnen Mitglieder eines Klimamodellensembles. Der Boxplot gibt u.a. Auskunft über die Bandbreite der projizierten Änderungssignale. Die unten stehende Abbildung zeigt die verschiedenen, im Boxplot enthaltenen statistischen Kennwerte der (als rote Punkte dargestellten) Daten.



Aufgrund der Charakteristik des verwendeten Kern-Ensembles, vor allem die Randbereiche der Bandbreite möglicher Änderungssignale darzustellen, ist die Lage des Medians hierbei mit Vorsicht zu interpretieren.

DGM: Digitales Geländemodell

EZG: Einzugsgebiet

Ferne Zukunft (auch Z3): Zeitraum 2071-2100

Hochwasserdauer: Dauer eines Hochwasserereignisses vom Zeitpunkt der Überschreitung eines Schwellenwertes (hier Abfluss \geq HQ₂) bis zum Zeitpunkt der erstmaligen Unterschreitung des Schwellenwertes (vgl. Abbildung 10 2).

Hochwasserhäufigkeit: Anzahl der Hochwasserereignisse, deren Scheitelabfluss größer oder gleich einem vorgegebenen Schwellenwert (hier Abfluss \geq HQ₂) ist. Wird der Schwellenwert zwischen zwei Scheiteln wenigstens einen Tag lang unterschritten, so zählt der 2. Scheitel als ein neues Hochwasserereignis (vgl. Abbildung 10-2).

Hochwasservolumen: Das Volumen einer Hochwasserwelle vom Zeitpunkt der Überschreitung eines Schwellenwertes (hier Abfluss \geq HQ₂) bis zum Zeitpunkt der erstmaligen Unterschreitung des Schwellenwertes. Es wird nur das Volumen oberhalb des Schwellenwertes betrachtet (vgl. Abbildung 10 -2).

HQx: Abflussscheitel eines Hochwasserereignisses, das im statistischen Mittel einmal alle X Jahre vorkommt (z.B. HQ₁₀₀).

HWRM-RL: Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken).

Jährliche Serie: Bei einer Zeitreihe von Werten (z.B. gemessene Tages-Abflusswerte) wird für beliebige Zeitabschnitte (z.B. jedes Jahr oder Halbjahr) nur der jeweilige Maximalwert betrachtet. Diese Reihe von Maximalwerten bildet die jährliche Serie.

Kopfgebiet: Kleinere Einzugsgebiete (< 100 km²) beginnend am Ursprung eines Fließgewässers.

L-Momente: Für die Anpassung einer Wahrscheinlichkeitsfunktion stehen verschiedene Schätzverfahren zur Verfügung. Die L-Momente stellen dabei eine Linearkombination der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente dar. Der Vorteil hierbei ist, dass die L-Momente weniger sensitiv auf Ausreißer reagieren. Eine weitere Beschreibung kann DWA (2012) entnommen werden.

LWI: Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig

Mesoskaliges Einzugsgebiet: Gebiet mit einer Größe zwischen 1 ha und 1000 km², wobei der Schwerpunkt zwischen 1 und mehreren 100 km² liegt (Dyck & Peschke, 1995)

MHQ: Mittelwert aus den Jahreshöchstwerten des Abflusses in einer bestimmten Zeitspanne (m³/s)

Modelleffizienz nach Nash & Sutcliffe: Ein in der Hydrologie häufig verwendetes Gütemaß für die Übereinstimmung von Modellergebnis und Beobachtung (nach Nash & Sutcliffe, 1970). Der Wertebereich der Modelleffizienz reicht von $-\infty$ bis 1, wobei 1 eine perfekte Übereinstimmung von Beobachtung und Simulation indiziert. Werte > 0 zeigen an, dass die simulierten Abflüsse die Beobachtungszeitreihe besser wiedergeben als der Mittelwert der Beobachtung.

MQ: Mittlerer Abfluss in einer bestimmten Zeitspanne (m³/s)

Nahe Zukunft (auch Z2): Zeitraum 2021-2050

Partielle Serie: Bei einer Zeitreihe von Werten (z.B. gemessene Tages-Abflusswerte) werden alle Werte bzw. Ereignisse oberhalb eines festgelegten Schwellenwertes betrachtet. Diese Reihe von Werte (oberhalb des Schwellenwertes) bildet die partielle Serie.

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 bzw. 20C, abgeleitet vom englischen „20th Century“): Zeitraum 1971-2000

Root Mean Square Error (RMSE): Wird berechnet als die Wurzel aus den mittleren quadrierten Abweichungen. Er dient als Maß der Übereinstimmung eines Modellergebnisses und der Beobachtung. Ein Wert von 0 indiziert eine perfekte Übereinstimmung. Der RMSE hat die gleiche Einheit wie die Eingangsdaten (bei Abfluss meist m^3/s).

Saisonalität: Charakterisierung des Eintrittszeitpunktes von Hochwasserereignissen nach einem Verfahren von Burn (1997), verändert nach Schumann & Dietrich (2007). Jedes Hochwasserereignis an einem Pegel wird in einem Polardigramm durch einen Punkt dargestellt, dessen Position vom Ereignistag innerhalb des Jahres sowie der Größe des Scheitelabflusses des Ereignisses abhängt (siehe Abbildung 10-1). Auf Basis aller aufgezeichneten Hochwasserereignisse an dem Pegel kann ein mittlerer Eintrittstag (mittlere Saisonalität) für Hochwasserereignisse berechnet werden.

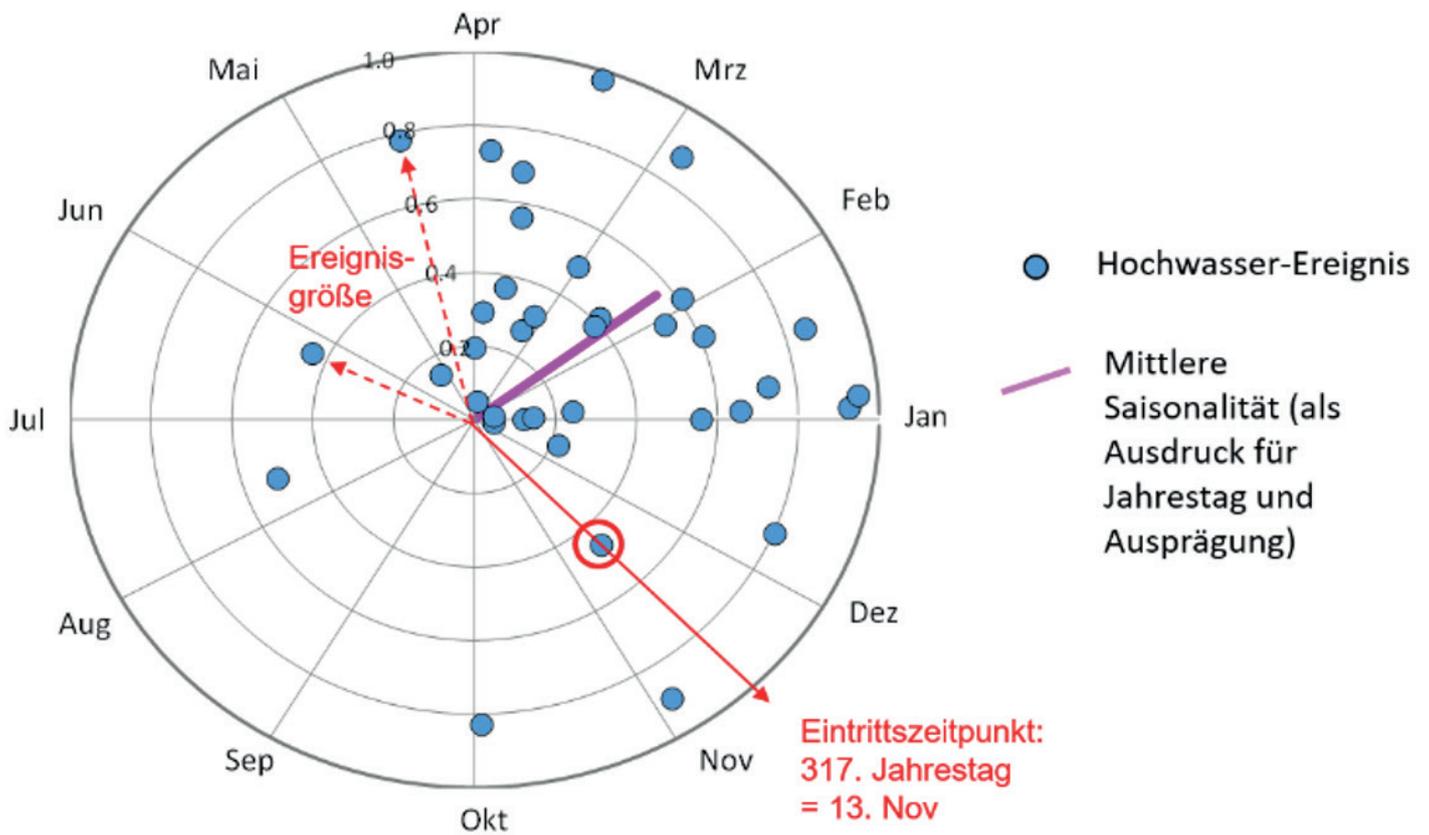


Abbildung 10-1: Schematische Darstellung der Saisonalität von Hochwasserereignissen nach einer Methode von Burn (1997), verändert durch Schuhmann & Dietrich (2007)

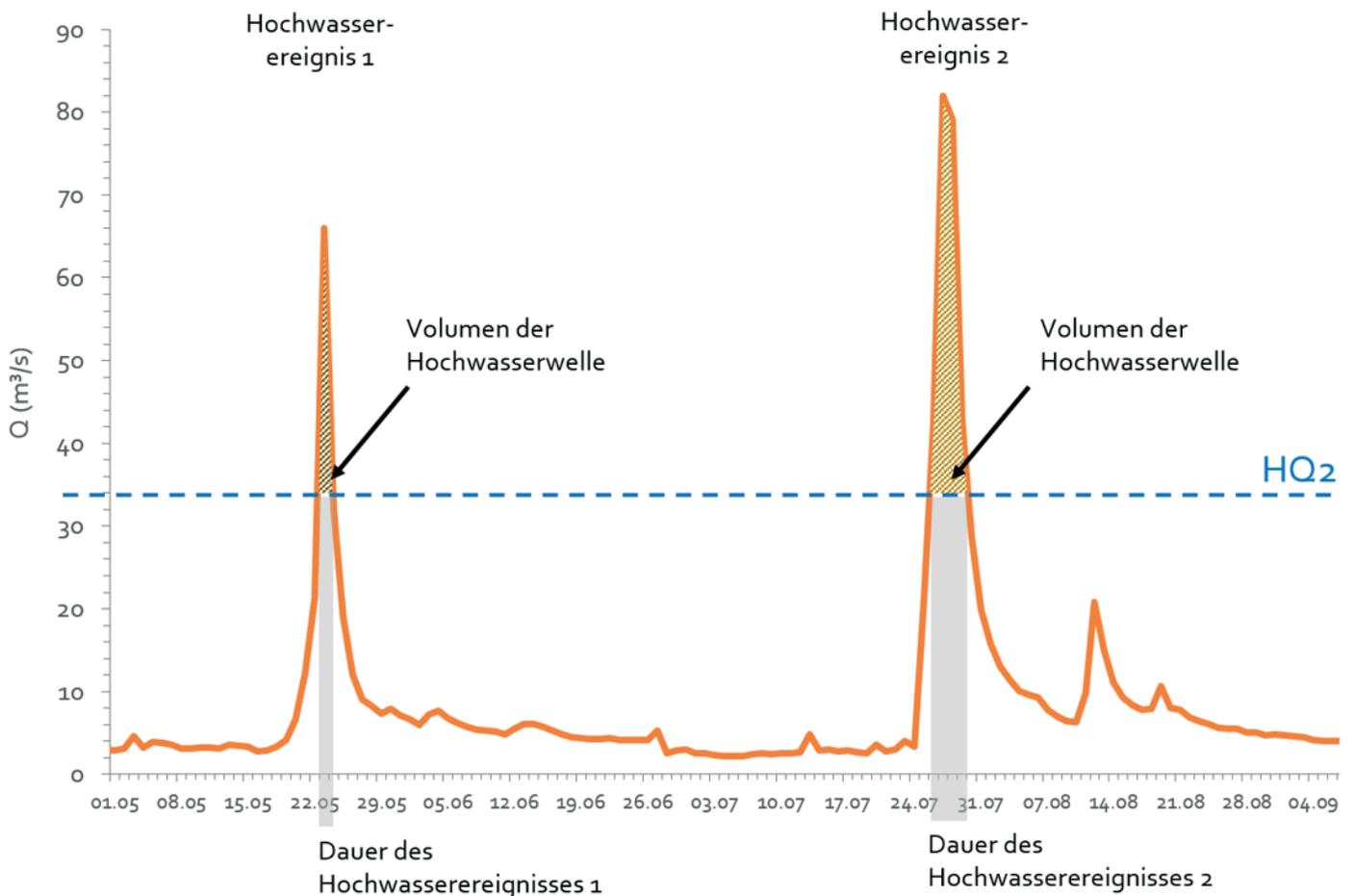


Abbildung 10-2: Schematische Darstellung der Kenngrößen Hochwasserhäufigkeit, Hochwasserdauer und Wellenvolumen bei Hochwasser anhand eines Abfluss-Schwellenwertes der Größe HQ₂

11 Literaturverzeichnis

- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2020): Das Bayerische Klimaprojektionsensemble - Audit und Ensemblebildung. UmweltSpezial, Augsburg, 55 Seiten
- Brienen, S., Walter, A., Brendel, C. et al. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. 157 Seiten. DOI: 10.5675/ExpNBS2020.2020.02
- Burn, D.H. (1997): Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology* 202, S. 212-230.
- Dalelane, C., Früh, B., Steger, C., Walter, A. (2018): A Pragmatic Approach to Build a Reduced Regional Climate Projection Ensemble for Germany Using the EURO-CORDEX 8.5 Ensemble. *Journal of applied Meteorology and Climatology*, Vol. 57, S. 477-491. DOI: 10.1175/JAMC-D-17-0141.1
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2012): Merkblatt DWA-M 552: Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten.
- DWD (2017): Klimavorhersagen und Klimaprojektionen. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 28 Seiten.
- Dyck S, Peschke G (1995): Grundlagen der Hydrologie, 3. Auflage. ed. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Förster K, Gelleszun M, Meon G (2012): A Weather dependent approach to estimate the annual course of vegetation parameters for water balance simulations on the meso- and macroscale. *Advances in Geosciences* 32, 15-21.
- Fricke et al. (2014): Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature und relative humidity. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol 23, No 1, 15-32, DOI: 10.1127/0941-2948/2014/0560
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W. et al. (2020): Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- 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/WDC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jacob D, Kottmeier C, Petersen J, Rechid D, Teichmann, C. (2017). Regionale Klimamodellierung. In: Klimawandel in Deutschland. Hrsg. G. Brasseur et al., 2017
- JACOB, D, PETERSEN, J., EGGERT, B. ET AL. (2013) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change*, 14 (2). pp. 563-578. DOI 10.1007/s10113-013-0499-2
- 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>
- Jolly WM, Nemani R, Running SW (2005): A generalized, bioclimatic index to predict foliar phenology in response to climate. *Global Change Biol.* (11), 619-632.
- Kendall, M.G. (1975): Rank Correlation Methods. Charles Griffin, London.
- Kreye P, Wörner V, Gelleszun M, Meon G (2017): Detaillierte Nachbildung der Niedrigwasserverhältnisse in der hydrologischen Modellierung für die Ermittlung von Klimafolgen im Aller-Leine-Oker-Einzugsgebiet, Niedersachsen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 61 (4), 217-231.
- Linke, C. et al. (2017): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Essen, Stand Okt. 2017
- LWI-HYWAG, IFW (2012): PANTA RHEI Benutzerhandbuch – Programmdokumentation zur hydrologischen Modellsoftware (unveröffentlicht).
- Maniak (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Springer Verlag: Berlin, Heidelberg.
- Mann, H.B. (1945): Non-parametric test against trend. *Econometrica*, Vol. 13.
- Monteith JL (1965): Evaporation and environment. In G.E. Fogg (Hrsg.): The state and movement of water in living organisms. Band 19, Cambridge: Cambridge University Press, 205-234.
- MOSS, R., EDMONDS, J., HIBBARD, K. ET AL. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756 (2010), doi:10.1038/nature08823
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3): 282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- NLWKN (2019): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftlicher 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 (2017): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftlicher 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 (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.

Penman HL (1948): Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 193, Nr. 1032.

Rauthe et al. (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). Meteorologische Zeitschrift, Vol 22, No 3, 235-256, DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0436

Regierungskommission Klimaschutz (2012): Empfehlung für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (Hrsg.), Hannover.

Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes. Offenbach am Main.

Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (ABl. Nr. L 288/27 vom 6.11.2007).

Riedel G (2004): Ein hydrologisches Modell für tidebeeinflusste Flussgebiete. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.

Schumann, A. & Dietrich, J. (2007): Hochwasserschutz und hydrologische Unsicherheit – Schlussfolgerungen aus dem Augusthochwasser 2002 im Erzgebirge. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 35.

Sen, P.K. (1968): Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association 63, 1379–1389.

TAYLOR, K.E., R.J. STOUFFER, AND G.A. MEEHL (2012): An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, Bulletin of the American Meteorological Society 93, 485-498, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>

Theil, H. (1950): A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, I, II, III. Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen 53, 386–392, 521–525, 1397–1412.

U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (1964): SCS national engineering handbook, Section 4 Hydrology. Washington.

von Drachenfels, O. (2010): Überarbeitung der Naturräumlichen Regionen Niedersachsens. In NLWKN-Schriftenreihe: Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, 30. Jg., 249-252.

Wittenberg H (2015): Groundwater Abstraction for Irrigation and Its Impacts on Low Flows in a Watershed in Northwest Germany. Resources 4, 566-576.

Wittenberg H, Matz R, Rhode C (2003): Oberirdisches und unterirdisches Einzugsgebiet - Bedeutung für den Wasserhaushalt. Tag der Hydrologie 2003, Freiburg i.B., Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 4, 29-32.

Yue, S., Pilon, P.J., Phinney, B., Cavadias, G. (2002): The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. Hydrological Processes 16(9), 1807-1829.

Internetquellen:

Climate Data Operator CDO (23.03.2021): [Übersicht - CDO - Project Management Service \(mpg.de\)](#)



Global Carbon Project (15.04.2021): [Carbon Budget \(globalcarbonproject.org\)](#)



Errata Table EURO-CORDEX (01.03.2021): [Errata Table \(euro-cordex.net\)](#)



Trends der globalen Lufttemperatur (15.04.2021): [Trends der Lufttemperatur | Umweltbundesamt](#)



12 Anhang

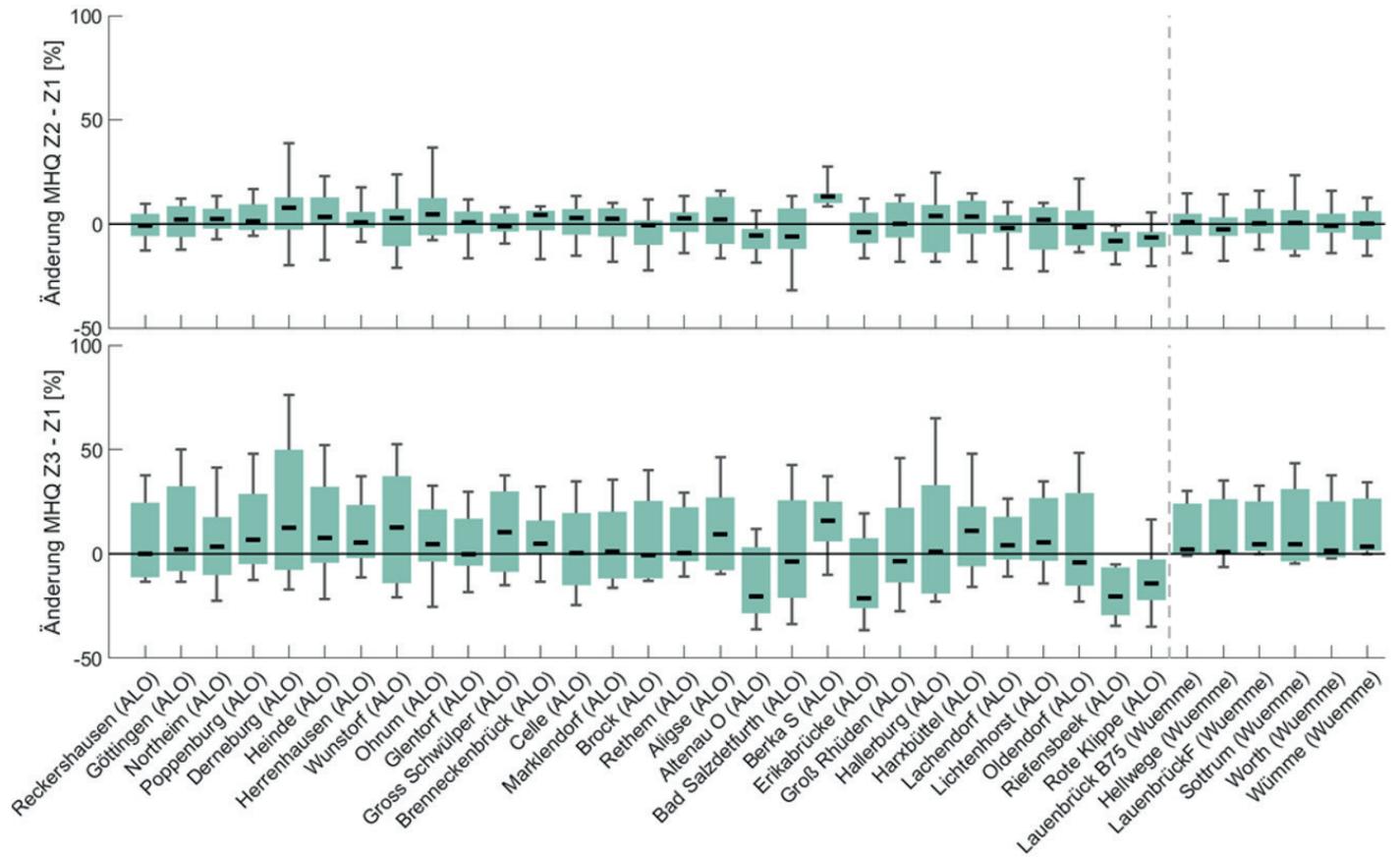


Abbildung 12-1: Änderungssignale des MHQs bezogen auf das Winterhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme

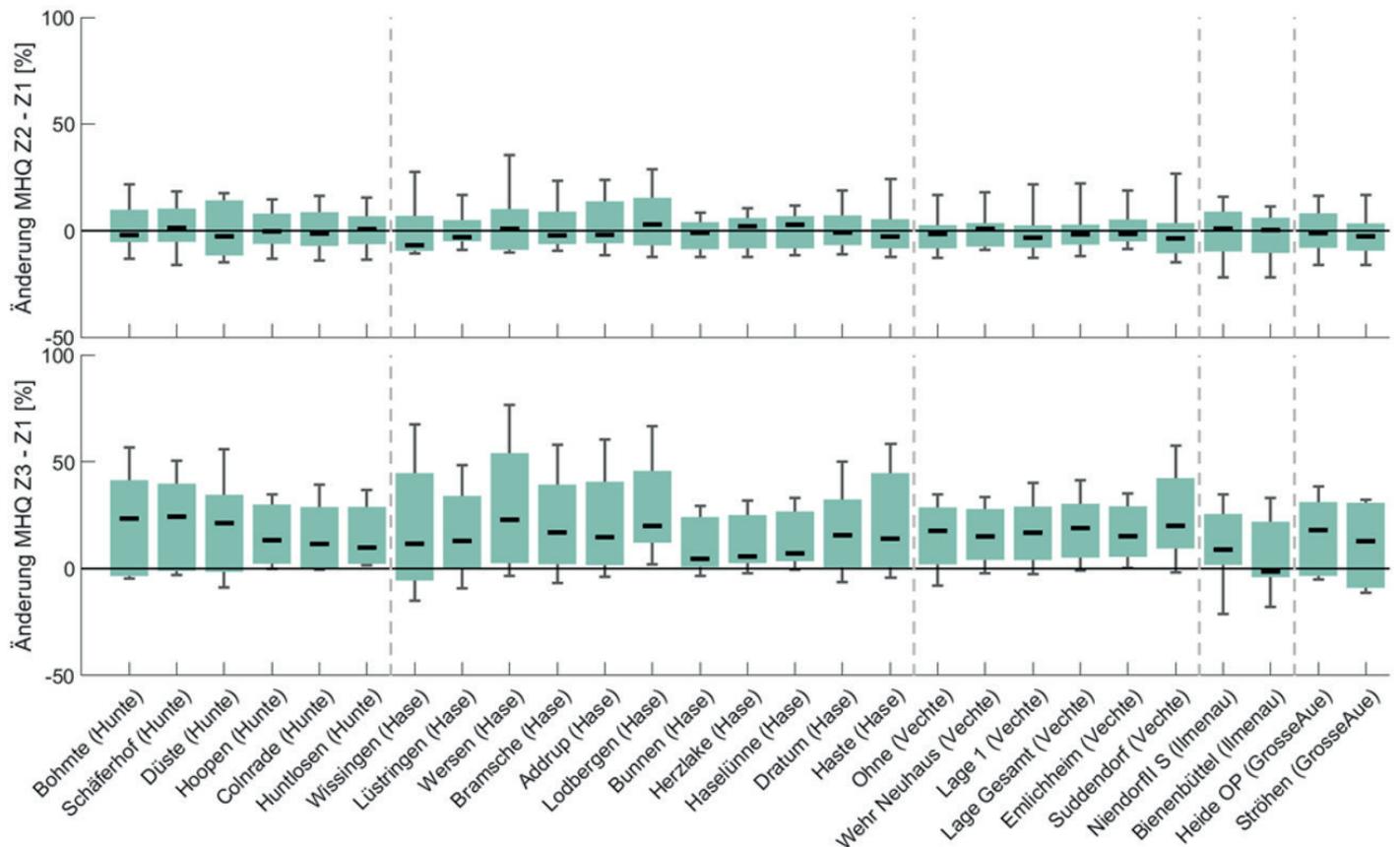


Abbildung 12-2: Änderungssignale des MHQs bezogen auf das Winterhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hunte, Hase, Vechte, Ilmenau und Große Aue

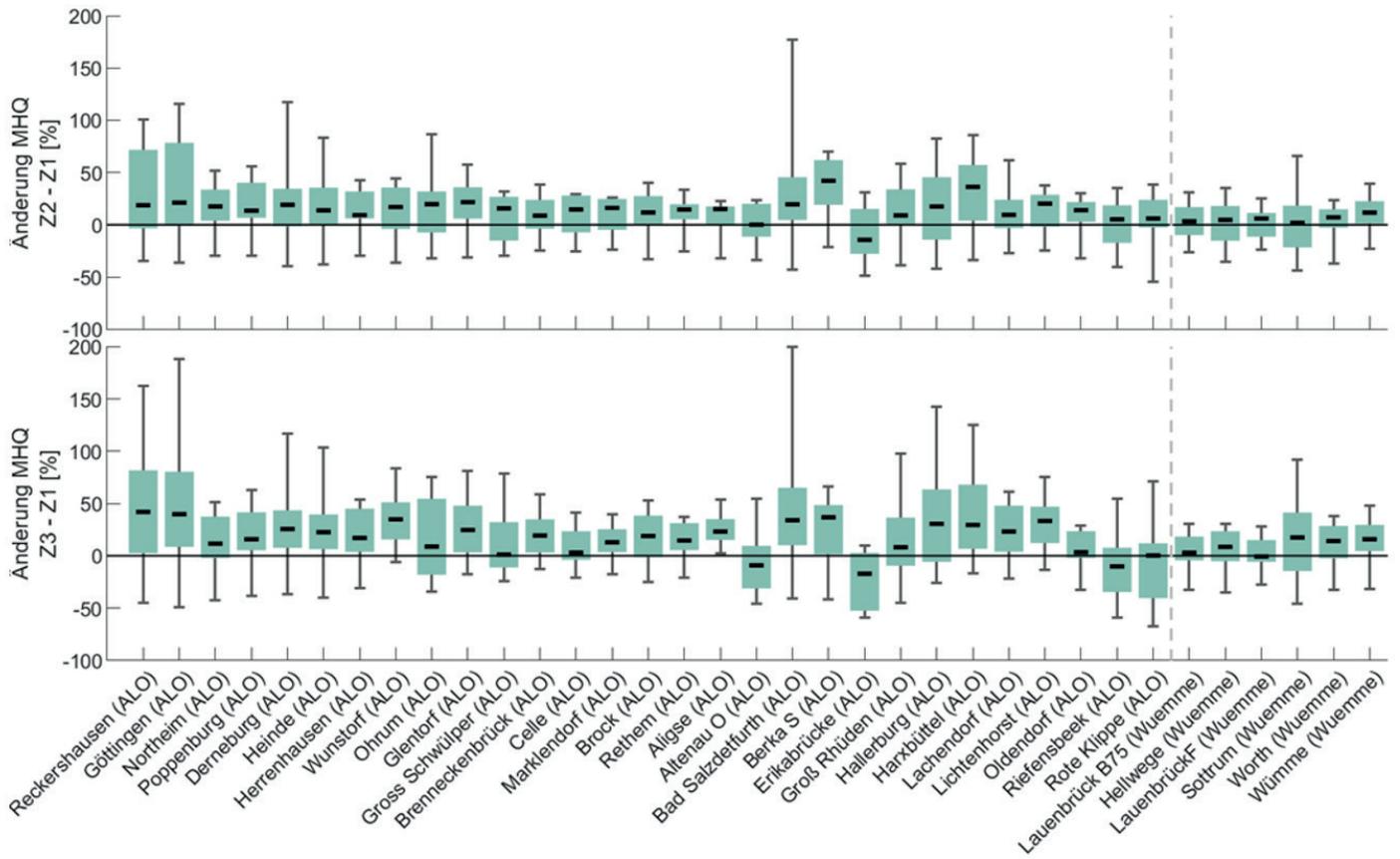


Abbildung 12-3: Änderungssignale des MHQs bezogen auf das Sommerhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme

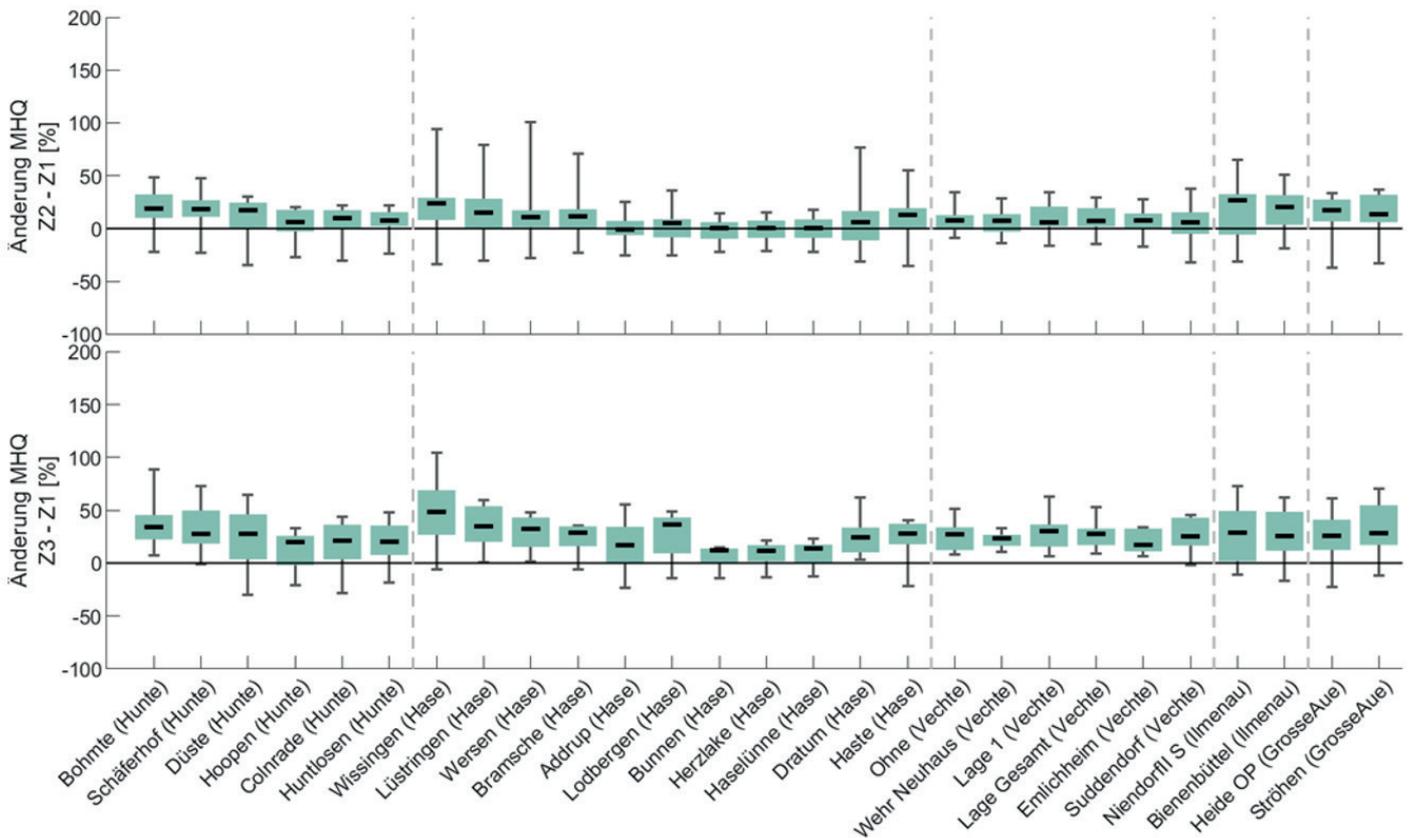


Abbildung 12-4: Änderungssignale des MHQs bezogen auf das Sommerhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hunte, Hase, Vechte, Ilmenau und Große Aue

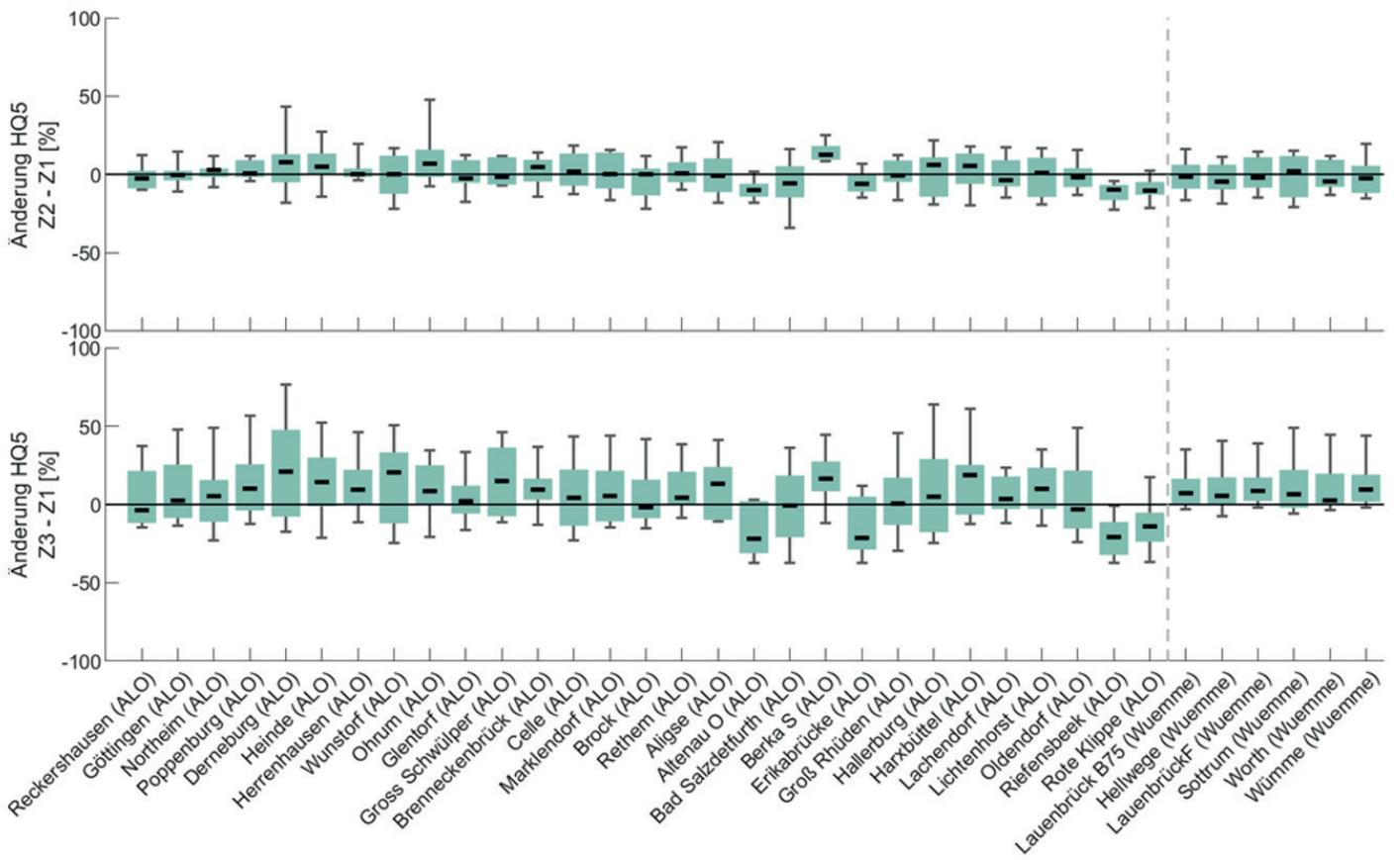


Abbildung 12-5: Änderungssignale des HQ5 bezogen auf das Winterhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme

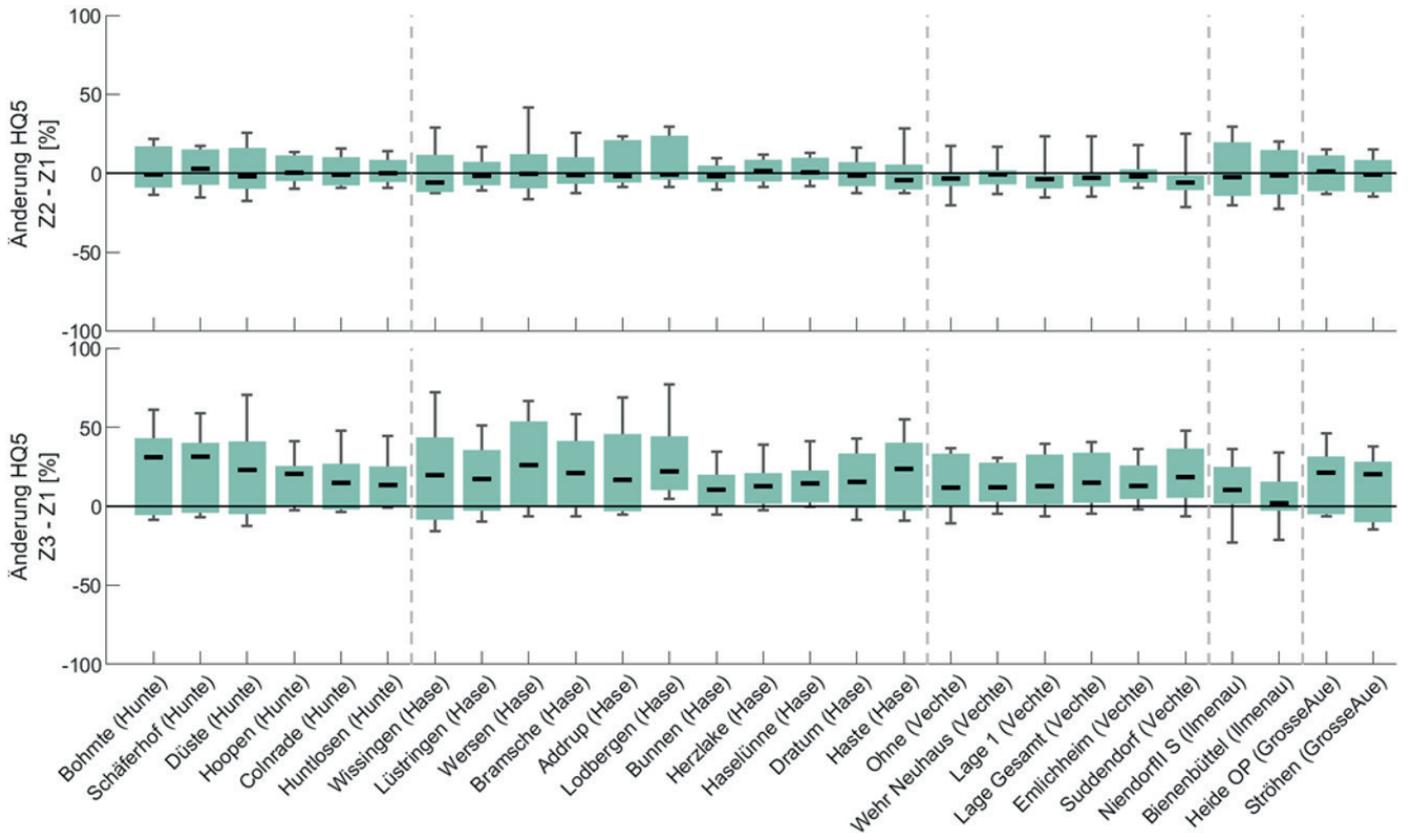


Abbildung 12-6: Änderungssignale des HQ5 bezogen auf das Winterhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hunte, Hase, Vechte, Ilmenau und Große Aue

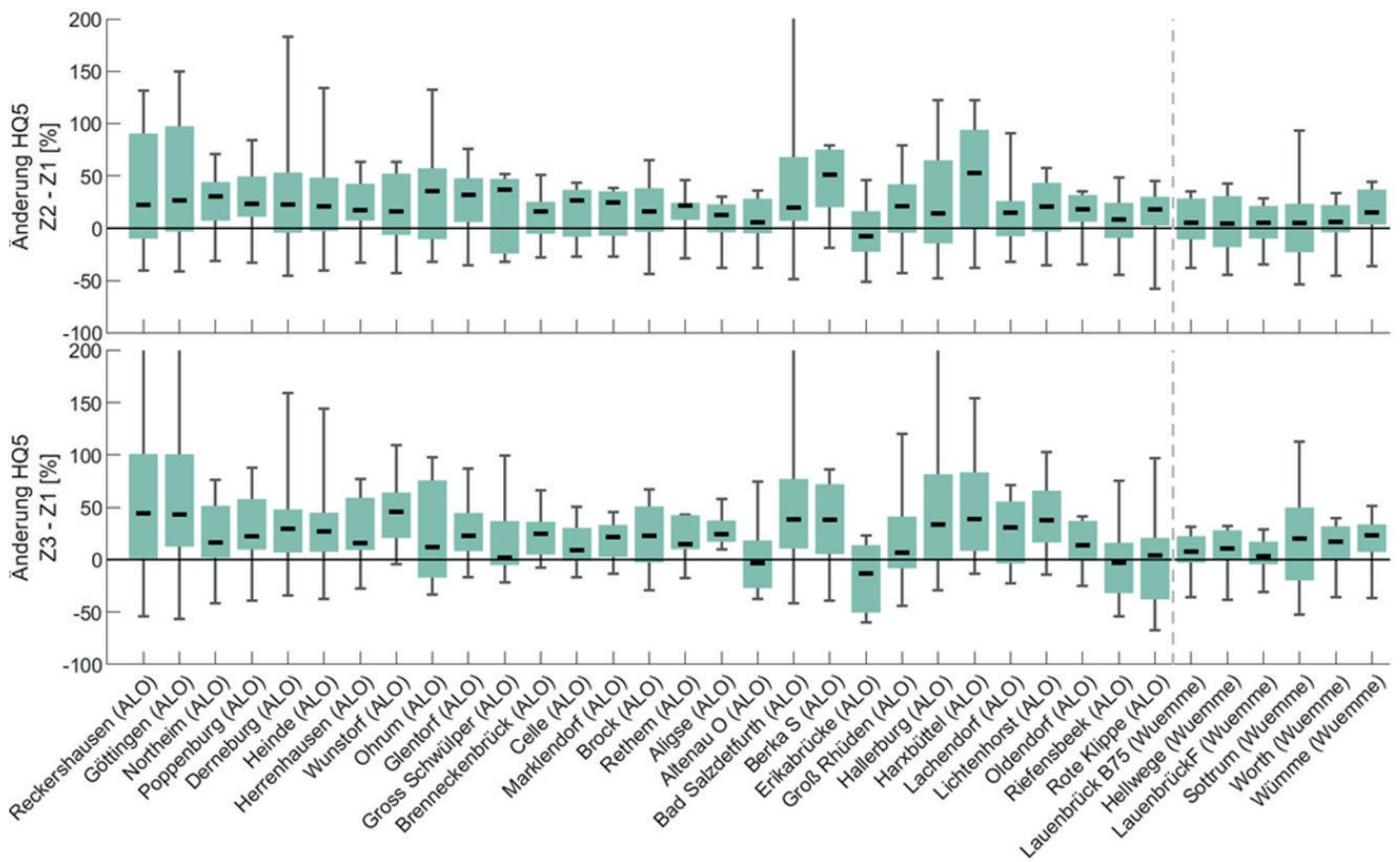


Abbildung 12-7: Änderungssignale des HQ5 bezogen auf das Sommerhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme

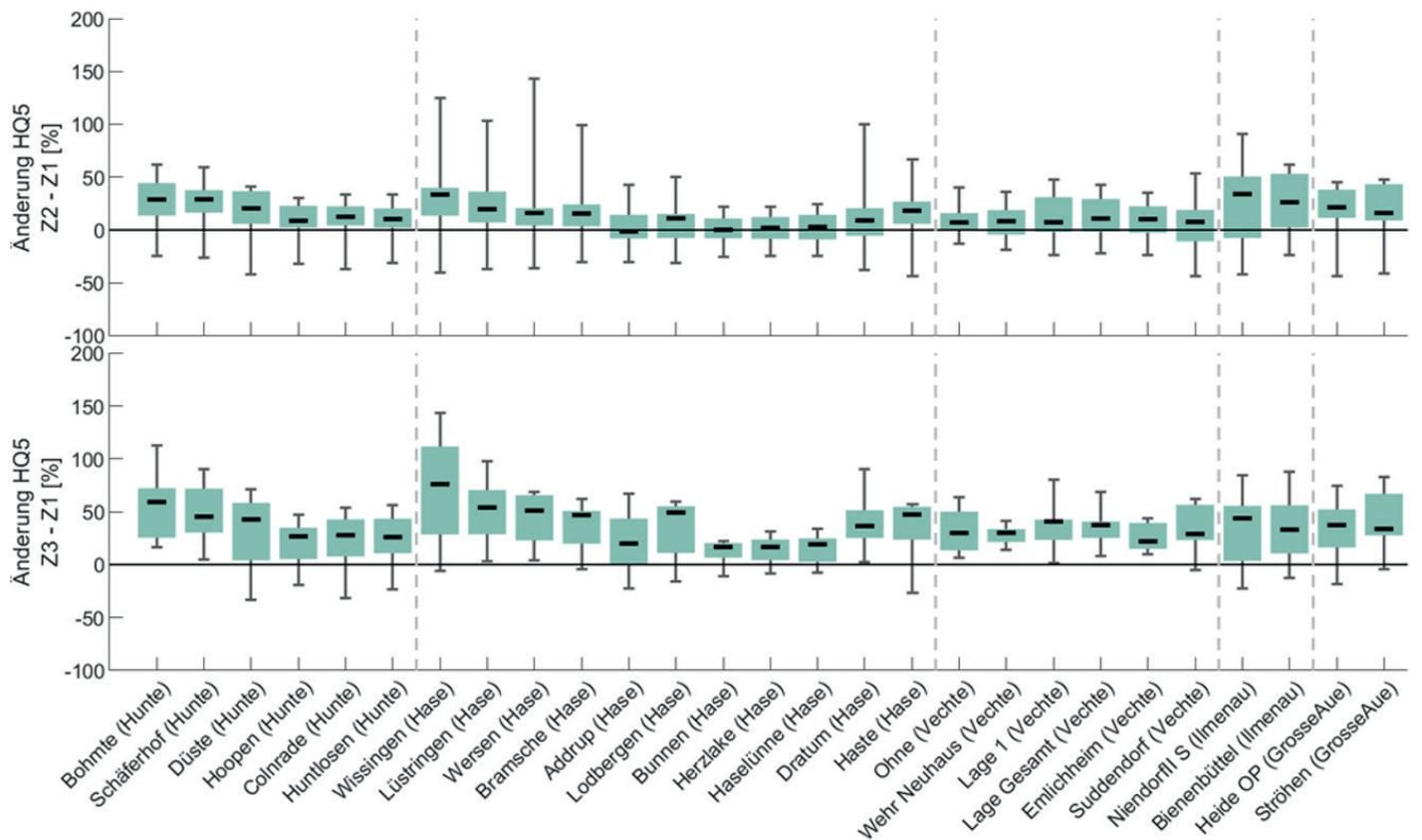


Abbildung 12-8: Änderungssignale des HQ5 bezogen auf das Sommerhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hase, Hunte, Vechte, Ilmenau und Große Aue

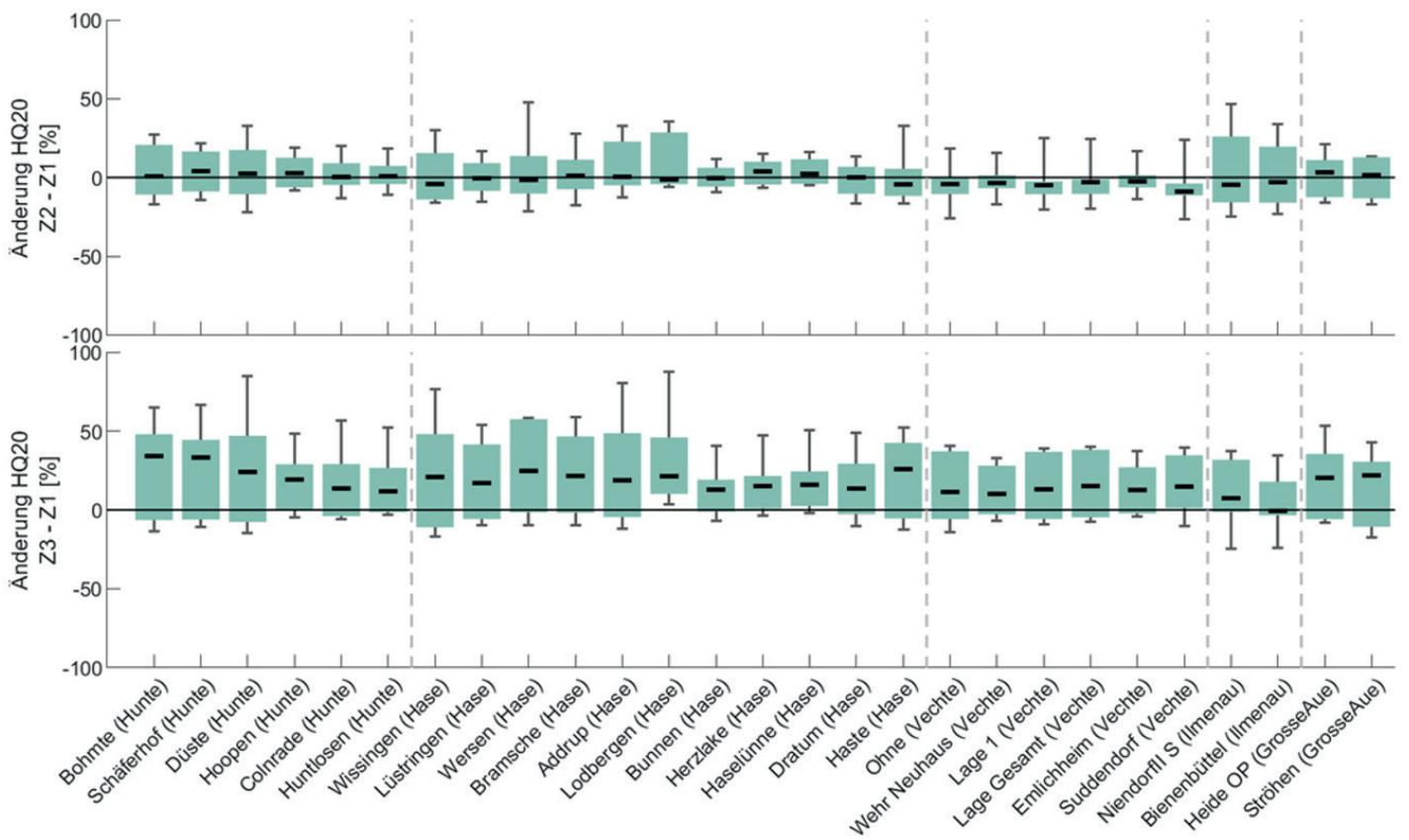


Abbildung 12-9: Änderungssignale des HQ₂₀ bezogen auf das Winterhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme

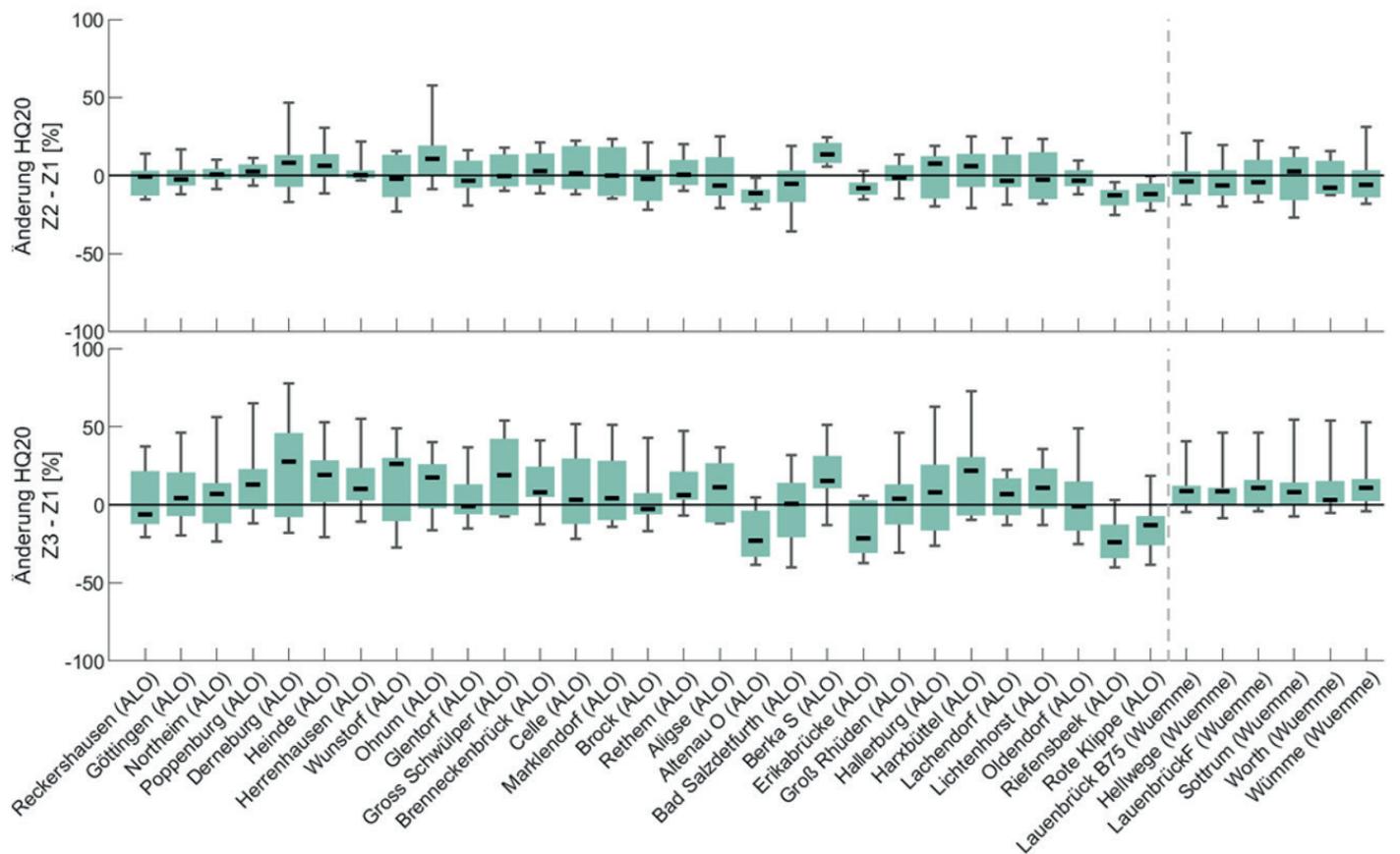


Abbildung 12-10: Änderungssignale des HQ₂₀ bezogen auf das Winterhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hase, Hunte, Vechte, Ilmenau und Große Aue

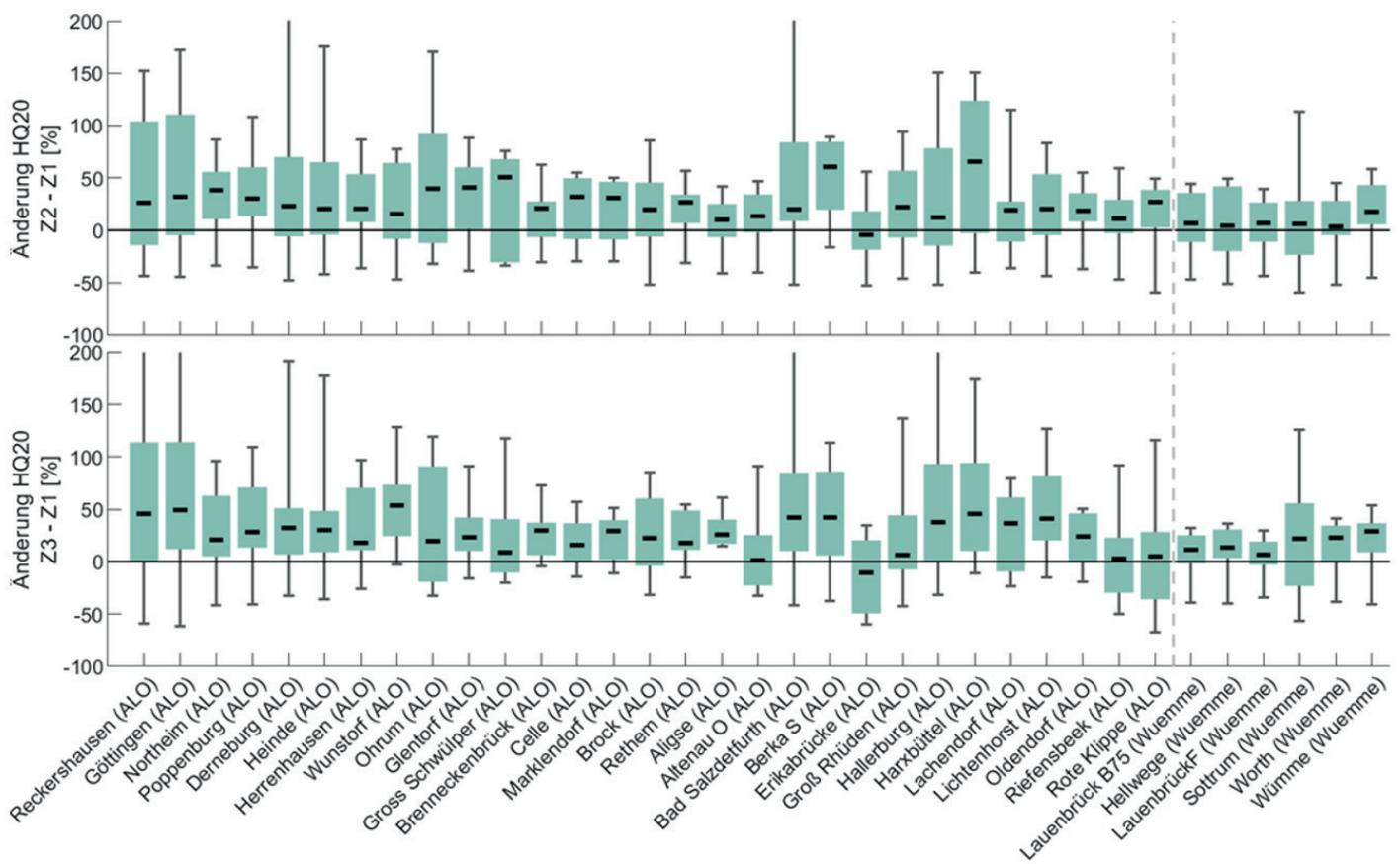


Abbildung 12-11: Änderungssignale des HQ20 bezogen auf das Sommerhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme

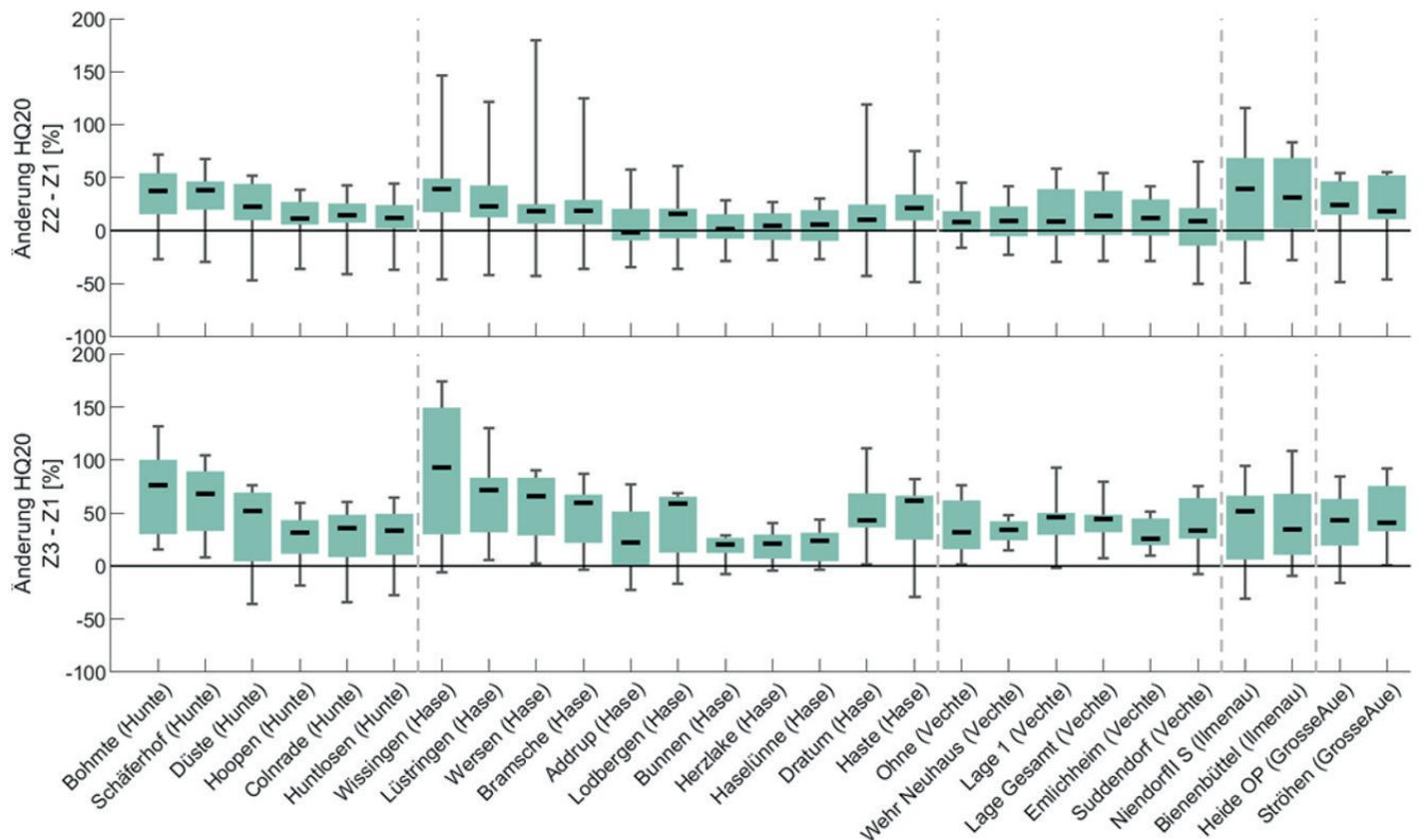


Abbildung 12-12: Änderungssignale des HQ20 bezogen auf das Sommerhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hase, Hunte, Vechte, Ilmenau und Große Aue

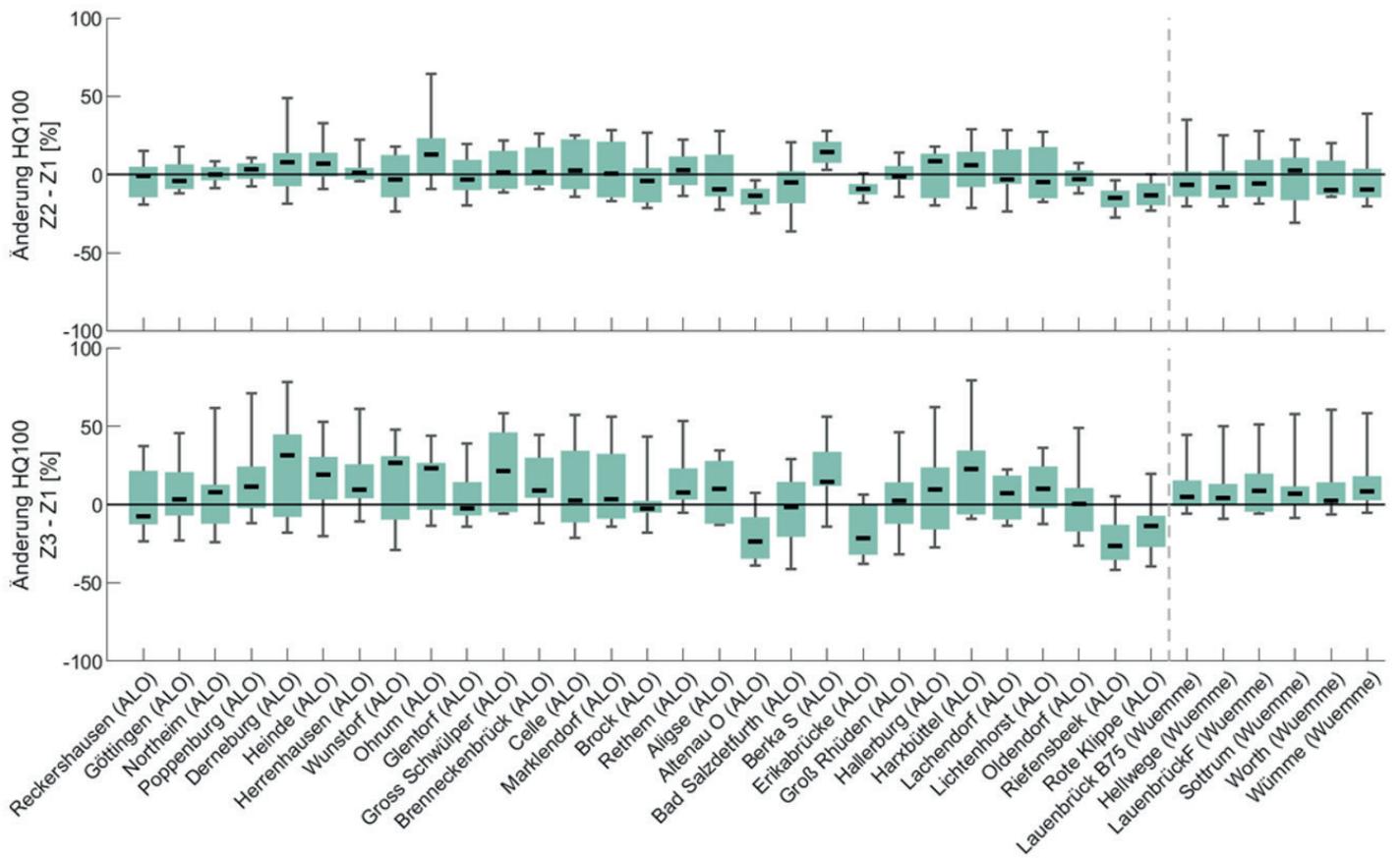


Abbildung 12-13: Änderungssignale des HQ100 bezogen auf das Winterhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme

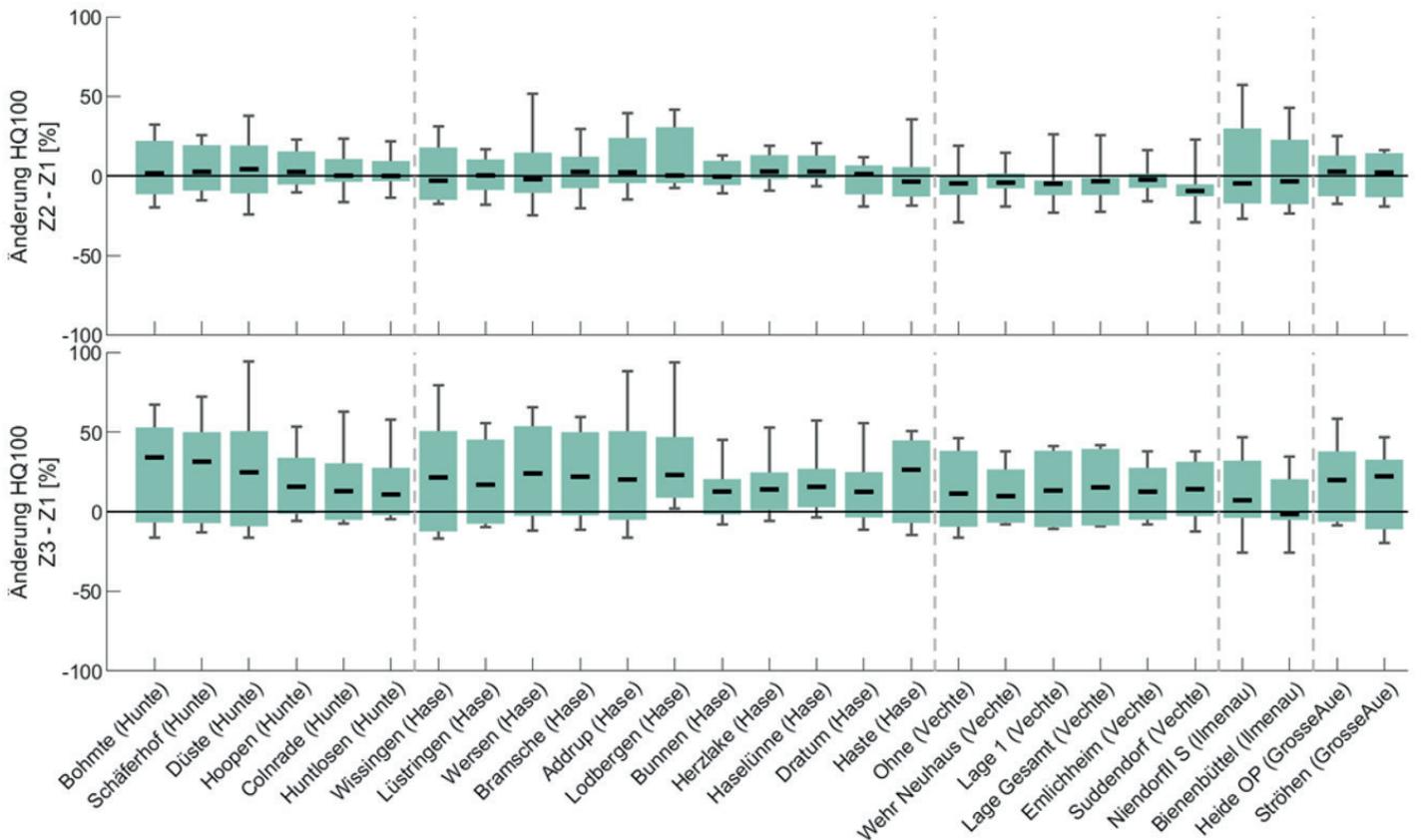


Abbildung 12-14: Änderungssignale des HQ100 bezogen auf das Winterhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hase, Hunte, Vechte, Ilmenau und Große Aue

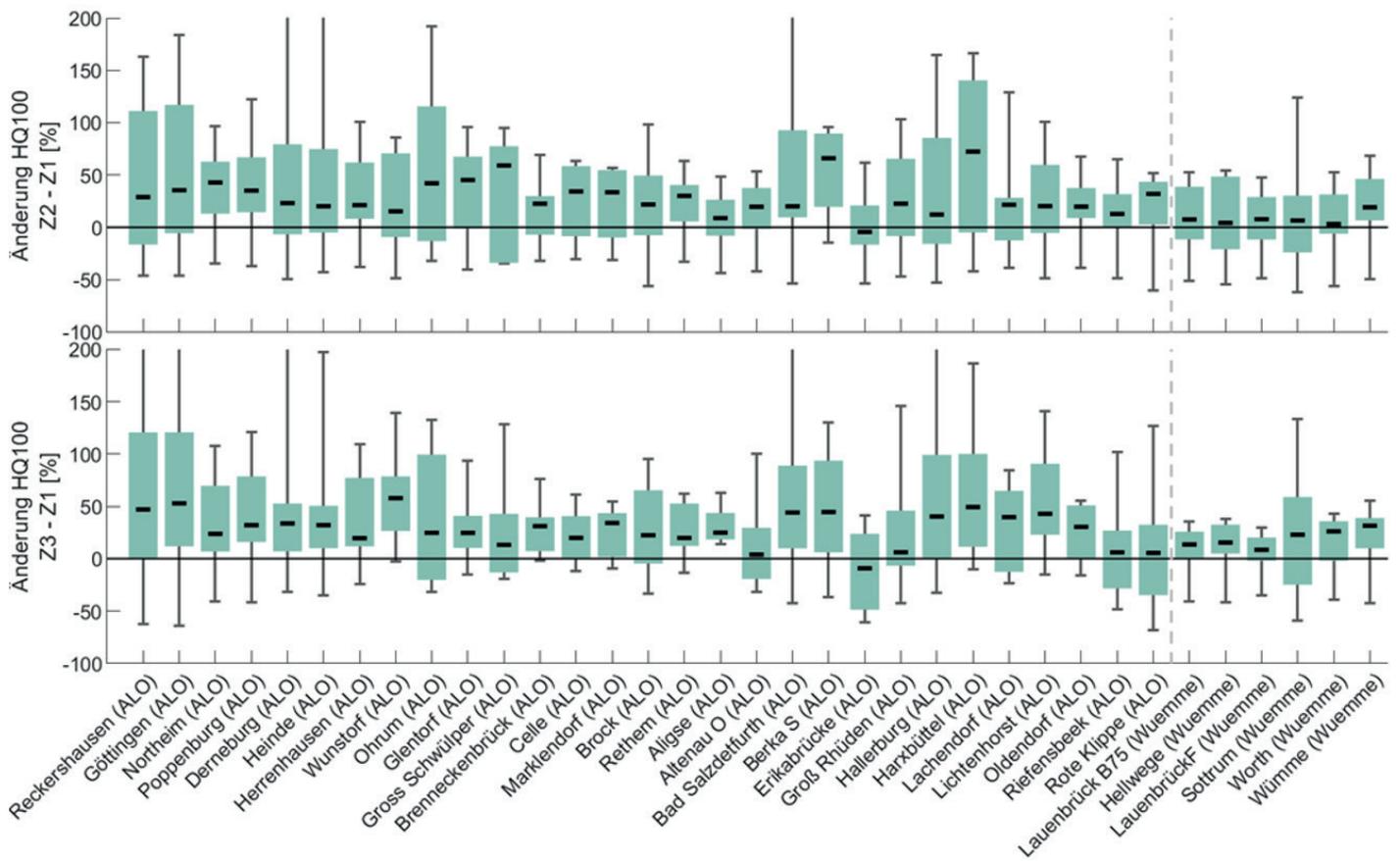


Abbildung 12-15: Änderungssignale des HQ100 bezogen auf das Sommerhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker und Wümme

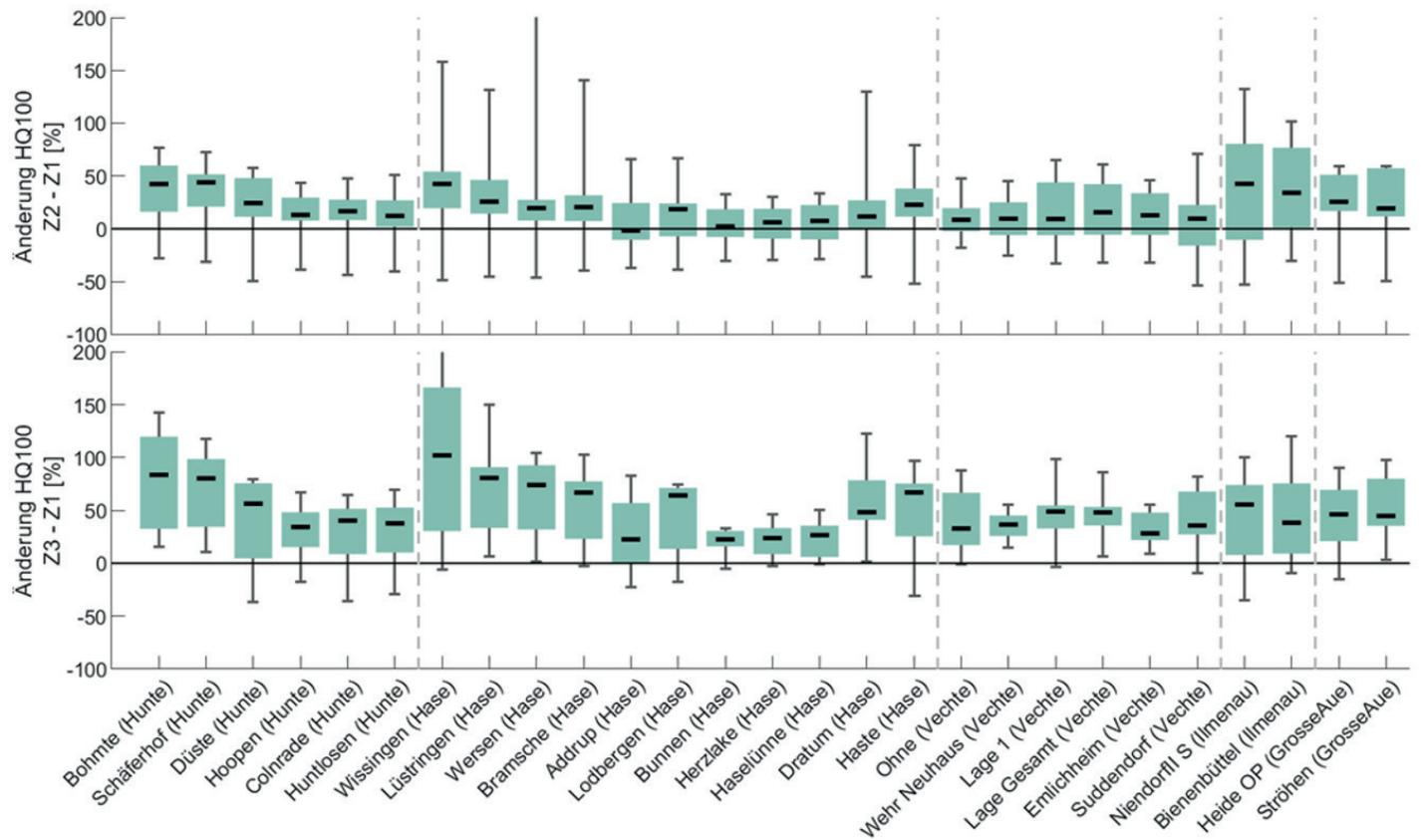


Abbildung 12-16: Änderungssignale des HQ100 bezogen auf das Sommerhalbjahr für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Hase, Hunte, Vechte, Ilmenau und Große Aue

