



Globaler Klimawandel

Wasserwirtschaftliche
Folgenabschätzung für das Binnenland

Gesamtbericht des Projektes KliBiW
Themenbereich Hochwasser



Niedersachsen

Projektbeteiligte

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,
Küsten- und Naturschutz,
Betriebsstelle Hannover-Hildesheim:
Prof. Dr.-Ing. Joseph Hölscher, Christine Schnorr,
Uwe Petry, Markus Anhalt

Leibniz Universität Hannover,
Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft
Prof. Dr.-Ing. Uwe Haberlandt, Stefan Plötner

Technische Universität Braunschweig,
Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydrologie,
Wasserwirtschaft und Gewässerschutz:
Prof. Dr.-Ing. Günter Meon, Vanessa Wörner,
Dr.-Ing. Phillip Kreye

Herausgeber:

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,
Küsten- und Naturschutz
Am Sportplatz 23
26506 Norden

Gestaltung:

Svea Hinrichs, NLWKN Direktion, Pressestelle

Fotos, Abbildungen, Tabellen:

NLWKN

1. Auflage: September, 2017, 200 Stück

Projektpartner



Leibniz Universität Hannover (LUH)
Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft
Prof. Dr.-Ing. Uwe Haberlandt



Leichtweiß-Institut

Technische Universität Braunschweig (TU BS)
Leichtweiß Institut für Wasserbau
Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und
Gewässerschutz
Prof. Dr.-Ing. Günter Meon

Bezug:

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



Globaler Klimawandel

Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung
für das Binnenland





Kurzfassung

Im Rahmen des Projektes KliBiW (Phase 4) wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserabflüsse in den niedersächsischen Binnengewässern untersucht. Neben der landesweiten Analyse des Klimas und der Abflüsse der Vergangenheit (Trenduntersuchungen) wurden auch die Klimamolldaten analysiert und bewertet, um die zukünftige klimatische Entwicklung aufzuzeigen. Für die sieben Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Große Aue, Hase, Hunte, Ilmenau, Vechte und Wümme und weitere Kopfeinzugsgebiete in ganz Niedersachsen wurden die zukünftigen Abflussverhältnisse mit hydrologischen Modellen simuliert.

Die Einschätzung der Klimawirkungen bzw. Klimafolgen erfolgte auf Basis von zwei verschiedenen Szenarien zur zukünftigen Treibhausgasentwicklung, dem gemäßigten Szenario SRES A1B und dem „Weiter-wie-bisher-Szenario“ RCP8.5. Jedes der beiden Szenarien wurde durch ein unterschiedliches Ensemble von Klimamodellen repräsentiert. Es wurde sowohl die historische und zukünftige Entwicklung des Klimas als auch die historische und zukünftige Entwicklung des Abflusses analysiert. Zur Bewertung der Abflussverhältnisse wurden zwei hydrologische Impaktmodelle, das Modell PANTA RHEI und das Modell HBV-IWW verwendet.

Die Analysen der klimatischen Trends über den Zeitraum 1951-2015 zeigen folgende Entwicklungen:

- Die Temperaturen haben in Niedersachsen in der Vergangenheit flächendeckend zugenommen.
- Die mittleren Niederschläge und die Niederschlagsmengen bei größeren Niederschlagsereignissen haben vor allem im Herbst/Winter zugenommen, im Sommer kam es eher zu Abnahmen.
- Die Anzahl der Ereignisse mit hohen Niederschlägen hat vor allem im Norden von Niedersachsen zugenommen.

Die Analysen der zukünftigen klimatischen Verhältnisse zeigen folgende Entwicklungen:

- Die Temperatur wird in ganz Niedersachsen deutlich zunehmen, wobei die stärksten Veränderungen in der fernen Zukunft (2071-2100) auftreten werden.
- In der fernen Zukunft sind in Niedersachsen nahezu flächendeckende Zunahmen der mittleren Winterniederschläge zu erwarten. Bezüglich der zukünftigen Entwicklung der mittleren Niederschläge im Sommer gibt es unterschiedliche Tendenzen bei den betrachteten Klimamodellensembles: SRES A1B projiziert eine Abnahme, RCP8.5 zeigt kein eindeutiges Signal.
- Vor allem in der fernen Zukunft kann es zu Zunahmen der Niederschlagsmengen bei größeren Niederschlagsereignissen im Winter und regional in den Übergangsjahreszeiten kommen.
- Auf Basis der betrachteten Klimamodellensembles

setzen sich die beobachteten Trends der untersuchten klimatischen Kenngrößen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts fort. Dies kann darauf hindeuten, dass sich bereits heute der Klimawandel in den beobachteten Klimadaten zeigt.

Die Analysen der Abflusstrends über den Zeitraum 1966-2013 zeigen folgende Entwicklungen:

- Im Sommer haben die mittleren Abflüsse sowie die Hochwasserabflüsse abgenommen.
- Im Herbst haben die Hochwasserabflüsse sowie die Dauer und Häufigkeit von Hochwasserereignissen regional zugenommen.

Für die landesweite Regionalisierung von Hochwasserkennwerten lässt sich festhalten:

- Für meso-skalige Einzugsgebiete konnte das Index-Flood Verfahren erfolgreich angewendet werden.
- Für übergeordnete Gewässer wird das Längsschnittverfahren empfohlen.

Die Analysen der zukünftigen Abflussverhältnisse mit den Ensembles SRES A1B und RCP8.5 zeigen insgesamt folgende Tendenzen:

- Es sind Zunahmen der Jahresmittelwerte des Abflusses und der mittleren Abflüsse im Winter in beiden Zukunftszeiträumen zu erwarten.
- Bezüglich Scheitelabflüssen von Hochwasserereignissen in der nahen Zukunft für das Gesamtjahr und Winterhalbjahr zeigen die beiden Ensembles unterschiedliche Tendenzen: SRES A1B weist eine leichte Tendenz zur Abnahme auf, RCP8.5 eine Zunahme
- In der nahen Zukunft sind im Sommer Zunahmen der Scheitelabflüsse von Hochwasserereignissen zu erwarten.
- In der fernen Zukunft kommt es zur Zunahme der Scheitelabflüsse von Hochwasserereignissen, wobei stärkere Zunahmen im Sommer als im Winter auftreten.
- Auf Basis der betrachteten Klimamodellensembles setzen sich die beobachteten abnehmenden Trends im Sommer nicht fort. Stattdessen sind in der fernen Zukunft Zunahmen der Abflüsse in allen Jahreszeiten zu erwarten.

Aus dem Projekt heraus wurden Handlungsempfehlungen für eine zukünftige Berücksichtigung des Klimawandels in der wasserwirtschaftlichen Praxis abgeleitet. Als Ergebnis wird ein Beiwert empfohlen, der unter der Prämisse des „no regret“ bei zukünftigen Maßnahmen und Planungen im Bereich Hochwasser angewendet werden sollte. Unter Einbeziehung von regionalisierten Hochwasser-Kennwerten, die im Zuge von KliBiW auf Basis von Beobachtungsdaten ermittelt wurden, besteht so die Möglichkeit, für jeden beliebigen Flussabschnitt in Niedersachsen klimaangepasste Maßnahmen zu entwickeln.



Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Klima(folgen)forschung	1
1.2	Motivation für das Projekt KliBiW	1
1.3	Zielsetzungen	2
2	Projektgrundlagen	3
2.1	Organisation	3
2.2	Untersuchungsgebiet	3
2.3	Datengrundlagen	4
2.4	Vorgehensweise	5
3	Betrachtung der klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit bis heute	6
3.1	Trendanalysen von Stationsdaten	6
3.1.1	Datenbasis	6
3.1.2	Methode	7
3.1.3	Ergebnisse	8
3.1.4	Zusammenfassung	13
3.2	Regionalisierung von Klimadaten	13
3.2.1	Datenbasis	13
3.2.2	Methodik	14
3.2.3	Ergebnisse	14
4	Betrachtung der Abflussverhältnisse der Vergangenheit bis heute	16
4.1	Trendanalysen von Pegel­daten	16
4.1.1	Datenbasis	16
4.1.2	Methode	17
4.1.3	Ergebnisse	18
4.1.4	Zusammenfassung	20
4.2	Regionalisierung von ausgewählten Hochwasser-Kennwerten	20
4.2.1	Bisheriges Verfahren	20
4.2.2	Empfohlene Verfahren	20
4.2.3	Datengrundlage	20
4.2.4	Allgemeine Methodik	23
4.2.5	Das Index-Flood Verfahren	23
4.2.6	Methodenvergleich	30
4.2.7	Längsschnittverfahren	33
4.2.8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	36
5	Die Klimamodell-Ensemble von KliBiW	37
5.1	Regionale Klimamodellierung	37
5.2	Ensemble-Mitglieder	38
5.3	Regionalisierung der Modelldaten	40
5.3.1	Regionalisierung der Daten der statischen Klimamodelle	40
5.3.2	Regionalisierung der Daten der dynamischen Klimamodelle	41
5.4	Auswahl von WETTREG-Realisationen für die Simulationen im Wasserhaushaltsmodell	44
5.5	Validierung der Klimamodell­daten anhand von Beobachtungsdaten (Bias-Adjustierung)	46
5.5.1	Methode	46



5.5.2	Ergebnisse.....	48
5.5.3	Zusammenfassung.....	54
5.6	Anpassung der Klimamodelldaten an die Beobachtung (Bias-Adjustierung).....	54
5.6.1	Methode.....	55
5.6.2	Ergebnisse.....	56
5.6.3	Zusammenfassung.....	60
6	Analyse der möglichen klimatischen Verhältnisse der Zukunft.....	61
6.1	Robustheit von Klimaänderungssignalen.....	61
6.2	Analyse ausgewählter Klima-Kenngrößen.....	63
6.3	Zusammenfassung.....	73
6.4	Gegenüberstellung von beobachteten Trends und modellierten Änderungssignalen des Klimas.....	74
7	Analyse der möglichen hydrologischen Verhältnisse der Zukunft.....	75
7.1	Das hydrologische Modellsystem PANTA RHEI.....	75
7.1.1	Modellbeschreibung.....	75
7.1.2	Relevante hydrologische Prozesse für die Wasserhaushaltssimulation.....	76
7.1.3	Modellaufbau der untersuchten Einzugsgebiete.....	77
7.1.4	Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher baulicher Anlagen.....	77
7.1.5	Kalibrierung und Validierung.....	79
7.2	Simulation ausgewählter Abflusskenngrößen mit PANTA RHEI.....	82
7.2.1	Auswertung der Modellläufe der Referenzperiode.....	83
7.2.2	Auswertung der Änderungssignale für Abflusskenngrößen.....	85
7.2.3	Zusammenfassung.....	100
7.3	Das Modell HBV-IWW.....	100
7.3.1	Modellbeschreibung.....	100
7.3.2	Datenbasis.....	101
7.3.3	Methodik.....	101
7.3.4	Ergebnisse von Kalibrierung und Validierung.....	102
7.3.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	104
7.4	Simulation ausgewählter Abflusskenngrößen mit PANTA RHEI und HBV-IWW.....	104
7.4.1	Datengrundlagen.....	104
7.4.2	Methodik.....	106
7.4.3	Ergebnisse der Szenariensimulationen.....	106
7.4.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	110
7.5	Regionalisierung der Änderungssignale von ausgewählten Hochwasser-Kennwerten.....	110
7.6	Gegenüberstellung von beobachteten Trends und modellierten Änderungssignalen des Abflusses.....	111
8	Der Klimawandel und seine Folgen für die Wasserwirtschaft im niedersächsischen Binnenland.....	112
8.1	Zusammenfassende Bewertung.....	112
8.2	Handlungsempfehlungen.....	115
8.3	Ausblick.....	116
9	Literaturverzeichnis.....	117
10	Abbildungsverzeichnis.....	122
11	Tabellenverzeichnis.....	128
12	Glossar und Abkürzungsverzeichnis.....	129
13	Anhang.....	132



1 Einleitung

1.1 Stand der Klima(folgen)forschung

Im Jahr 1988 wurde der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, kurz: IPCC) vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) als zwischenstaatliche Institution gegründet. Sein Auftrag ist es, wissenschaftliche Erkenntnisse zum Klimawandel zusammenzutragen. Seither hat der IPCC fünf Sachstandsberichte veröffentlicht. Im fünften IPCC-Sachstandsbericht, der 2013 erschienen ist, wird deutlicher denn je ausgedrückt, dass ein anthropogener Klimawandel stattfindet. So war die Erdoberflächentemperatur in den letzten drei Jahrzehnten höher als in allen vergangenen Jahrzehnten seit 1850 (IPCC, 2013). Die mittlere globale Land- und Ozeanoberflächentemperatur hat im Zeitraum von 1880 bis 2012 um $0,85^{\circ}\text{C}$ zugenommen, wobei diese Erwärmung auf den anthropogen verursachten Anstieg von Treibhausgasen zurückzuführen ist (IPCC, 2013). Die IPCC-Berichte legen Analysen auf globaler Ebene dar, einzelne Regionen werden nicht detailliert betrachtet. Kleinräumigere Informationen auf nationaler Ebene stellt z. B. das Climate Service Center Germany (GERICS) zur Verfügung. Es wurde im Jahr 2009 gegründet und hat die Aufgabe, das Wissen in der Klimaforschung für Deutschland zu bündeln, Forschungsprojekte zu initiieren und im Umgang mit Klimamodelldaten Hilfestellung zu leisten. Neben wissenschaftlichen Fachartikeln bringt das GERICS auch Berichte zum Einfluss des Klimawandels in unterschiedlichen Sektoren sowie zur Klimaanpassung heraus. Weitere Informationen zum Klimawandel finden sich etwa beim Deutschen Wetterdienst (DWD). Dieser stellt im Deutschen Klimaatlas Karten und Trendanalysen zur Verfügung, anhand derer das vergangene sowie das für die Zukunft projizierte Klima auf Basis von Klimaszenarien abgelesen werden kann. Von 1881 bis 2014 stieg die durchschnittliche Jahrestemperatur in Deutschland um $+1,3^{\circ}\text{C}$. Die Niederschläge haben im selben Zeitraum verglichen mit dem langjährigen Mittel von 1961 bis 1990 um $+10,2\%$ zugenommen, wobei die stärksten Zunahmen ($+26\%$) in den Wintermonaten stattfanden (Kaspar & Mächel, 2017).

Um neben der vergangenen auch die zukünftige Klimaentwicklung abschätzen zu können, entwickeln Forscher komplexe Klimamodelle. Diese Modelle simulieren Veränderungen des Klimasystems auf Basis von Annahmen über die zukünftige Entwicklung klimarelevanter Faktoren (z. B. Treibhausgasemissionen) sowie auf Basis der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Land und Ozeanen. Die Ergebnisse der Klimamodelle können als Eingangsgrößen in Impactmodelle eingehen und ermöglichen so eine Abschätzung von Klimafolgen. In den letzten Jahren sind sowohl auf Bundes- als auch

auf Landesebene Projekte durchgeführt worden, die die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Sektoren, u. a. auf die Wasserwirtschaft, untersucht haben. So wurden im Rahmen von KLIWAS (Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland - Entwicklung von Anpassungsoptionen) die Folgen des Klimawandels für die Bundeswasserstraßen analysiert. Im Zuge des BMVI-Expertennetzwerkes werden diese Betrachtungen aktuell auch auf andere Verkehrsträger übertragen. Das Projekt KLIWA (Klimaveränderungen und Wasserwirtschaft) beschäftigt sich seit 1998 mit den Auswirkungen auf Binnengewässer in Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass in der Zukunft hydrologische Veränderungen zu erwarten sind, beispielsweise die Zunahme der mittleren Abflüsse im Winter. Das Verbundprojekt KLIFF (Klimafolgenforschung in Niedersachsen) hat in seinem Forschungsthema KLIFWA (Auswirkungen von Klimaänderungen auf Wasserdargebot, Hochwasserrisiko und Gewässerbelastung in Niedersachsen) bereits erste wissenschaftliche Grundlagen für die Einschätzung von Klimafolgen für die Wasserwirtschaft in Niedersachsen geschaffen (Wallner et al., 2013). Eine Empfehlung aus dem Projekt war die Erweiterung des Modellensembles. Diese wurde in der aktuellen KliBiW-Phase berücksichtigt.

1.2 Motivation für das Projekt KliBiW

Die globale Erwärmung lässt auch Auswirkungen auf die Wasserressourcen in Niedersachsen erwarten. Zu den möglichen Folgen zählen die Einschränkung des Wasserdargebots und die Zunahme von Hochwasserereignissen. Das Projekt KLIWA, das in den südlichen Bundesländern seit nunmehr fast 20 Jahren umfangreiche Analysen zu den Klimawandelfolgen für die Wasserwirtschaft durchführt, geht von einer deutlichen Zunahme der mittleren Abflüsse im Winter und einer daraus folgenden Verschärfung der Hochwassersituation aus (KLIWA, 2006). Aus diesem Grund wurde im Jahr 2008 das Projekt KliBiW (Globaler Klimawandel - Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland) ins Leben gerufen. Ziel war es, unter Einbeziehung der lokalen Gegebenheiten die Klimawandelfolgen für die Wasserwirtschaft in Niedersachsen genauer zu quantifizieren. Nach einer ersten Projektphase, bei der es zunächst um die Entwicklung bzw. Testung geeigneter Methoden zur Klimaanalyse ging, wurden diese Verfahren in den anschließenden Projektphasen 2 und 3 auf das Aller-Leine-Oker-Gebiet angewendet (NLWKN, 2012; NLWKN, 2015). Der Fokus lag dabei im Wechsel auf der Hochwasser- (Phase 2) und Niedrigwassersituation (Phase 3). In Projektphase 4 wurde sowohl die Anzahl der verwendeten Klimamodellketten, als auch die Anzahl der betrachteten Einzugsgebiete erhöht. Dadurch soll auch den gesetzlichen Forderungen Rechnung getragen werden, die Auswirkungen des Klimawandels bei der



landesweiten Identifikation des Hochwasserrisikos zu berücksichtigen (vgl. Richtlinie 2007/60/EG und Wasserhaushaltsgesetz).

1.3 Zielsetzungen

Die vierte Phase des KliBiW-Projektes hatte zum Ziel, die wasserwirtschaftlichen Folgen des Klimawandels für alle Risikogewässer gemäß Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (Richtlinie 2007/60/EG) in Niedersachsen zu bewerten. Die Analysen beruhen auf den aktuellen, durch die internationale Klimaforschung bereitgestellten Klimaprojektionen. Neben der Analyse der zukünftigen Entwicklung von Temperatur und Niederschlag sollten durch den Einsatz von hydrologischen Impaktmodellen Aussagen zur zukünftigen Entwicklung von Hochwasserabflüssen getroffen werden. Auf Grundlage der Projektergebnisse sollten Handlungsempfehlungen für die Praxis abgeleitet werden. Gleichzeitig sollte der Gewäs-

serkundliche Landesdienst (GLD) in die Lage versetzt werden, die Auswirkungen des Klimawandels entsprechend der gesetzlichen Forderungen landesweit regional fachlich zu beschreiben, vorsorgende Maßnahmen zu entwickeln und Entscheidungsträger zu beraten. Im Rahmen der Klimaanpassung war es ein weiteres Projektziel, eine Entscheidungsgrundlage für die mögliche Festlegung von Klimabeiwerten zu liefern, wie sie bereits in Bayern und Baden-Württemberg eingeführt wurden (Hennegriff & Kolokotronis, 2007).

Die wesentlichen Arbeitsschwerpunkte in der Phase 4 waren (vgl. auch Abbildung 2-1):

- Analyse der aktuellen und zukünftigen klimatischen Verhältnisse
- Analyse der aktuellen und zukünftigen (Hochwasser-)Abflussverhältnisse
- Regionalisierung von aktuellen und zukünftigen Hochwasser-Kennwerten

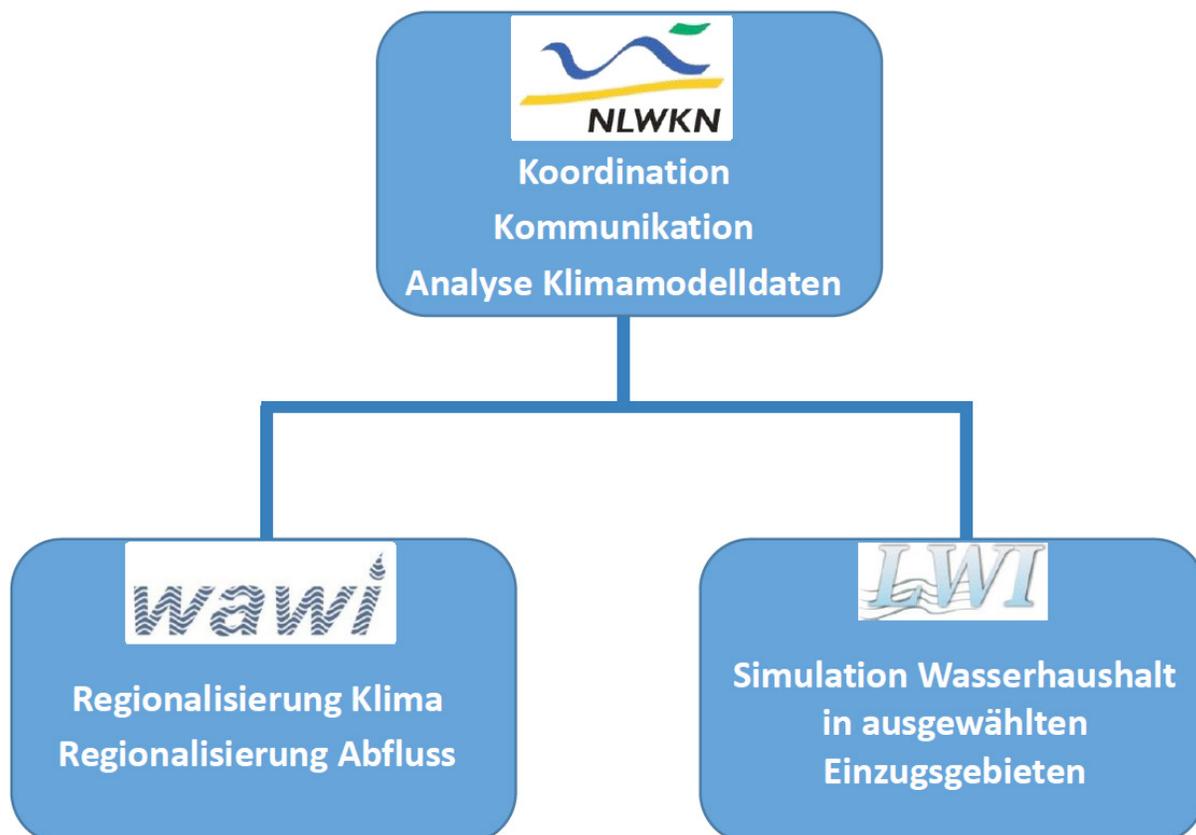


Abbildung 2-1: Projektpartner mit Arbeitsschwerpunkten in KliBiW 4



2 Projektgrundlagen

2.1 Organisation

Das Projekt KliBiW (Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland) wurde im Jahr 2008 ins Leben gerufen. Seither sind vier Projektphasen abgeschlossen worden, die sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf Hoch- und Niedrigwasser beschäftigt haben. Dabei wurde im Laufe der Zeit die Zahl der verwendeten Klimamodellketten sowie das Untersuchungsgebiet erweitert. Der Fokus von Projektphase 4, die in diesem Abschlussbericht behandelt wird, lag auf den Folgen des Klimawandels für das Hochwassergeschehen. Das Projekt KliBiW wird durch das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU) gefördert. Die Leitung und Koordination obliegt dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Projektpartner sind das Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Leibniz Universität Hannover (WAWI LUH) sowie das Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig (LWI TUBS). In Phase 1-3 des Projektes war außerdem die Harzwasserwerke GmbH beteiligt. Grundlegende Entscheidungen im Verlauf des Projektes werden durch eine Lenkungsgruppe, bestehend aus MU, NLWKN und den beiden Universitäten, getroffen. Beteiligt ist hierbei außerdem die Projektgruppe Hochwasserrisikomanagement des NLWKN. Der fachliche Austausch erfolgt auf Ebene der Projektbearbeiter bei NLWKN und den beiden Universitäten.

2.2 Untersuchungsgebiet

Die Analyse der klimatischen Verhältnisse der Gegenwart und Zukunft erfolgte für die gesamte niedersächsische Landesfläche von etwa 47.600 km². Bei der Analyse der gegenwärtigen Abflüsse sowie deren Regionalisierung wurde der tidebeeinflusste Bereich ausgenommen. Somit sollte der möglicherweise unterschiedlichen zukünftigen Entwicklung in den verschiedenen Naturräumen Niedersachsens Rechnung getragen werden. Abbildung 2-2 zeigt die naturräumliche Gliederung Niedersachsens. Grob lässt sich Niedersachsen in zwei Bereiche einteilen, in das niedersächsische Tiefland, bestehend aus Watt und Marschen, Geest und Bergvorland, sowie in das Berg- und Hügelland.

Klimatisch ist Niedersachsen der feucht-gemäßigten Westwindzone zuzuordnen. Diese ist charakterisiert durch ausgeprägte vier Jahreszeiten und schnelle Witterungswechsel. Im nordwestlichen Niedersachsen im Bereich von Marsch und Geest ist der maritime Einfluss stark ausgeprägt. Niederschläge treten in allen Jahreszeiten auf, die Winter sind mild, die Sommer regnerisch und verhältnismäßig kühl. Mit zunehmender Entfernung

zur Nordsee wird hingegen der kontinentale Einfluss stärker. Die Winter sind etwas kälter und trockener, die Sommer etwas wärmer und trockener. Dies zeigt sich vor allem in den östlichen Bereichen von Lüneburger Heide und Wendland, Weser-Aller-Flachland und Börden. Im Süden Niedersachsens im Bereich von Berg- und Hügelland macht sich der Einfluss der Höhenlage auf das Klima bemerkbar. Die durchschnittliche Temperatur nimmt ab, die Niederschlagsmenge nimmt zu. Die Jahresmitteltemperatur in Niedersachsen liegt bei etwa 9°C, wobei die Winter im Bereich der Nordseeküste und die Sommer im östlichen Niedersachsens sowie in den sonnenexponierten Tälern des Berglandes am wärmsten sind (Seedorf & Meyer, 1992). Die durchschnittliche Niederschlagshöhe in Niedersachsen liegt bei 830 mm/a, wobei die höchsten Werte im Harz und die niedrigsten Werte im Osten des Landes zu verzeichnen sind (vgl. Kapitel 3.2.3).

Bei der Analyse der zukünftigen Abflussverhältnisse wurde der Fokus auf die folgenden sieben Einzugsgebiete gerichtet (Abbildung 2-3):

Tabelle 2-1: Betrachtete Einzugsgebiete

Name des Einzugsgebiets	Einzugsgebietsgröße (km ²)
Aller-Leine-Oker	15.721
Große Aue	1.522
Hase	3.115
Hunte	2.704
Ilmenau	2.850
Vechte	1.957
Wümme	2.187

Die Auswahl stellt die im Rahmen der vorläufigen Bewertung nach Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EG-HWRM-RL) ermittelten Risikogewässer dar. Es wurden zusätzlich Kopfgebietspegel in ganz Niedersachsen simuliert.



Abbildung 2-2: Naturräumliche Gliederung Niedersachsens (NLWKN, 2015)

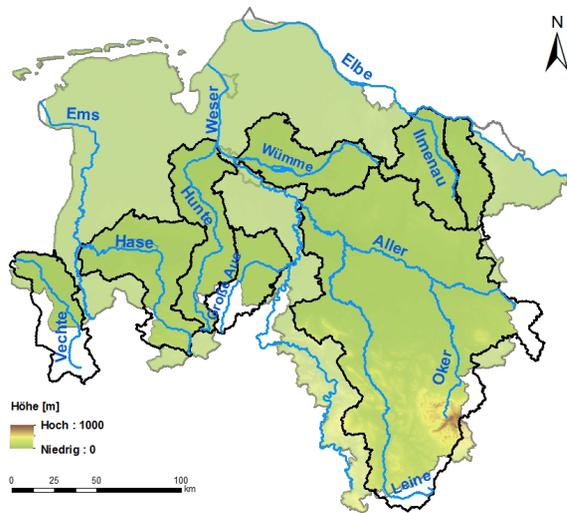


Abbildung 2-3: Untersuchungsgebiete in KliBiW 4

2.3 Datengrundlagen

Für die Analysen im Rahmen von KliBiW 4 wurde eine Vielzahl von Daten, u. a. meteorologische und hydrologische Beobachtungsdaten sowie geographische Daten, verwendet. Diese bildeten die Grundlage für Trendanalysen, die Regionalisierung von Klima und Abfluss sowie für die Validierung der Klimamolldaten und die Kalibrierung der hydrologischen Modelle. Einen Überblick über die Datenbasis gibt Tabelle 2-2. Die Daten der verwendeten regionalen Klimaprojektionen sind hier nicht aufgeführt. Deren detaillierte Auflistung und Beschreibung findet sich in Kapitel 5.2.

Tabelle 2-2: Datenbasis für KliBiW 4

Datentyp	Beschreibung	Auflösung (räumlich/zeitlich)	Zeitraum	Herkunft ¹⁾
Meteorologische Daten				
Niederschlag	924 Stationen	Tageswerte	1950-2015	DWD
Temperatur (Min., Mittel, Max.)	165 Stationen	Tageswerte	1951-2015	DWD
Luftfeuchte	165 Stationen	Tageswerte	1951-2015	DWD
Wind	165 Stationen	Tageswerte	1951-2015	DWD
Globalstrahlung	165 Stationen	Tageswerte	1951-2015	DWD
Sonnenscheindauer	165 Stationen	Tageswerte	1951-2015	DWD
Abflussdaten				
Pegeldaten	338 Stationen	Tageswerte	1886-2014	NLWKN
Geodaten				
Digitales Geländemodell	DGM10	10 m x 10 m	-	BKG
Gewässernetz und (Teil-) Einzugsgebiete	Hydrographische Karte Niedersachsen	-	-	NLWKN
Landnutzung	Amtliches Topografisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS) CORINE Land Cover (CLC) 2006	-	-	LGLN, BKG
Boden	Bodenübersichtskarte BÜK50 Nds im Maßstab 1:50.000 Nds sowie BÜK1000 Nds im Maßstab 1:1.000.000	-	-	LBEG
Klimamolldaten				
Klimaprojektionen auf Basis des Klimaszenarios SRES A1B	6 Modellketten (Global-/Regionalmodell)	10 x 10 km bis 18 x 18 km (dynamische Modelle), Tageswerte	-	CERA-Datenbank
Klimaprojektionen auf Basis des Klimaszenarios RCP8.5	8 Modellketten (Global-/Regionalmodell)	12,5 x 12,5 km, Tageswerte	-	ESGF-Datenbank

¹⁾ DWD: Deutscher Wetterdienst
 NLWKN: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
 BKG: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
 LGLN: Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen
 CERA: Climate and Environmental Retrieval and Archive
 ESGF: Earth System Grid Federation



2.4 Vorgehensweise

Die Analysen im Rahmen von KliBiW 4 wurden in verschiedenen aufeinander aufbauenden Teilprojekten bearbeitet, die im Ablaufschema in Abbildung 2-4 dargestellt sind. In einem ersten Schritt wurden die regionalen Klimamodelldaten von den Daten-Servern des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) heruntergeladen und mit Hilfe der Climate Data Operators (CDO) aufbereitet. Die Entwicklung der Regionalmodelle auf Basis der eingehenden Emissionsszenarien sowie der globalen Klimamodelle ist lediglich der Verständlichkeit halber im Schema aufgeführt, sie war nicht Teil des Projekts. Im zweiten Schritt wurden die regionalen Klimamodelldaten Bias-adjustiert. Genauere Informationen dazu finden sich in Kapitel 5.6. Im Rahmen der durch den NLWKN durchgeführten Klimadatenanalyse wurden die regionalen, Bias-adjustierten Klimaprojektionen Klimamodelldaten auf ein 10x10 km-Raster interpoliert und die zukünftigen Änderungen verschiedener Klimakenngrößen analysiert (Kapitel 5.3 und Kapitel 6.2). Zugleich wurden die Bias-adjustierten und regionalisierten Klima-

modelldaten an die Projektpartner von LUH und TUBS übergeben, um in der Wasserhaushaltsmodellierung Eingang zu finden. Zur Quantifizierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft wurden die zwei Wasserhaushaltsmodelle PANTA RHEI (TUBS) und HBV-IWW (LUH) eingesetzt. Die Modelle wurden mit meteorologischen und hydrologischen Beobachtungsdaten kalibriert. Die meteorologischen Stationsdaten wurden im Vorfeld auf ein 1x1 km-Raster interpoliert (Kapitel 3.2). Die kalibrierten hydrologischen Modelle wurden dann mit den Daten der regionalen Klimamodelle für den Zeitraum 1971-2100 betrieben. Die Ergebnisse wurden als Änderungssignale, gemittelt über einen 30jährigen Zukunftszeitraum gegenüber einem Referenzzeitraum (1971-2000), an den Pegeln dargestellt (Kapitel 7.2 und Kapitel 7.4). Alle Berechnungen und Auswertungen erfolgten auf Tageswertbasis.

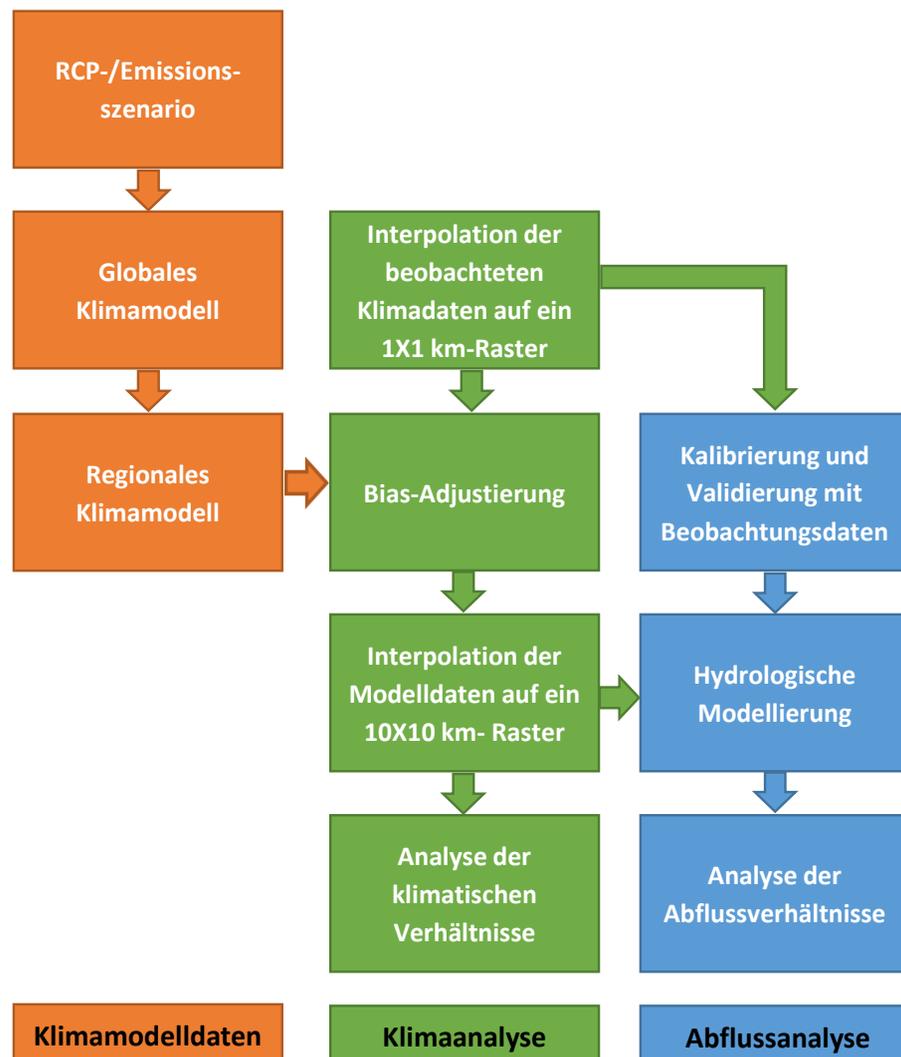


Abbildung 2-4: Ablaufschema von KliBiW 4



3 Betrachtung der klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit bis heute

3.1 Trendanalysen von Stationsdaten

Die Betrachtungen der Entwicklung von klimatischen Kenngrößen in der Vergangenheit bis in die Gegenwart geben nicht nur Auskunft über die Dynamik oder Konstanz von gegenwärtigen Verhältnissen. Sie geben möglicherweise auch Hinweise auf Anzeichen von Veränderungen, die auf den Einfluss des Klimawandels zurückgeführt werden können. Entsprechende Analysen wurden bereits in den vorherigen Phasen von KiBiW für den Zeitraum 1951 bis 2005 durchgeführt (NLWKN, 2012; Haberlandt et al., 2010). Im Zuge der aktuellen Projektphase wurden diese Methoden aufgegriffen und fortgeführt, um die Aussagen bzgl. der Entwicklungen zu aktualisieren.

3.1.1 Datenbasis

Für die Trendanalysen der klimatischen Verhältnisse standen Stationszeitreihen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit Tageswerten ohne Richter-Korrektur (Richter, 1995) zur Verfügung. Der Betrachtungsraum umfasste ganz Niedersachsen sowie zusätzlich einen etwa 20 km breiten Pufferstreifen, der u. a. die nach Niedersachsen entwässernden Flüsse mit ihren Teileinzugsgebieten umfasste. Insgesamt lagen für das Gebiet 924 Stationen mit Niederschlagsdaten und 165 Stationen mit weiteren Klimadaten vor.

Das Trendverhalten einer Zeitreihe kann in erheblichem Maße vom Betrachtungszeitraum abhängen, für den eine Analyse durchgeführt wird. Die Ergebnisse der Analysen gelten ausschließlich für diesen Zeitraum und sind nicht ohne Weiteres auf andere Zeitabschnitte übertragbar. Im vorliegenden Bericht war es das Ziel, das Langzeitverhalten des vergangenen Klimas zu untersuchen. Für die meisten der Stationen liegen kontinuierliche Aufzeichnungen ab dem Jahr 1951 vor. Um auf der einen Seite einen möglichst langen Zeitraum für die Trendanalysen zu betrachten und auf der anderen Seite möglichst flächendeckende Informationen für Niedersachsen zu erhalten, wurde der Analysezeitraum von 1951 bis 2015 festgelegt. Unter Berücksichtigung dieses 65-jährigen Zeitraumes und dem Kriterium, dass die Stationen einen maximalen Fehlwertanteil von 5% pro Jahr aufweisen dürfen, wurden Daten von 175 Niederschlagsstationen und 20 Klimastationen für die weiteren Analysen ausgewählt (vgl. Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2).

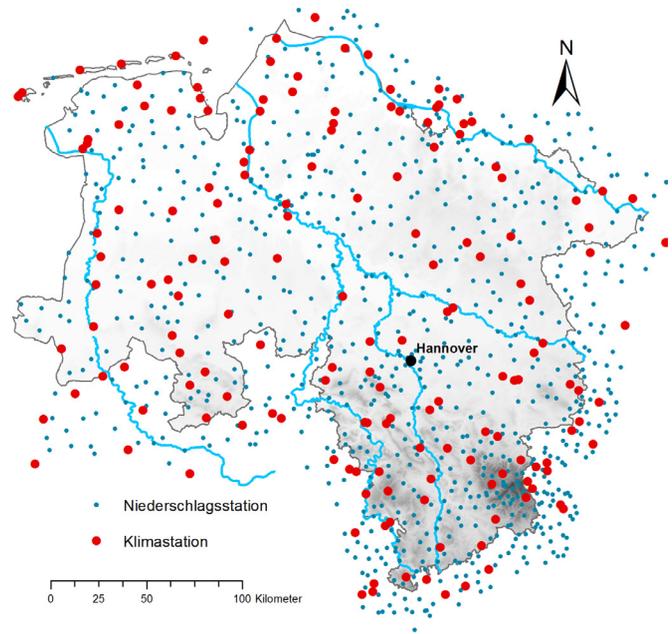


Abbildung 3-1: Untersuchungsgebiet mit allen verfügbaren Niederschlags- und Klimastationen

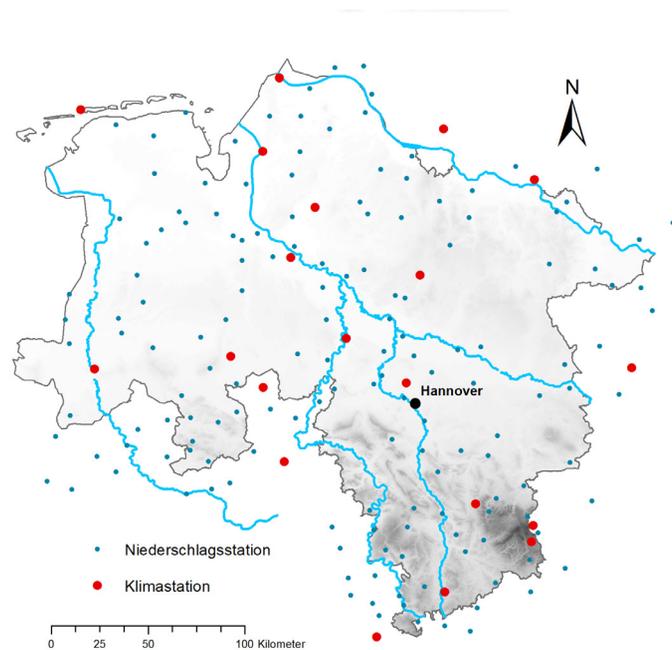


Abbildung 3-2: Untersuchungsgebiet mit den für die Analysen verwendeten Niederschlags- und Klimastationen



3.1.2 Methode

Die Analyse der Trends erfolgte für ausgewählte Klima-Kenngrößen. Hierbei wurden Indizes betrachtet, die neben den mittleren klimatischen Verhältnissen auch die wasserwirtschaftlich relevanten Extremwerte charakterisieren (vgl. Tabelle 3-1). Die Trends wurden auf Basis von Tageswerten an jeder Klimastation über den 65-jährigen Betrachtungszeitraum sowohl für das Gesamtjahr als auch für die vier Jahreszeiten Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August), Herbst (September, Oktober, November) und Winter (Dezember, Januar, Februar) ermittelt. Hierfür wurde für jede Stationszeitreihe zunächst eine jährliche Serie gebildet, d.h. es wurde für jedes der analysierten Jahre ein Wert pro Gesamtjahr bzw. Jahreszeit berechnet. Anschließend wurde für jede dieser Reihen, bestehend aus 65 Werten je Station, die Trendstärke und die Signifikanz berechnet.

Die Schätzung der Stärke des Trends, also des Betrages und der Richtung der Veränderung innerhalb des Betrachtungszeitraumes, erfolgte anhand eines Verfahrens nach Theil und Sen (Theil, 1950; Sen, 1968). In diesem nicht-parametrischen Verfahren wird die Steigung des Trends als Median der Steigungen der Linien durch alle möglichen Punktepaare, die sich aus den 65 Werten ergeben, berechnet. Dadurch ist die Trendschätzung robuster gegenüber „Ausreißern“, die bei einer Trendanalyse mittels z. B. linearer Regression den Trendwert stärker beeinflussen würden. Anschließend wird mit Hilfe dieses Steigungsmaßes die absolute bzw. relative Änderung der ausgewählten Kenngröße über den betrachteten Zeitraum ermittelt. Eine beispielhafte Darstellung von Zeitreihen und den resultierenden Trends zeigt die Abbildung 3-3.

Die Betrachtung der möglichen Signifikanz der Trends erfolgte an den einzelnen Stationen anhand des rangbasierten Mann-Kendall Trendtests (Kendall, 1975; Mann, 1945). Dieser nicht-parametrische Test legt die Nullhypothese zugrunde, dass kein Trend in der jeweiligen Zeitreihe enthalten ist, d.h. der Mittelwert und die Varianz der Reihe bleiben über den Betrachtungszeitraum annähernd konstant. Die Prüfgröße berechnet sich dabei aus den Summen der Vorzeichen der Differenzen aller chronologisch geordneten Wertepaare. Die Signifikanz des Trends lässt sich mit Hilfe der standardisierten Varianz der Prüfgröße ermitteln. Liegt diese unter einem Niveau von 5%, wird die Nullhypothese verworfen und der Trend gilt als signifikant. Dies bedeutet, dass mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ein Trend in der Zeitreihe vorliegt. Ebenso wie das Verfahren nach Theil und Sen ist der Mann-Kendall Test robust gegenüber Ausreißern. Er neigt jedoch zu einer Überschätzung der Signifikanz bei autokorrelierten Reihen. Um diesen Einfluss zu reduzieren, wurde die Methode des „pre-whitening“ auf Zeitreihen mit einer dominierenden Autokorrelation erster Ordnung angewendet (Yue et al., 2002).

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

Niederschlagskenngrößen	Einheit	Beschreibung
Px3d	mm	Größte 3-Tages-Niederschlagssumme
Pq90	mm	90 %-Quantil für Tageswerte mit $N > 1$ mm/d
Pni90	d	Anzahl der (Tages-)Ereignisse mit $N >$ Langzeit-90 %-Quantil
Psum	mm	Summe der Niederschläge für Tage mit $N \geq 1$ mm/d
Pxcd	d	Größte Anzahl aufeinander folgender (Trocken-)Tage mit $N < 1$ mm/d
Temperaturkenngrößen	Einheit	Beschreibung
Txq90	°C	90 %-Quantil der Tagesmaximum-Temperaturen
Tmav	°C	Mittelwert der Tagesmittel-Temperaturen
Tnq10	°C	10 %-Quantil der Tagesminimum-Temperaturen

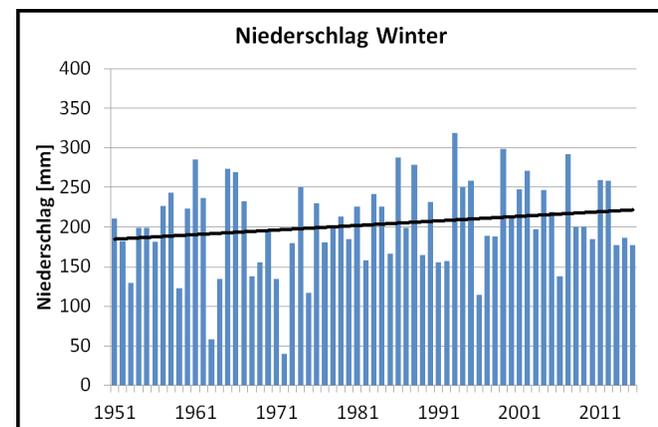
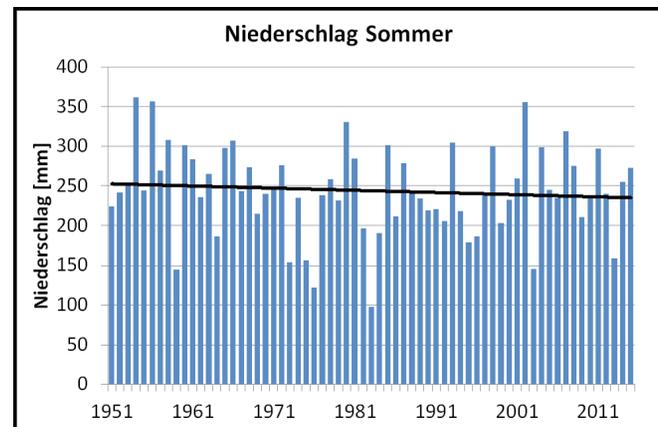


Abbildung 3-3: Niederschlagssummen im Sommer (oben) und Winter (unten) in Niedersachsen; blaue Balken stellen die Niederschlagssummen gemittelt für Niedersachsen dar, die schwarze Gerade zeigt die geschätzte Trendgerade (im Sommer eine nicht signifikante Abnahme, im Winter eine schwach signifikante Zunahme)



3.1.3 Ergebnisse

Die Trends der einzelnen Temperatur-Kenngrößen, gemittelt über alle Stationen in Niedersachsen, sind in Tabelle 3-2 dargestellt. Es zeigt sich, dass grundsätzlich alle Kenngrößen unabhängig von der Saison durchweg zugenommen haben. Hohe Tagesmaximum-Temperaturen (Txq90) verzeichneten innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 1951 bis 2015 im Sommer die größten Zunahmen, im Mittel um fast +3°C, während niedrige Tagesminimum-Temperaturen (Tnq10) die größten Zunahmen im Winter aufwiesen, im Mittel um etwas mehr als +2°C. Die mittleren Temperaturen haben über das Jahr gesehen um 1,6°C zugenommen. Alle Kenngrößen zeigen im Herbst die geringsten Zunahmen.

Tabelle 3-2: Veränderungen der Temperatur-Kenngrößen als Mittel über alle analysierten Stationen (20) in Niedersachsen für den Zeitraum von 1951-2015, geschätzt nach Theil-Sen

Kenngröße	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Gesamtjahr
Txq90 [°C]	1,9	1,9	2,9	0,6	1,9
Tmav [°C]	1,7	2,0	1,5	0,7	1,6
Tnq10 [°C]	2,1	1,5	0,9	0,7	1,5

Die Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests sind in Abbildung 3-4 anteilig für alle Stationen bzgl. Richtung und Signifikanz dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es saisonal leichte Unterschiede zwischen den Kenngrößen gibt. Während die Temperaturen an fast allen Stationen grundsätzlich zugenommen haben, sind die Trends im Herbst für die hohen und niedrigen Temperaturen an praktisch keiner Station signifikant. Bei der mittleren Temperatur sind es knapp 50%. Den höchsten Anteil von signifikanten Trends weisen bei allen Kenngrößen der Sommer und das Gesamtjahr auf. Bei den niedrigen Temperaturen sind die Trends generell am schwächsten signifikant ausgeprägt.

Räumliche Muster oder Schwerpunkte bei den Trends der Temperatur-Kenngrößen sind kaum zu erkennen. Tendenziell sind die zunehmenden Trends im zentralen Niedersachsen vereinzelt etwas schwächer ausgeprägt, während sie vor allem bei den niedrigen Temperaturen im nördlichen Niedersachsen etwas deutlicher bzw. signifikant ausfallen (vgl. Abbildung 3-5).

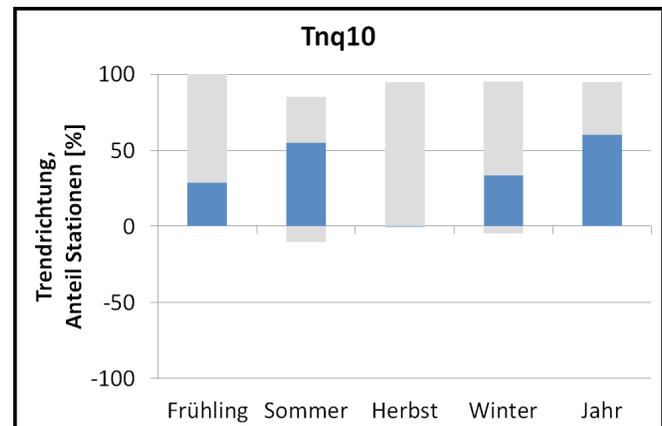
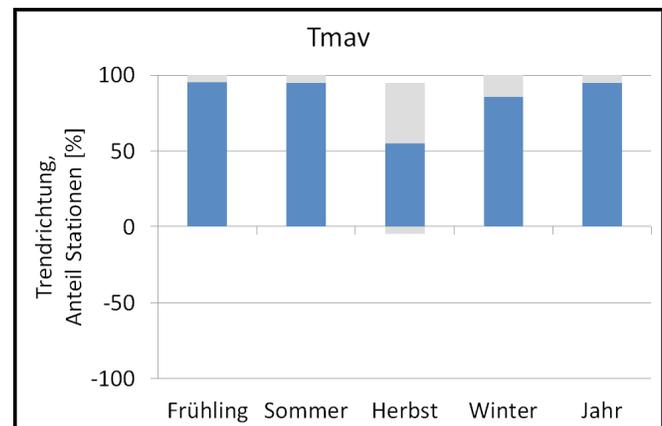
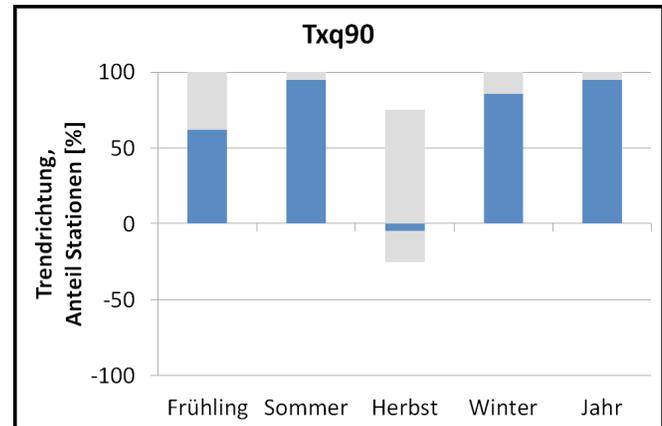
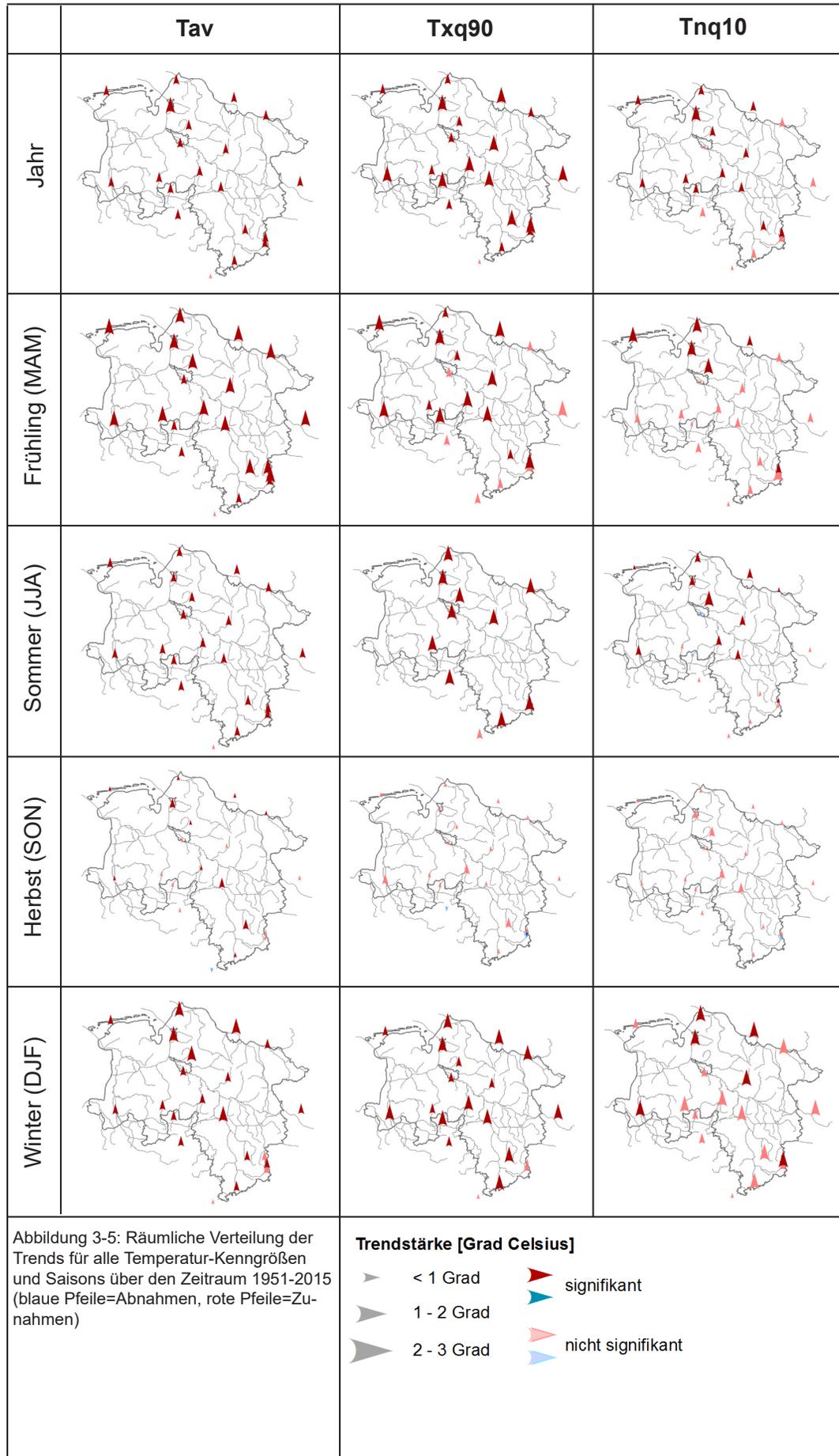


Abbildung 3-4: Richtung und Signifikanz der Trends der Temperatur-Kenngrößen im Zeitraum 1951 bis 2015 (die Richtung der Balken kennzeichnet die Richtung des Trends; blaue Balken kennzeichnen den Anteil der signifikanten Trends)





Die Trends der Niederschlags-Kenngrößen, gemittelt über alle Stationen in Niedersachsen, sind in Tabelle 3-3 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es im Zeitraum 1951 bis 2015 im Herbst und Winter zu einer deutlichen Zunahme der Niederschläge gekommen ist als in den anderen Jahreszeiten. Vor allem die Anzahl der Ereignisse mit hohen Niederschlägen (Pnl90) hat je nach Saison zwischen rund 40 bis 50% zugenommen. Gleichzeitig sind die Niederschläge im Sommer leicht zurückgegangen, während die maximale Dauer von Phasen ohne nennenswerten Niederschlag (Pxcdd) hier deutlich zugenommen hat. Bezogen auf das Gesamtjahr fallen die Veränderungen aller Kenngrößen relativ moderat aus und liegen meist unter 10%.

Die Richtung und Signifikanz der Trends der Niederschlags-Kenngrößen über alle Stationen sind in Abbil-

dung 3-6 dargestellt. Im Gegensatz zu den Temperaturen ist zu erkennen, dass nicht nur die Richtung der Entwicklungen je nach Saison unterschiedlich verlaufen ist, sondern dass auch der Anteil der signifikanten Trends bei allen Kenngrößen deutlich geringer ausfällt. Während es vor allem im Herbst und Winter zu Zunahmen der Niederschläge gekommen ist, die zu einem gewissen Anteil noch als signifikant angesehen werden können, sind die Entwicklungen im Frühling und Sommer nur an wenigen Stationen noch als signifikant zu bezeichnen. Im Sommer weisen die Trends an den Stationen zudem tendenziell eher auf eine Abnahme der Niederschläge hin. Umgekehrt ist es bei den maximalen Trockenphasen (Pxcdd). Diese haben vor allem im Frühling und Sommer zugenommen und im Herbst bzw. Winter eher abgenommen. Allerdings sind diese Entwicklungen an fast keiner Station signifikant.

Tabelle 3-3: Veränderungen der Niederschlags-Kenngrößen als Mittel über alle analysierten Stationen (175) in Niedersachsen für den Zeitraum von 1951 bis 2015, geschätzt nach Theil-Sen

Kenngröße	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Gesamtjahr
Px3d [%]	18	10	-6	27	5
Pq90 [%]	15	11	-1	17	7
Pnl90 [%]	41	23	-10	48	16
Psum [%]	21	3	-6	17	6
Pxcdd [%]	-8	16	21	-6	-2

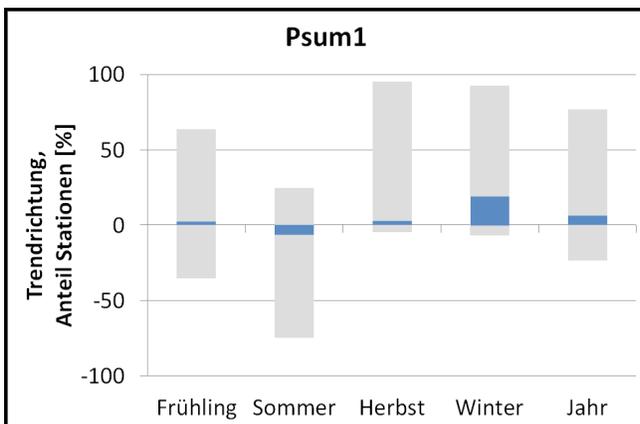
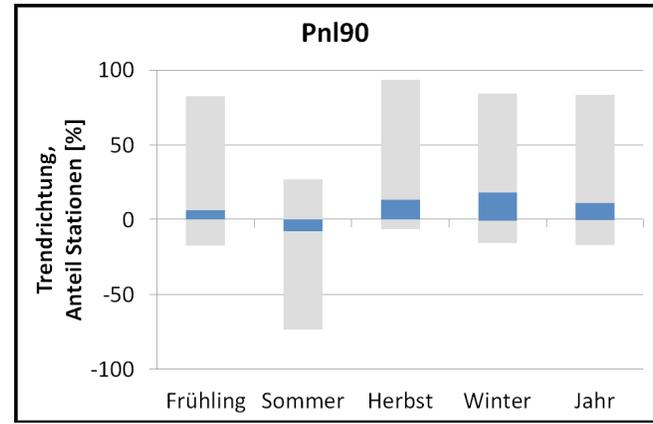
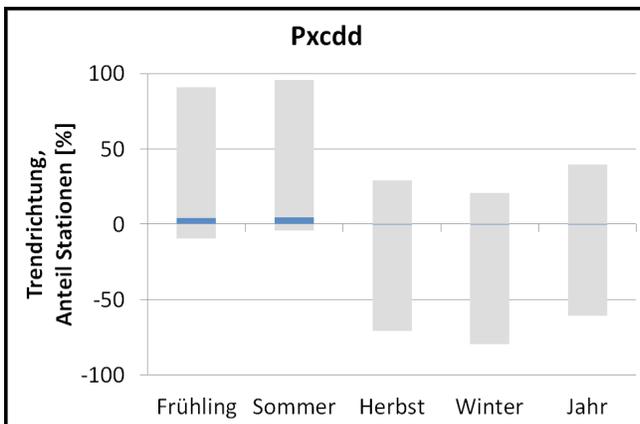
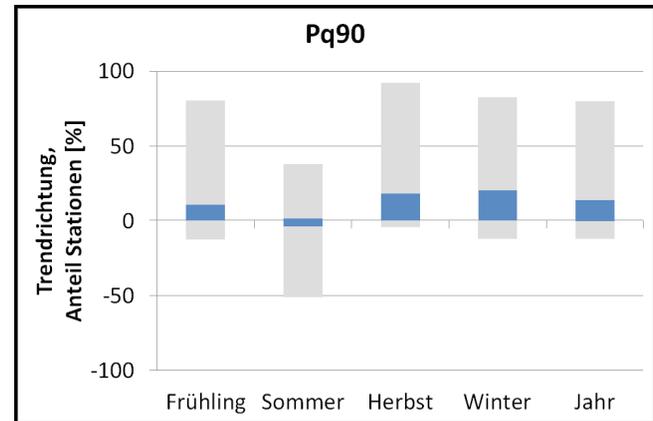
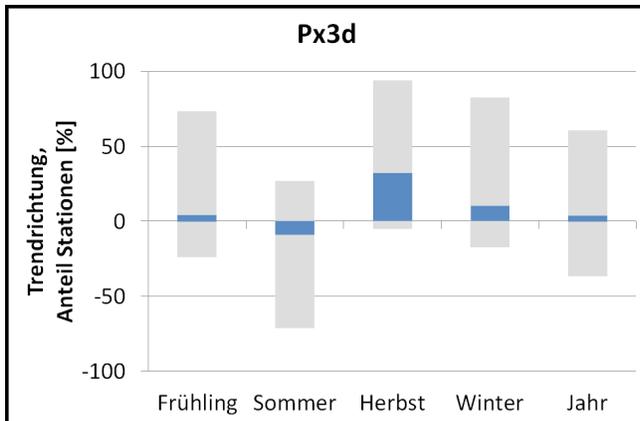
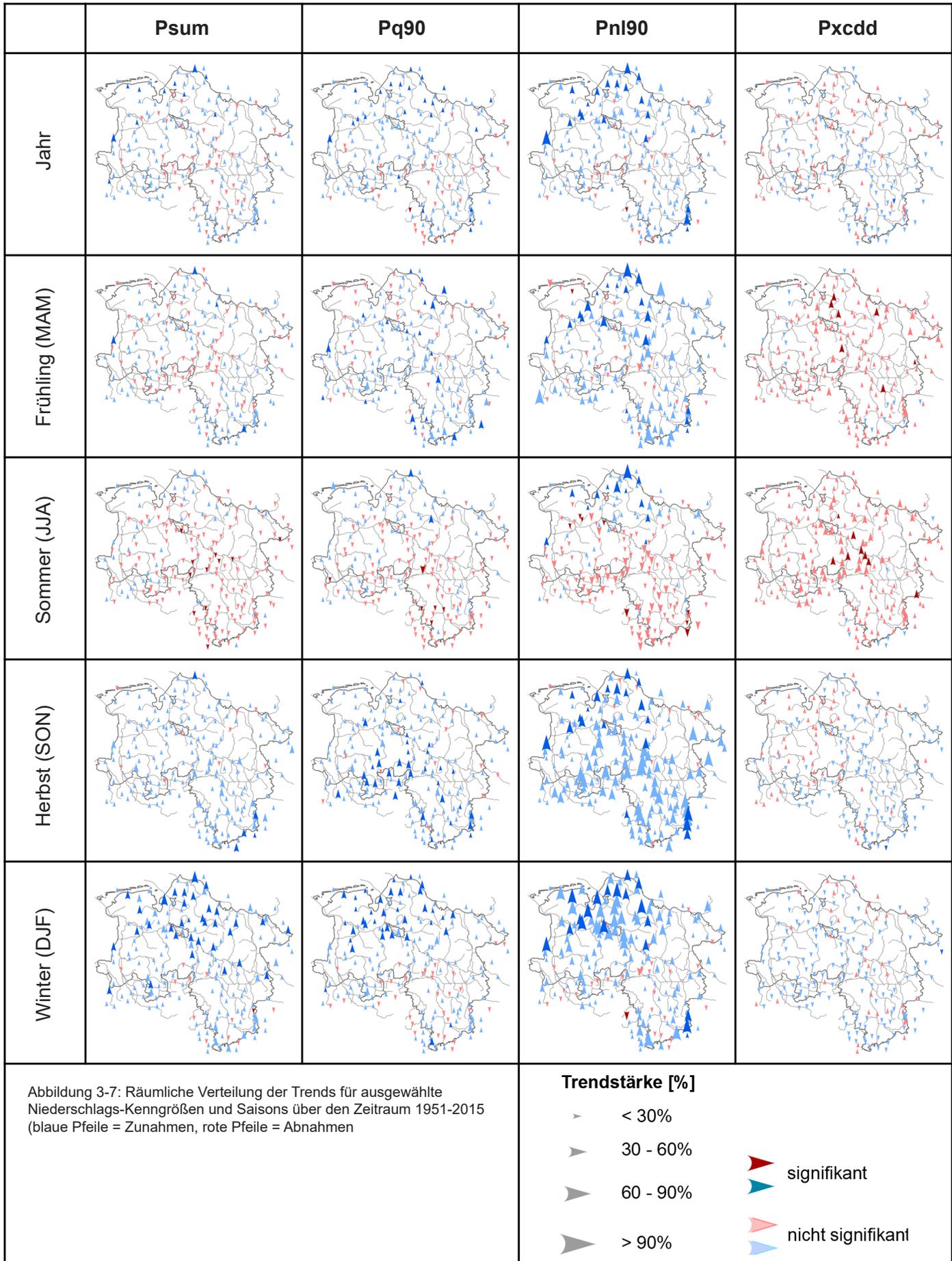


Abbildung 3-6: Richtung und Signifikanz der Trends der Niederschlags-Kenngrößen im Zeitraum 1951 bis 2015 (die Richtung der Balken kennzeichnet die Richtung des Trends; blaue Balken kennzeichnen den Anteil der signifikanten Trends)

Die räumlichen Muster der Entwicklung der Niederschlags-Kenngrößen fallen wesentlich heterogener aus als bei den Temperaturen (vgl. Abbildung 3-7). Die (signifikanten) Zunahmen der Niederschläge im Winter treten vor allem im nördlichen Niedersachsen in Erscheinung. Im Herbst und Frühling gibt es insgesamt nur schwache Muster, die je nach Kenngröße unterschiedlich ausfallen. Die Abnahmen der Niederschläge im Sommer sind tendenziell eher im zentralen und südlichen Niedersach-

sen zu finden. Ähnliches gilt auch für die Zunahme der maximalen Trockenphasen (Pxcd), die nur in den Sommermonaten räumliche Schwerpunkte aufweisen. Die Häufigkeit von Ereignissen mit größeren Niederschlagsmengen (Pnl90) hat vor allem im nördlichen Niedersachsen und, außer im Sommer, auch vereinzelt im Bereich der Mittelgebirgsausläufer (signifikant) zugenommen.





3.1.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lassen sich für die Temperatur-Kenngrößen im Zeitraum 1951 bis 2015 folgende wesentliche Tendenzen erkennen:

- Die Temperaturen nahmen über alle Kenngrößen und Saisons grundsätzlich zu.
- Die Zunahmen sind bis auf den Herbst fast durchweg signifikant.
- Im Jahresdurchschnitt betrug die Zunahme der mittleren Temperaturen $+1,6^{\circ}\text{C}$.
- Die geringsten Zunahmen gab es bei allen Kenngrößen im Herbst (zwischen $+0,6$ und $+0,7^{\circ}\text{C}$).
- Die größten Zunahmen gab es bei den Höchsttemperaturen im Sommer ($+2,9^{\circ}\text{C}$).
- Räumliche Muster sind kaum zu erkennen. Je nach Kenngröße bzw. Saison sind leichte Schwerpunkte im nördlichen Niedersachsen auszumachen.

Bei den Niederschlags-Kenngrößen können folgende Tendenzen zusammengefasst werden:

- Im Jahresdurchschnitt nahmen die Niederschlagsmengen leicht zu, wobei die größten (z.T. signifikanten) Zunahmen im Herbst und Winter stattfanden, leichte (nicht signifikante) Abnahmen dagegen im Sommer.
- Trockenphasen haben vor allem im Frühling und Sommer zugenommen, jedoch nicht signifikant.
- Die Häufigkeit von großen Ereignissen und deren Niederschlagsmenge hat vor allem im Herbst bzw. etwas schwächer auch im Winter zugenommen.
- Räumliche Schwerpunkte der Zunahmen waren vor allem die Winterniederschläge im Norden sowie die maximalen sommerlichen Trockenphasen in der Mitte Niedersachsens.

3.2 Regionalisierung von Klimadaten

Für die Betrachtung der im Zeitraum 1950 – 2015 beobachteten klimatischen Verhältnisse (Absolutwerte) sowie deren Nutzung für die Klimafolgenmodellierung erfolgte eine Regionalisierung der beobachteten Klimadaten. Für die Übertragung der punktuell an Stationen vorliegenden Klimadaten in die Fläche wurden verschiedene Interpolationsverfahren untersucht. Für eine detaillierte Beschreibung wird auf den Bericht zur Regionalisierung von Klimabeobachtungsdaten verwiesen (Haberlandt et al., 2015).

3.2.1 Datenbasis

Insgesamt standen Zeitreihen von maximal 924 Niederschlagsstationen und 165 Klimastationen in Niedersachsen und benachbarten Bundesländern für den Zeitraum von 1950 bis 2015 auf Tageswertbasis zur Verfügung (vgl. Abbildung 3-8).

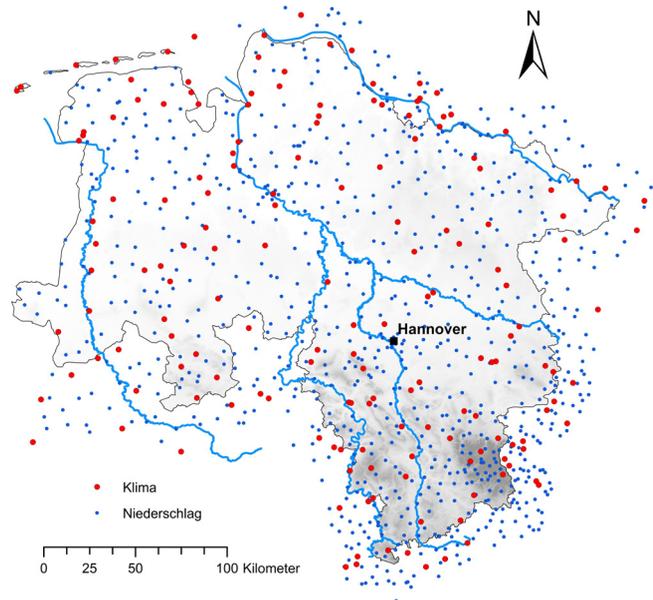


Abbildung 3-8: Lage der verfügbaren Niederschlags- und Klimastationen

Die Niederschläge wurden vor der Interpolation entsprechend ihrer systematischen Messfehler nach Richter (1995) korrigiert. Es wurden für folgende Klimavariablen interpolierte Raster mit einer räumlichen Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}$ bereitgestellt:

- korrigierte Niederschlagshöhe in mm (pcp),
- unkorrigierte Niederschlagshöhe in mm (pcu),
- Temperaturmittel in $^{\circ}\text{C}$ (tav),
- Temperaturminimum in $^{\circ}\text{C}$ (tmi),
- Temperaturmaximum in $^{\circ}\text{C}$ (tma),
- Windgeschwindigkeit in m/s (win),
- relative Luftfeuchte in % (hum),
- Sonnenscheindauer in h (sun),
- Globalstrahlung in W/m^2 (glo).



3.2.2 Methodik

Es wurden verschiedene Interpolationsverfahren verglichen und im Anschluss das jeweils am besten geeignete Verfahren ausgewählt. Dabei kamen folgende Verfahren zum Einsatz:

- Thiessen-Polygon / Nächster Nachbar (NN),
- Inverse Distanz / Quadrantenverfahren (INVD),
- Ordinary Kriging (OK),
- Kriging mit externer Drift (EDK).

In den vorangegangenen Phasen des KliBiW-Projekts erfolgte die Regionalisierung der Klimadaten von Januar 1950 bis November 2011 (NLWKN, 2012 und NWLKN, 2015). In der aktuellen Phase wurden die Zeitreihen bis 2015 erweitert. Ziel war die Verwendung gleicher Interpolationsverfahren. Im Zuge dessen wurden die gleichen Variogrammparameter verwendet, welche für die jeweilige Klimavariablen bereits für den ursprünglichen Zeitraum zur Anwendung kamen. Im Anschluss an die Interpolation wurden Plausibilitätstests in Form von Scatterplots für ausgewählte Stationen durchgeführt. Dabei wurden die an der jeweiligen Station beobachteten Klimadaten mit denen der entsprechenden Rasterzelle aus der Interpolation verglichen.

3.2.3 Ergebnisse

Für die Temperaturgrößen sowie die relative Luftfeuchte war EDK unter Verwendung eines digitalen Höhenmodells als Zusatzvariable am besten geeignet. Das Digitale Geländemodell musste in der gleichen räumlichen Auflösung wie das Interpolationsraster vorliegen, d.h. eine Auflösung von 1 x 1 km aufweisen. Für die Niederschlagsgrößen sowie die Windgeschwindigkeit und die Sonnenscheindauer wurde OK ausgewählt. Die Globalstrahlung wurde mittels einer Übertragungsfunktion aus der Sonnenscheindauer bestimmt (DVWK, 1996 und Angström, 1924).

Für den Zeitraum von Januar 1950 bis Dezember 2015 sind die mittleren Klimaverhältnisse der beobachteten Klimadaten in Abbildung 3-9 dargestellt.

Die mittlere, nach Richter (1995) korrigierte Jahresniederschlagshöhe weist einen Wertebereich von etwa 640 bis 1590 mm auf. Der Mittelwert beträgt etwa 830 mm. Die Hälfte der Fläche Niedersachsens liegt in der Spannweite zwischen etwa 780 und 870 mm. Die höchsten Jahresniederschläge wurden im Harz beobachtet und die niedrigsten an der östlichen Grenze zu den benachbarten Bundesländern. Ohne Berücksichtigung der Harzregion und des Weser-Leine-Berglandes ist ein Gradient zu beobachten mit hohen Jahresniederschlagshöhen im Nord-Westen und geringen im Osten Niedersachsens.

Die mittlere unkorrigierte Jahresniederschlagshöhe ist erwartungsgemäß um ca. 10% geringer als die korrigierte Jahresniederschlagshöhe. Der Wertebereich erstreckt sich von etwa 580 bis 1420 mm, wobei die Hälfte Niedersachsens in der Spannweite von etwa 700 bis 790 mm liegt. Der Mittelwert beträgt etwa 750 mm. Die räumlichen Muster sind dabei unverändert.

Die mittlere Tagesmitteltemperatur weist einen Wertebereich von etwa 4,3°C in der Harz-Region und etwa 9,7°C im Nord-Westen Niedersachsens auf. Weitere Temperatursenken sind der Bereich um die Lüneburger Heide und das Weser-Leine-Bergland. Etwa die Hälfte der Fläche Niedersachsens liegt im Bereich zwischen 8,9 und 9,3°C mit einem Mittelwert von etwa 9,0°C.

Die mittlere Tagesminimumtemperatur liegt im Bereich von etwa 1,6°C im Harz bis 7,0°C an den Küstengebieten und der Grenze zu den Niederlanden. Im Bereich der Lüneburger Heide und des Weser-Leine-Berglands kann eine Senke beobachtet werden. Die Hälfte der Fläche Niedersachsens liegt im Bereich von etwa 5,0 bis 5,6°C mit einem Mittelwert um 5,3°C.

Die mittlere Tagesmaximumtemperatur liegt im Bereich zwischen 7,5°C im Harz und 13,8°C in der Mitte Niedersachsens. Der Einfluss der Küstennähe ist ebenfalls deutlich sichtbar. Die Hälfte der Fläche Niedersachsens liegt in der Spannweite von etwa 12,8 bis 13,3°C mit einem Mittelwert von 13,0°C.

Die mittlere tägliche Windgeschwindigkeit weist Werte von etwa 1,7 m/s im Süden Niedersachsens und 4,7 m/s an den Küstengebieten auf. Ein weiteres Minimum zeigt sich im Bereich der Lüneburger Heide. Etwa die Hälfte der niedersächsischen Landesfläche liegt im Bereich von 2,3 bis 2,6°C mit einem Mittelwert von 2,5°C.

Die mittlere tägliche relative Luftfeuchte zeigt Höchstwerte von etwa 86% im Harz und ein Minimum von etwa 77% im Bördeland nördlich des Harzes. Ebenso ist ein Nord-West zu Süd-Ost Gradient zu beobachten, mit Ausnahme des Weser-Leine-Berglands und der Harz-Region. Die Hälfte der Fläche Niedersachsens liegt in der Spannweite von 79 bis 81% mit einem Mittelwert von 80%.

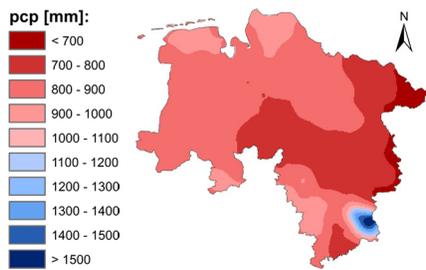
Die mittlere tägliche Sonnenscheindauer zeigt Minima von etwa 3,9 h in der Region des Weser-Leine-Berglands und im Bereich der oberen Hunte und Maxima von etwa 4,5 h sowohl an den Küstenbereichen im Nord-Westen als auch an den östlichen Bereichen nahe der Grenze zu Mecklenburg-Vorpommern. Die Hälfte der Fläche Niedersachsens liegt in der Spannweite von 4,0 bis 4,2 h mit einem Mittelwert von 4,1 h.



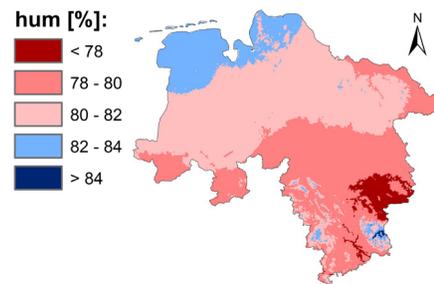
Bei der mittleren täglichen Globalstrahlung werden Werte zwischen etwa 103 und 109 W/m² erreicht. Die räumlichen Muster ähneln denen der Sonnenscheindauer stark. Dabei sind sowohl die Küstenbereiche im Nord-Westen als auch die östlichen Bereiche nahe der Grenze zu den benachbarten Bundesländern Sachsen-

Anhalt, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern mit hohen Werten der Globalstrahlung auffällig. Minima zeichnen sich im Weser-Leine-Bergland und in der Region der oberen Hunte ab. Die Hälfte des Landes Niedersachsen liegt im Bereich von 105 bis 107 W/m² mit einem Mittelwert von etwa 106 W/m².

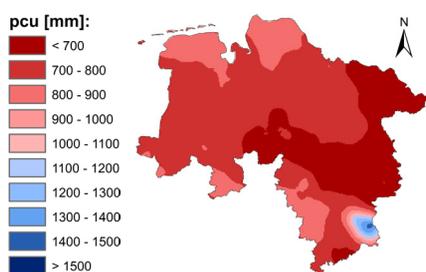
Korrigierte Niederschlagssumme



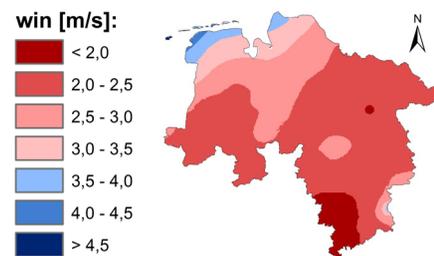
Luftfeuchte



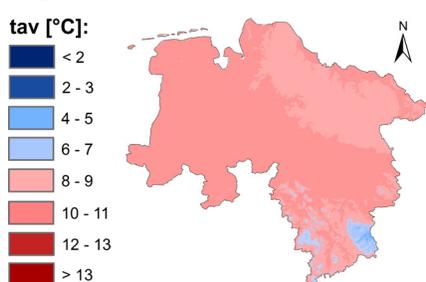
Unkorrigierte Niederschlagssumme



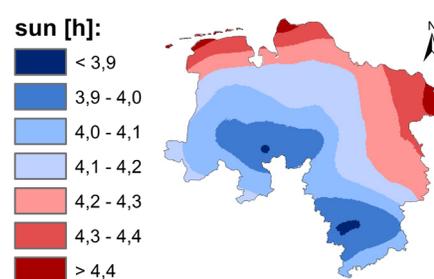
Windgeschwindigkeit



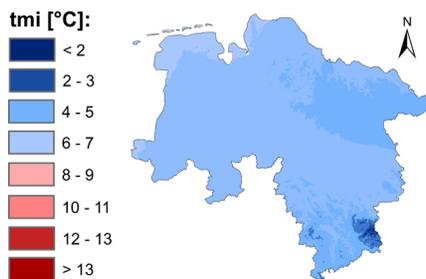
Tagesmitteltemperatur



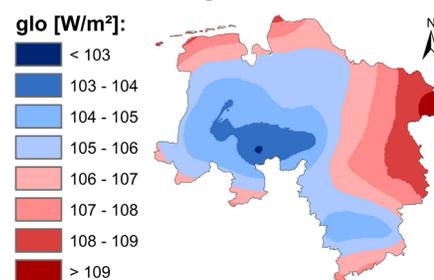
Sonnenscheindauer



Tagesminimumtemperatur



Globalstrahlung



Tagesmaximumtemperatur

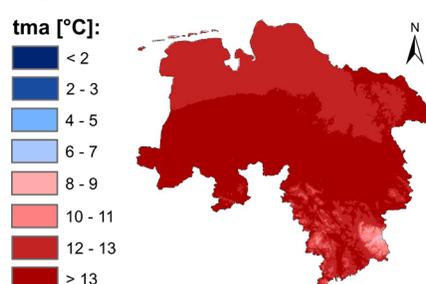


Abbildung 3-9: Mittel der interpolierten Klimavariablen für den Zeitraum 1950 bis 2015



4 Betrachtung der Abflussverhältnisse der Vergangenheit bis heute

4.1 Trendanalysen von Pegeldata

Die Betrachtungen der Entwicklung von Abfluss-Kenngrößen in der Vergangenheit bis in die Gegenwart geben Auskunft über die langfristige Dynamik in den Abflussverhältnissen. Sie geben möglicherweise auch Hinweise auf Anzeichen von Veränderungen, die auf den Einfluss des Klimawandels zurückgeführt werden können und für welche zukünftig Anpassungen entwickelt werden müssen. Entsprechende Analysen wurden bereits in den vorherigen Phasen von KliBiW für den Zeitraum 1951 bis 2005 bzw. 1966 bis 2005 durchgeführt (NLWKN, 2012; Fangmann et al., 2013). Im Zuge der aktuellen Projektphase wurden diese Methoden aufgegriffen und fortgeführt, um die Aussagen bzgl. der Entwicklungen zu aktualisieren.

4.1.1 Datenbasis

Insgesamt standen für den Untersuchungsraum von Niedersachsen 338 Pegel mit Abflussdaten zur Verfügung. Ein Großteil dieser Pegel wird vom NLWKN betrieben, einige weitere von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung sowie von der Harzwasserwerke GmbH. Wie bei den Analysen der Klimadaten sollten auch die Trendbetrachtungen der Abflüsse einerseits über einen möglichst langen Zeitraum reichen (Langzeittrends identifizieren) und gleichzeitig möglichst flächenhafte Aussagen für Niedersachsen ermöglichen. Aus diesen beiden Kriterien ergab sich ein Analysezeitraum von 1966 bis 2013, da für viele Pegel vor 1966 keine kontinuierlichen Messdaten vorlagen. Unter Berücksichtigung dieses Zeitraumes, dem Kriterium, dass die Pegeldata einen maximalen Fehlwertanteil von 5% pro Jahr bzw. Saison aufweisen dürfen und der Voraussetzung, dass die Pegel nicht unter erheblichem anthropogenen Einfluss stehen dürfen, standen letztlich 84 Pegel mit Tageswerten und 87 Pegel mit Monatsmaxima zur Verfügung, die Einzugsgebiete zwischen rund 40 (Pegel Negenborn am Forstbach) und 130.000 km² (Pegel Neu Darchau an der Elbe) umfassen (vgl. Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2).

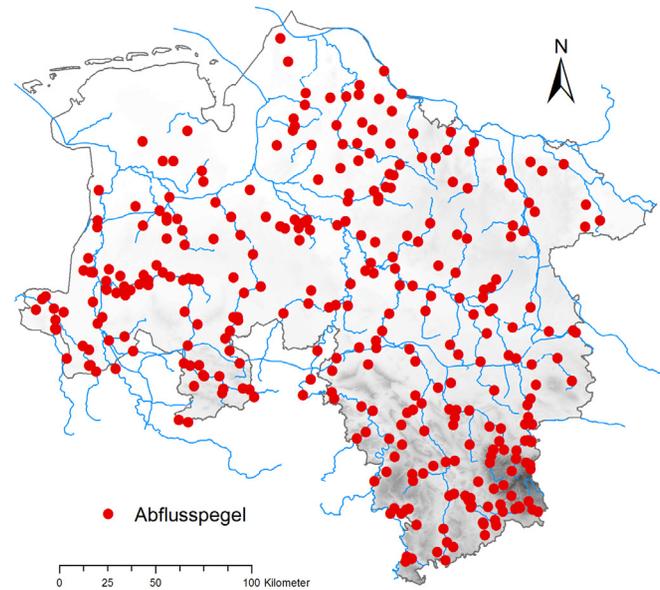


Abbildung 4-1: Untersuchungsgebiet mit allen verfügbaren Abflusspegeln

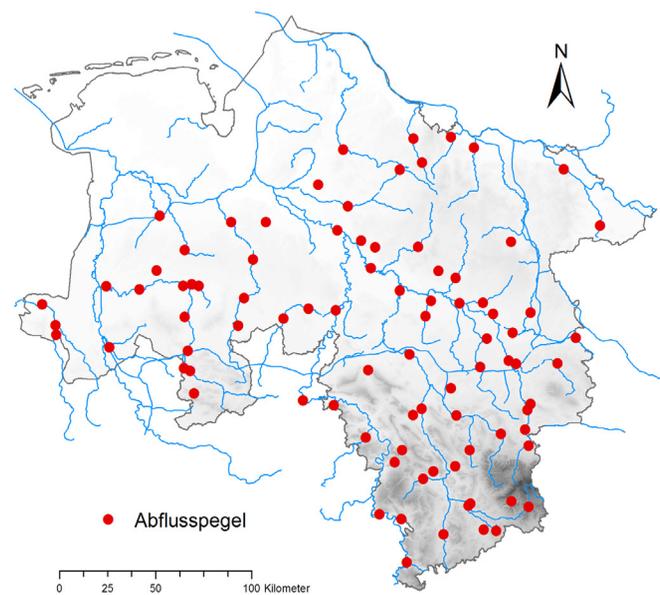


Abbildung 4-2: Untersuchungsgebiet mit den für die Analysen verwendeten Abflusspegeln



4.1.2 Methode

Die Analyse der Trends bei den Abflussverhältnissen erfolgte für ausgewählte Kenngrößen, die neben den mittleren auch die wasserwirtschaftlichen relevanten extremen Abflusssituationen charakterisieren (vgl. Tabelle 4-1). Wie bei den Analysen der beobachteten Klima-Kennwerte wurden die Trends der Abflüsse für das Gesamtjahr sowie für die vier Saisons Frühling, Sommer, Herbst und Winter anhand von jährlichen Serien ermittelt (vgl. Abbildung 4-3). Das Gesamtjahr umfasste in diesem Fall das wasserwirtschaftliche Jahr von Nov-

ember bis Oktober. Somit wurden die Reihen aus jeweils 48 Jahres- bzw. Saisonwerten gebildet. Die Schätzung der Stärke des Trends, also des Betrages und der Richtung der Veränderung, erfolgte wieder anhand des Verfahrens nach Theil (Theil, 1950) und Sen (Sen, 1968), wie in Kapitel 3.1 beschrieben. Ebenso wurde die Signifikanz der Trends an den Pegeln wieder über den Mann-Kendall-Test ermittelt (Kendall, 1975; Mann, 1945), der mit dem Verfahren des „pre-Whitening“ kombiniert wurde (Yue et al., 2002), um den Einfluss der Autokorrelation in den Datenreihen zu reduzieren.

Tabelle 4-1: Betrachtete Kenngrößen des Abflusses bei der Trendanalyse

Abflusskenngröße	Einheit	Beschreibung
HQ	m ³ /s	Maximaler Scheitelabfluss (pro Jahr bzw. Saison)
POT90	-	Anzahl der Tage mit einem Abflusswert größer als das 90%-Quantil der mittleren Tagesabflüsse
D90	d	Mittlere Dauer der Ereignisse mit einem Tageswert größer als das 90%-Quantil der mittleren Tagesabflüsse
MQ	m ³ /s	Mittlerer Tageswert der Abflüsse (pro Jahr bzw. Saison)

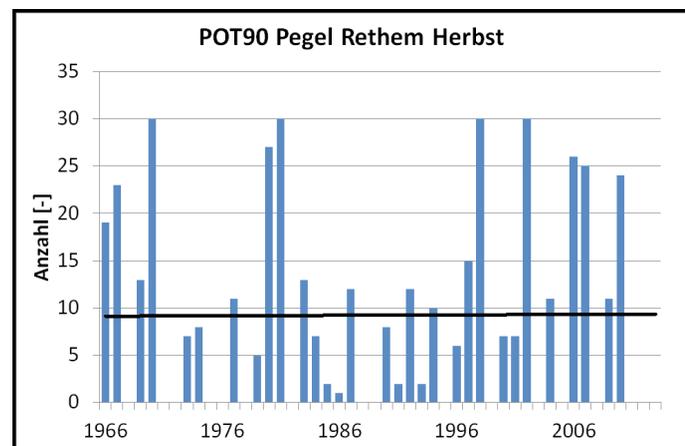
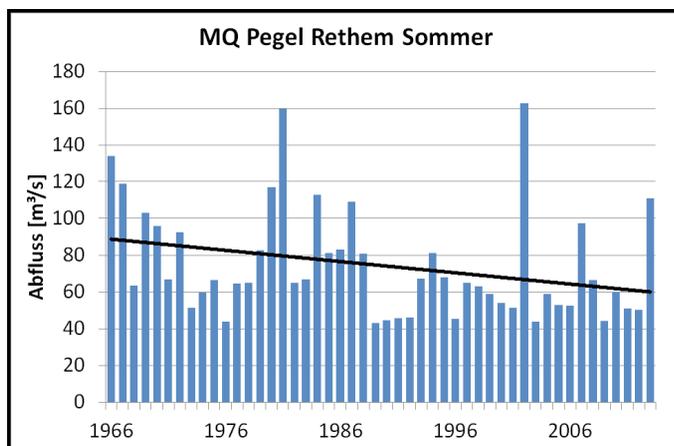


Abbildung 4-3: Mittlerer Abfluss am Pegel Rethem (Einzugsgebiet ~ 14.730 km²) im Sommer (links) und die Häufigkeit von größeren Abflussereignissen im Herbst (rechts); blaue Balken stellen die saisonale Abflussmenge bzw. Häufigkeit dar, die schwarze Gerade zeigt die geschätzte Trendgerade (im Sommer eine signifikante Abnahme, im Herbst eine schwach signifikante Zunahme)



4.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests zeigen, dass es bei der Entwicklung der Hochwasserscheitel (HQ) in den letzten rund 50 Jahren nur im Sommer relativ einheitliche, abnehmende Tendenzen gab, die an einigen Pegeln zusätzlich signifikant waren. Im Herbst und Winter gab es zwar tendenziell Zunahmen der Scheitelabflüsse, diese wiesen aber an praktisch keinem der Pegel eine Signifikanz auf. Die Häufigkeit von Ereignissen mit größeren Abflüssen (POT90) zeigt ebenso wie die Dauer von größeren Abflussereignissen (D90) nur im Sommer deutliche und z.T. signifikant abnehmende Entwicklungen. Der Frühling zeigt hier zwar ebenfalls Abnahmen, diese sind aber nicht signifikant. Im Herbst stieg die Dauer der Abflussereignisse häufig, aber nicht signifikant an den meisten Pegeln an. Die mittleren Abflüsse (MQ) zeigen im Sommer die einheitlichsten Abnahmen mit einem relativ hohen Anteil an Pegeln mit signifikantem Trend. Ähnlich sieht es im Frühling und Gesamtjahr aus, jedoch ohne nennenswerte Signifikanz. Alle Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests sind in Abbildung 4-4 dargestellt.

Die räumlich differenzierte Betrachtung der Trends in Abbildung 4-5 zeigt, dass die Zunahmen der Scheitelabflüsse (HQ) sich vor allem auf das südliche (Herbst und Winter) und teilweise nördliche Niedersachsen konzentrieren, während sie im zentralen Bereich in allen Saisons, vor allem aber im Sommer, eher abnehmen. Die Häufigkeit von größeren Abflussereignissen (POT90) hat im Sommer und Frühling fast flächendeckend abgenommen, im Sommer sogar häufig signifikant, während es im Herbst und Winter vor allem im südlichen Niedersachsen Anstiege und im Nordosten bzw. Nordwesten Abnahmen gegeben hat. Ähnliche Muster zeigen sich auch bei der Dauer von Ereignissen mit größeren Abflüssen (D90), wobei hier die Anstiege im Herbst / Winter fast flächenhaft auftreten und sich die (signifikanten) Abnahmen im Sommer auf die Mitte Niedersachsens konzentrieren. Die Trends der mittleren Abflüsse (MQ) sind nicht so stark ausgeprägt wie die der extremen Abfluss-Kenngrößen, mit Ausnahme der Abnahmen im Winter befinden sich vor allem im Nordosten.

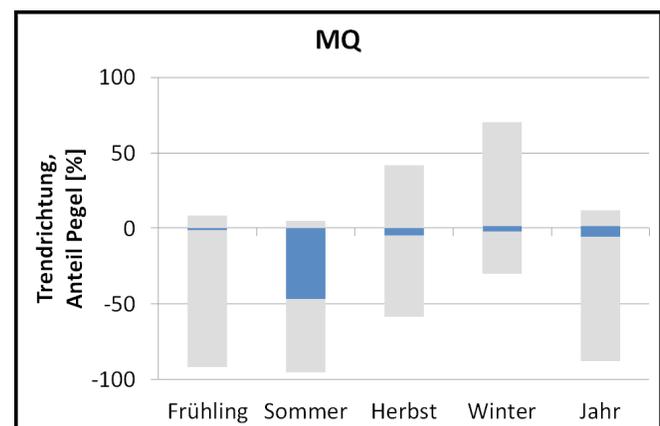
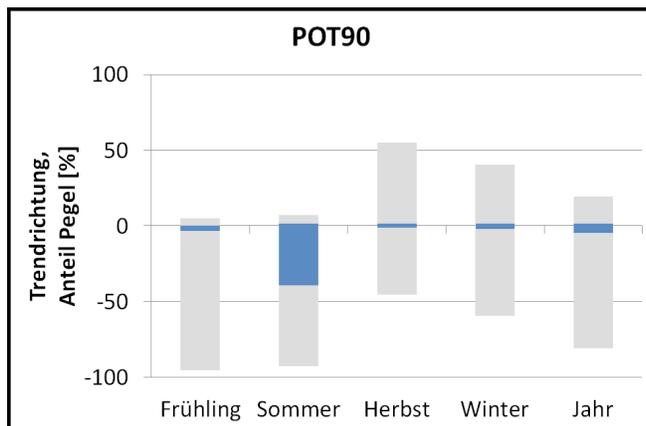
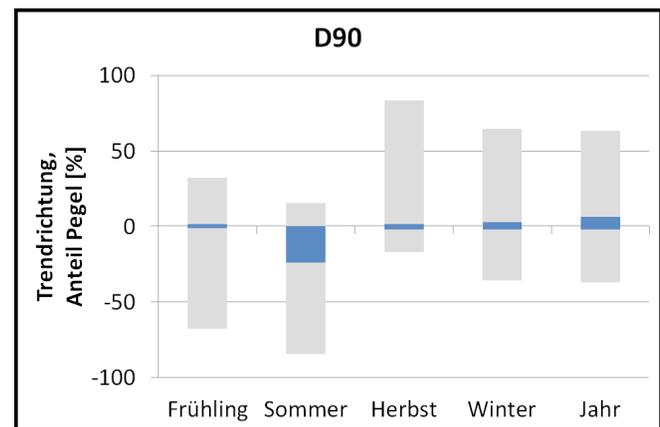
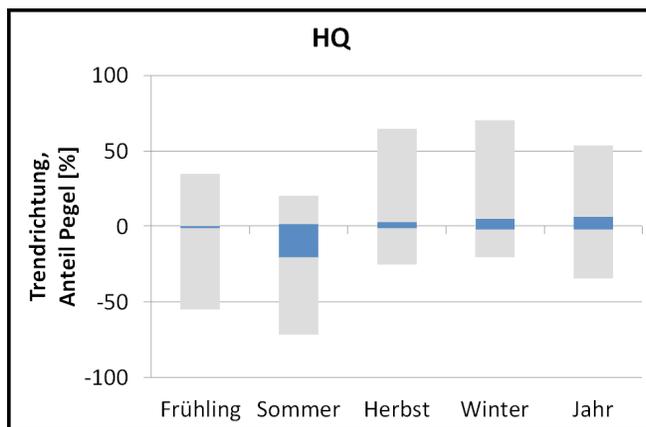
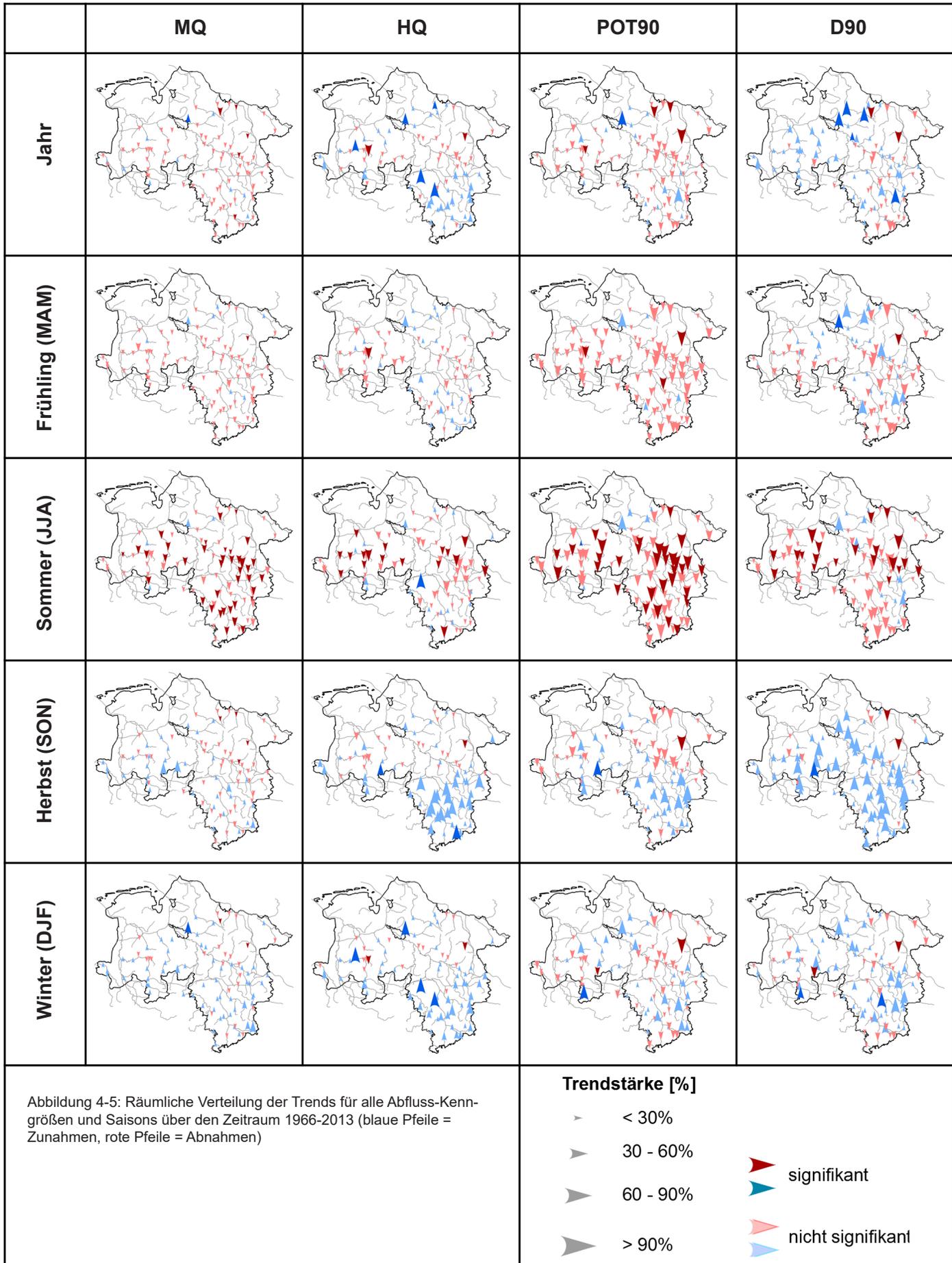


Abbildung 4-4: Richtung und Signifikanz der Trends der Abfluss-Kenngrößen im Zeitraum 1966 bis 2013 (die Richtung der Balken kennzeichnet die Richtung des Trends; blaue Balken kennzeichnen den Anteil der signifikanten Trends)





4.1.4 Zusammenfassung

Insgesamt haben die Trendanalysen verschiedener Abfluss-Kenngrößen für den Zeitraum 1966-2013 folgende Erkenntnisse gebracht:

- Flächenhaft deutliche Veränderungen, hier Abnahmen, hat es bei allen Kenngrößen nur während der Sommermonate gegeben; signifikant waren diese Entwicklungen vor allem in der Mitte Niedersachsens.
- Zunahmen der Scheitelabflüsse bzw. der Häufigkeit und Dauer von größeren Abfluss-Ereignissen hat es im Herbst und etwas schwächer im Winter gegeben; diese Entwicklungen, die vor allem im Süden Niedersachsens auftraten, sind aber nur in Einzelfällen signifikant.
- Die Veränderungen bei den extremen Kenngrößen sind stärker ausgeprägt als beim Mittelwasserabfluss.
- Die räumlichen Muster der Trends beim Abfluss im Sommer und Herbst haben großräumig betrachtet leichte Ähnlichkeiten mit den Strukturen der relevanten Niederschlags-Kenngrößen.

4.2 Regionalisierung von ausgewählten Hochwasser-Kennwerten

Innerhalb des Projekts KliBiW Phase 4 war die Übertragung von Kenntnissen der Hochwasserstatistik bekannter Pegel in unbeobachtete Regionen eingebunden. Ziel war eine robuste Bestimmung der Hochwasserstatistik für ganz Niedersachsen. Für die Regionalisierung der Hochwasser standen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Eine Übersicht mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen kann DWA M-552 (2012) entnommen werden.

4.2.1 Bisheriges Verfahren

Bislang kommt das Verfahren nach Elsholz & Berger (2003) zur Anwendung. Dieses gibt für geografisch zusammenhängende Regionen die Hochwasserabflussspendenkurven an. Durch Skalierung mit der Einzugsgebietsfläche können die angegebenen Hochwasserabflussspenden in Hochwasserdurchflüsse überführt werden. Die Nachteile des Verfahrens liegen darin, dass mit 55 Regionen innerhalb Niedersachsens eine vergleichsweise hohe Anzahl an Gebieten ausgewiesen wird. Einzelnen Regionen liegen nur ein oder zwei Pegel zugrunde (Bsp. Solling, Ith-Hils-Bergland, Wildeshauer Geest u. a.). Die Robustheit ist für derartige Regionen eingeschränkt. Ebenso fehlt eine Validierung des Verfahrens. Grundlage waren Abflussdaten bis einschließlich 2002. Da die Abflussdaten zu Beginn des Projektes KliBiW Phase 4 bis einschließlich 2013 vorlagen, konnte der Untersuchungszeitraum um

elf Jahre verlängert werden. Mit zunehmender Zeitreihenlänge reduziert sich die Unsicherheit der Schätzung der Hochwasserquantile. Aus diesen Gründen war eine Aktualisierung empfehlenswert.

4.2.2 Empfohlene Verfahren

Für übergeordnete Gewässer, in denen das Einzugsgebiet von einmündenden Nebenflüssen deutlich kleiner ist als das Einzugsgebiet des Hauptgewässers wird das Längsschnittverfahren empfohlen (DWA, 2012). Für meso-skalige Einzugsgebiete wird in DWA M-552 (2012) keine Vorzugsvariante empfohlen, da dies von der zugrundeliegenden Datenbasis, sprich der Pegelmessnetzdicke und der Länge der Abflusszeitreihen, sowie den hydrologischen Gegebenheiten des Untersuchungsgebiets abhängig ist (DWA, 2012). Meso-skalige Einzugsgebiete beschreiben nach Dyck & Peschke (1995) Gebiete mit einer Größe zwischen 1 ha und 1000 km² wobei der Schwerpunkt zwischen 1 und mehreren 100 km² liegt. Das Index-Flood Verfahren mit statischen Regionen, im weiteren Verlauf nur Index-Flood genannt, ist ein weit verbreitetes Verfahren. Es wird bereits in zahlreichen Regionen u. a. in den Bundesländern Thüringen und Sachsen angewandt (TLUG, 2014 oder Walther et al., 2012). Es ist zudem konform nach DWA M-552 (2012), objektiv und nachvollziehbar und ermöglicht eine möglichst gute Informationsausschöpfung, da auch kürzere Zeitreihen Verwendung finden können. Es weist eine Kontinuität in den Schätzungen unterschiedlicher Jährlichkeit auf und ermöglicht eine automatisierbare und praktikable Handhabung. Zudem erlaubt die räumliche Informationserweiterung mittels Index-Flood nicht nur Schätzungen an unbeobachteten Standorten, sondern auch robustere Schätzungen an Standorten mit Beobachtungsreihen, sofern die gesuchte Jährlichkeit größer als das Doppelte des Stichprobenumfangs ist (DWA, 2012). Durch den Methodenvergleich konnten die Güten der jeweiligen Regionalisierungsmethoden verglichen werden. Dabei zeigte das Index-Flood Verfahren eine gute Qualität. Aufgrund dessen und der genannten Vorteile wurde das Index-Flood Verfahren als Vorzugsvariante für meso-skalige Einzugsgebiete ausgewählt.

4.2.3 Datengrundlage

Insgesamt standen für 338 Pegel Abflussdaten in Form von Monatsscheitelwerten und Tagesmittelwerten zur Verfügung. Die Jahreshochwasser wurden auf Basis der Scheitelwerte bestimmt. Die Tagesmittelwerte dienten im Zuge der Hochwasserregionalisierung nur der Plausibilisierung der extrahierten Jahreshochwasser auf Basis der Monatsscheitel. Die Zeiträume aller verfügbaren Jahreshochwasser lagen im Bereich der hydrologischen Jahre von 1886 bis 2014, wobei das Jahr 2014 unvollständig war.



Für übergeordnete Gewässer wurden alle verfügbaren Pegel entlang des Hauptflusses innerhalb des jeweiligen Gewässers berücksichtigt. Für meso-skalige Einzugsgebiete stellt sich die Situation differenzierter dar. Da die Güte der Hochwasserregionalisierungsmethoden von der Datenbasis abhängig ist, stellt sich die Frage nach der Stationsauswahl. Ziel war eine maximale Informationsausschöpfung bei gleichzeitig hoher Qualität der Eingangsdaten. Um diesem Spannungsfeld gerecht zu werden, wurden drei verschiedene Stationsauswahlen berücksichtigt. Dabei wurden jeweils verschiedene Anforderungen kombiniert (s. Tabelle 4-2). Insgesamt lagen für 338 Pegel Abflussdaten in Form von Monatsscheitelwerten vor. 323 dieser 338 Pegel wiesen einen minimalen Stichprobenumfang von 10 Jahren auf (Walther et al., 2012 oder Gattermayr, 2011). Einige der Regionalisierungsansätze bedurften zusätzlicher Informationen in Form von Gebietscharakteristiken. Diese waren für 305 von 338 Pegeln vollständig verfügbar. Für übergreifende Gewässer ist das Längsschnittverfahren empfohlen (DWA, 2012). Der Methodenvergleich erfolgt demnach für meso-skalige Einzugsgebiete in denen keine oder nur wenige oberstromige Pegel verfügbar sind. 258 von 338 Pegeln wiesen maximal zwei oberstromige Pegel auf. Einige Pegel wurden im Hochwasserfall teilweise umströmt, wurden anthropogen gesteuert oder wiesen andere individuelle Beeinträchtigungen auf. Dieses Verhalten war zum einen schwierig in der Regionalisierung zu berücksichtigen und bot zudem keinen Mehrwert, da es individuell für den jeweiligen Pegel galt und dieser nicht repräsentativ war. Die Beeinflussung war entweder zu quantifizieren oder der Pegel nicht zu verwenden (DWA, 2012). 283

von 338 Pegeln konnten aufgrund der mit den Projektpartnern abgestimmten Pegelkenntnis einen Mehrwert für die Regionalisierung darstellen. Dabei wurde die Verwendbarkeit der Pegel für hochwasserrelevante Untersuchungen diskutiert. Es kamen insbesondere bekannte, lokale Besonderheiten zum Tragen wie beispielsweise eine Beeinflussung durch relativ nah gelegene, oberstromige Rückhaltebecken oder Talsperren, anthropogene Steuerung durch bewegliche Wehre oder Überleitungen mit benachbarten Gewässern und großflächige Ausuferungen oder Umläufigkeiten. Die Homogenität der Pegel wurde mittels einer Doppelsummenanalyse zwischen Jahreshochwasserabflüssen und Jahresmittelwasserabflüssen eines Pegels durchgeführt und visuell beurteilt. 329 von 338 Pegeln erfüllten die Anforderung der Homogenität. Einzelne Regionalisierungsmethoden wiesen Pegel, die besonders auffällig und einzigartig in ihrer statistischen Eigenschaft waren, als diskordant aus. Dieses Kriterium beruhte auf den Ergebnissen der Stationswahl mit den geringen Anforderungen, da dieses jene Kennzeichnung der Diskordanz vorgab. 182 von 338 Pegeln wurden nie als diskordant eingestuft. Ein weiteres Kriterium war die vertretbare hydrologische Komplexität. Dafür wurde für möglichst viele Pegel das Niederschlags-Abfluss-Modell HBV-IWW aufgebaut und entsprechend der Ganglinie mittels der Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970) kalibriert. Sofern die Modellgüte einen NSE der Ganglinie von mindestens 0,5 und einen NSE der logarithmierten Ganglinie von ebenfalls 0,5 aufwies, wurde das hydrologische Verhalten als vertretbar deklariert. 133 von 338 Pegeln erfüllten diese Anforderungen.

Tabelle 4-2: Kriterien für die Stationswahlen mit niedrigen, mittleren und hohen Anforderungen sowie zur Bestimmung der Referenzpegel für den Vergleich von lokaler und regionaler Hochwasserstatistik

Auswahlkriterium	Σ Pegel	Geringe Anf.	Mittlere Anf.	Hohe Anf.	Referenz-pegel
Jahreshochwasser verfügbar	338	✓	✓	✓	✓
Reihenlänge HQa ≥ 10	323	✓	✓	✓	✓
Vollständig verfügbare Gebietseigenschaften	305	✓	✓	✓	✓
Kein Längsschnitt (max. 2 oberstromige Pegel)	258	✓	✓	✓	✓
Pegelkenntnis	283		✓	✓	✓
Homogenität (Doppelsummenanalyse ΣHQa vs. ΣMQa)	329		✓	✓	✓
Diskordanz	182		✓	✓	✓
Vertretbare hydrologische Komplexität (Güte N-A-Modell)	133			✓	✓
Reihenlänge HQa ≥ 30	206				✓
Σ ausgewählte Pegel		216	157	88	65



Durch eine Kombination der Anforderungen konnte zum einen eine Stationsauswahl mit geringen Anforderungen an die Stationen getroffen werden, um möglichst den komplett verfügbaren Informationsgehalt unabhängig von der Qualität der Daten auszuschöpfen. Hierbei wurden 216 von 338 Pegeln ausgewählt. Zum anderen konnte eine Stationsauswahl mit hohen Anforderungen an die Stationen getroffen werden, um möglichst nur qualitativ hochwertige Datensätze unabhängig vom komplett verfügbaren Informationsgehalt zu verwenden. Hierbei wurden 88 von 338 Pegeln ausgewählt. Diese beiden Stationswahlen bezeichnen die Extrema. Zusätzlich wurde eine Stationswahl mit mittleren Anforderungen an die Stationen untersucht, wobei die ma-

ximale Informationsausschöpfung und die Qualität der Eingangsdaten abgewogen wurde. Hierbei wurden 157 von 338 Pegeln ausgewählt. Diese Stationswahl mit mittleren Anforderungen wurde final ausgewählt.

Die verfügbaren Zeiträume der Jahreshochwasser der ausgewählten Pegel lagen im Zeitraum der hydrologischen Jahre von 1926 bis 2014, wobei 2014 unvollständig war. Im Mittel waren etwa 36 Jahre an beobachteten Jahreshochwassern für die ausgewählten Pegel verfügbar. Die ausgewählten Stationen wiesen eine gute räumliche Verteilung innerhalb Niedersachsens auf (vgl. Abbildung 4-6).

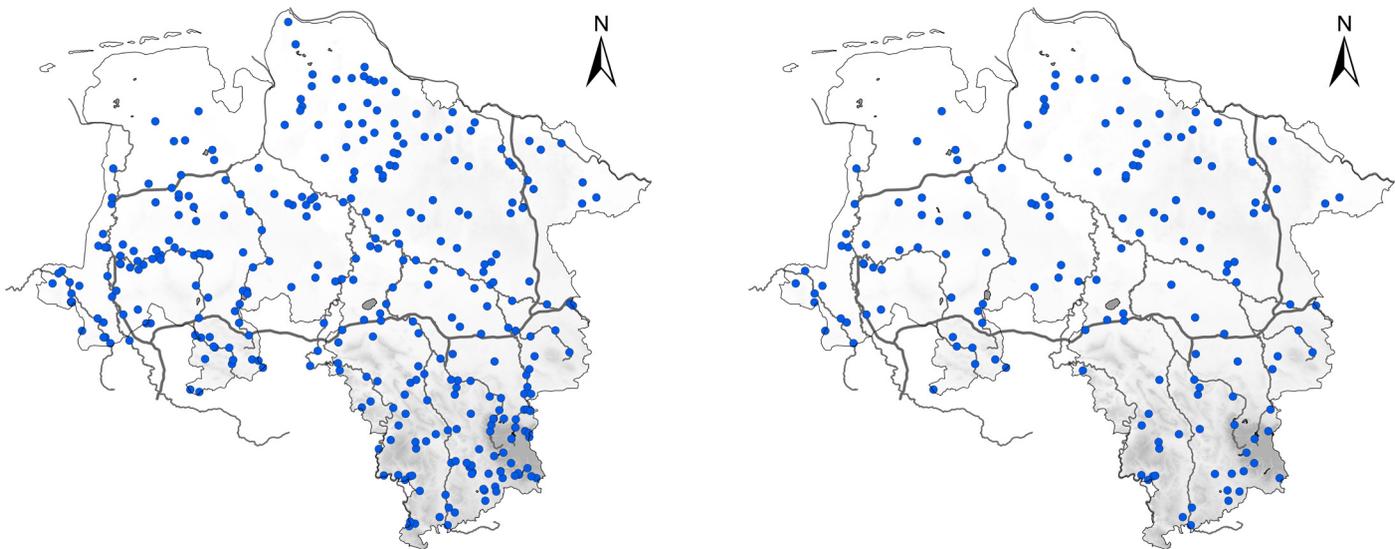


Abbildung 4-6: Räumliche Verteilung der 338 verfügbaren Pegel (links) und der auf Basis von mittleren Anforderungskriterien für die Hochwasserregionalisierung ausgewählten 157 Pegel (rechts)



4.2.4 Allgemeine Methodik

Hochwasserstatistik:

Die Schätzung von Hochwasserquantilen ist abhängig von der gewählten Verteilungsfunktion und dem gewählten Parameterschätzverfahren. Eine Zusammenfassung dazu kann der DWA M-552 (2012) entnommen werden. Innerhalb dieses Projekts wurde folgendes Vorgehen abgestimmt.

In einem ersten Schritt wurden aus den gegebenen monatlichen Abflussscheitelwerten die Jahreshochwasser (HQa) extrahiert. In einem zweiten Schritt wurden auf Basis der Jahreshochwasser die L-Momente berechnet. Diese haben den Vorteil weniger sensitiv auf Ausreißer zu reagieren. In einem dritten Schritt wurde die Verteilungsfunktion entsprechend dem Stichprobenumfang der Jahreshochwasser bestimmt. Dabei wurde für Pegel mit einer Reihenlänge von mindestens 50 Jahren die Allgemeine Extremwertverteilung (GEV) ausgewählt. Auch in einer Studie in Sachsen wurde die GEV in diesem Zusammenhang benutzt (Walther et al., 2012). Für Pegel mit einer Reihenlänge unter 50 Jahren wurde die Gumbelverteilung (GUMBEL) ausgewählt. Im Anschluss daran wurden auf Basis der L-Momente die Parameter der ausgewählten Verteilungsfunktion angepasst. Mittels der inversen Verteilungsfunktion konnten dann die Hochwasserquantile geschätzt werden.

Validierung:

Die Güte der Regionalisierungsmethoden wurde mittels Gütekriterien bestimmt (Formel 4-1 bis Formel 4-3). Das Optimum des Coefficient-Of-Determination (COD) liegt bei 1. Die Gleichung entspricht der bekannten Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970). Die Optima des mittleren relativen Fehlers (MRE) und des relativen root mean squared error (RRMSE) liegen bei 0.

$$COD = 1 - \frac{\sum(X - \hat{X})^2}{\sum(X - \bar{X})^2} \quad \text{Formel 4-1}$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{(X - \hat{X})}{X} \right| \quad \text{Formel 4-2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{(X - \hat{X})}{X} \right)^2} \quad \text{Formel 4-3}$$

X ... Beobachtung

\hat{X} ... Schätzung oder Simulation

\bar{X} ... Mittelwert der Beobachtung

n ... Stichprobenumfang

Als Referenz für den Vergleich von Beobachtung und Regionalisierung dienten stets die lokal an den jeweiligen Pegeln geschätzten Hochwasserquantile. Je kür-

zer die Reihenlänge, desto größer ist die Unsicherheit der geschätzten Hochwasserquantile. Je länger die Zeitreihen, desto geeigneter ist die lokale Schätzung für den Vergleich mit den Regionalisierungsmethoden. Pegel mit einer Reihenlänge von mindestens 30 Jahren wurden als Referenzpegel deklariert. Eine Studie in Mecklenburg-Vorpommern weist ebenfalls Pegel mit Beobachtungsreihen länger als 30 Jahre als repräsentativ aus (Haupt, 2000). Die Validierung der Methoden erfolgte basierend auf den Referenzpegeln. Insgesamt standen 65 Referenzpegel zur Verfügung (s. Tabelle 4-2).

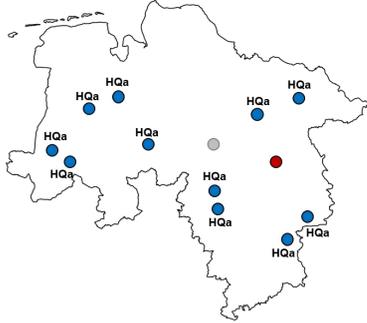
Alle Methoden wurden mittels einer Kreuzvalidierung verglichen. In einem ersten Schritt wurde dafür ein einzelner Pegel aus der Stichprobe entfernt. In einem zweiten Schritt erfolgte die Anwendung des Verfahrens als Regionalisierungsverfahren zur Schätzung des gesuchten Wertes an dem einzelnen entfernten Pegel. Dieser Vorgang wiederholte sich iterativ, so dass alle Pegel jeweils einmal nicht Bestandteil des Verfahrens waren, in welchem ihr jeweiliger Wert geschätzt wurde. Im Anschluss daran lagen Beobachtung und Regionalisierung auf Basis der Kreuzvalidierung für jeden Pegel vor.

4.2.5 Das Index-Flood Verfahren

Das ausgewählte Index-Flood-Verfahren beruht in großen Teilen auf Hosking & Wallis (1997), wobei die Grundlagen bereits von Dalrymple (1960) gelegt wurden. Das Prinzip dabei ist, dass die Pegel in Regionen eingeteilt werden, in denen ein homogenes Hochwasserregime vorliegt. Dies bedeutet, dass sich die Pegel einer hochwasserhomogenen Region nicht in der Form der Verteilungsfunktion unterscheiden, sondern nur eine unterschiedliche starke Ausprägung aufweisen. Dieser unterschiedlich starken Ausprägung wird mittels einer Skalierung Rechnung getragen. Das mittlere jährliche Hochwasser (MHQ) ist in der Praxis ein oft verwendeter Skalierungsparameter (Index-Flood). Die Grundlage hierbei ist, dass sich das mittlere jährliche Hochwasser relativ robust im Raum übertragen lässt. Innerhalb der ausgewiesenen homogenen Regionen werden regional gültige Verteilungsfunktionen mittels der L-Momenten-Methode angepasst, die eine Übertragung der Hochwasserdurchflüsse gegebener Jährlichkeiten im Raum im weiteren Verlauf ermöglichen. Weitere Vorteile des Index-Flood-Verfahrens sind die Ausweisung von nicht zwangsläufig geografisch zusammenhängenden Regionen und die Vergrößerung des Stichprobenumfangs durch die regionale Verteilungsfunktion. Damit wird die Unsicherheit, resultierend aus dem Stichprobenumfang, geringer. Es beinhaltet somit auch einen Mehrwert für die Schätzung von Hochwasserdurchflüssen gesuchter Jährlichkeiten an beobachteten Standorten. Eine an Hosking & Wallis (1997) angelehnte Schrittfolge kann Abbildung 4-7 entnommen werden.

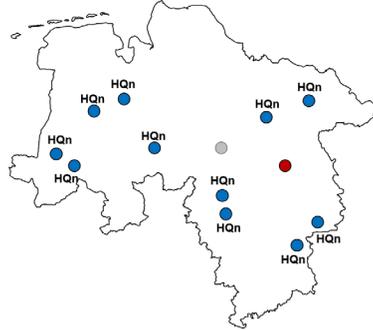


Schritt 1:



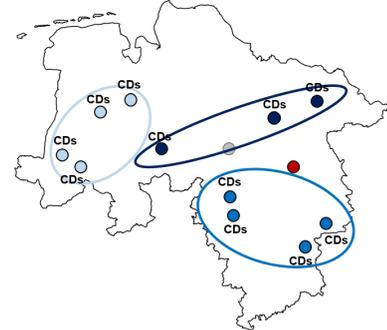
Pegelauswahl und Datenprüfung der Jahreshochwasser (HQ_a)

Schritt 2:



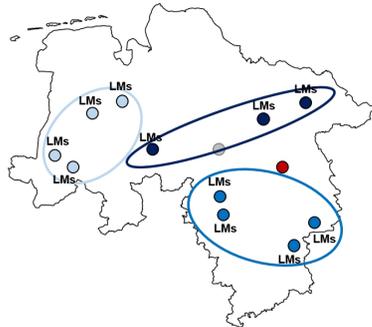
Skalierung der Jahreshochwasser (HQ_a) mittels mittlerem Jahreshochwasser (MHQ) zu normierten Jahreshochwassern (HQ_n)

Schritt 3:



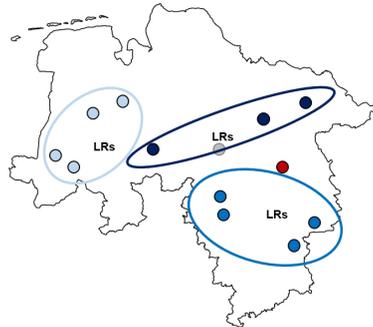
Identifikation homogener Regionen mittels Gebietscharakteristiken (CDs)

Schritt 4:



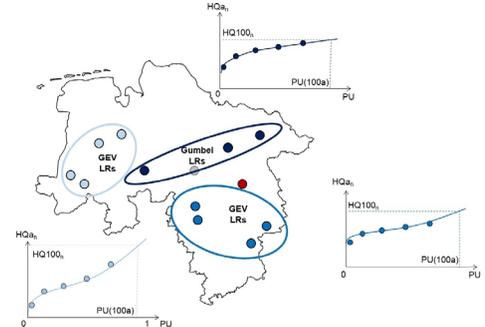
Schätzung lokaler L-Momente (LMs) auf Basis der normierten Jahreshochwasser (HQ_n)

Schritt 5:



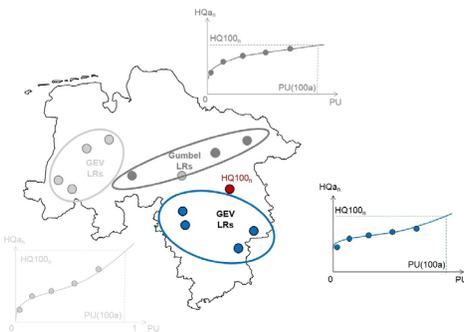
Schätzung regionaler L-Momente (LRs) durch Wichtung der lokalen L-Momente (LMs) entsprechend der jeweiligen Reihenlänge

Schritt 6:



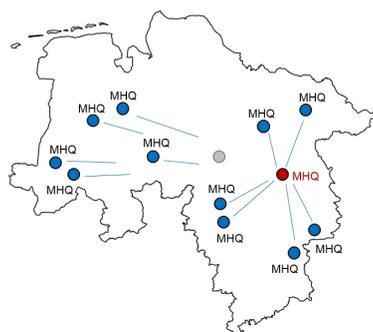
Auswahl und Anpassung regionaler Verteilungsfunktion auf Basis regionaler L-Momente (LRs)

Schritt 7:



Zuordnung eines unbeobachteten Standortes mittels Gebietscharakteristiken (CDs) zu bestehender Region und Schätzen des normierten Hochwasserquantils der gesuchten Jährlichkeit ($HQ_n(T)$)

Schritt 8:



Schätzen des mittleren Jahreshochwassers für unbeobachteten Standort mittels Regionalisierung (MHQ)

Schritt 9:



Rückskalierung des geschätzten, normierten Hochwasserquantils der gesuchten Jährlichkeit ($HQ_n(T)$) mittels geschätztem mittleren Jahreshochwasser (MHQ) zu geschätztem Hochwasserquantil der gesuchten Jährlichkeit ($HQ(T)$)

Abbildung 4-7: Index-Flood Schrittfolge modifiziert nach Hosking & Wallis (1997)



In einem ersten Schritt erfolgen die Datenprüfung und die Stationsauswahl. In einem zweiten Schritt werden die Jahreshochwasser mittels des MHQ normiert (Formel 4-4).

$$HQ_n = \frac{HQ_a}{MHQ} \quad \text{Formel 4-4}$$

HQ_n ... Normierte Jahreshochwasser
 HQ_a ... Jahreshochwasser
 MHQ ... Mittleres Jahreshochwasser

In einem dritten Schritt erfolgt die Identifizierung hochwasserhomogener Regionen, also Regionen, für die ein ähnliches Hochwasserverhalten erwartet wird. Ähnliche Prozesse sollten innerhalb einer Region die Hochwassergenerierung dominieren. Ein erstes Indiz dafür kann die Saisonalität sein (Blöschl, 1999, Piock-Elena et. al, 2000 oder Haupt, 2000). Dafür wurde eine Direktionalstatistik in Anlehnung an Haupt (2000) durchgeführt. Es zeigt sich, dass es diesbezüglich keine räumlich differenzierten Muster in Niedersachsen gibt und dass die mittlere Eintrittszeit zwischen Dezember und April eines Jahres liegt (vgl. Abbildung 4-8).

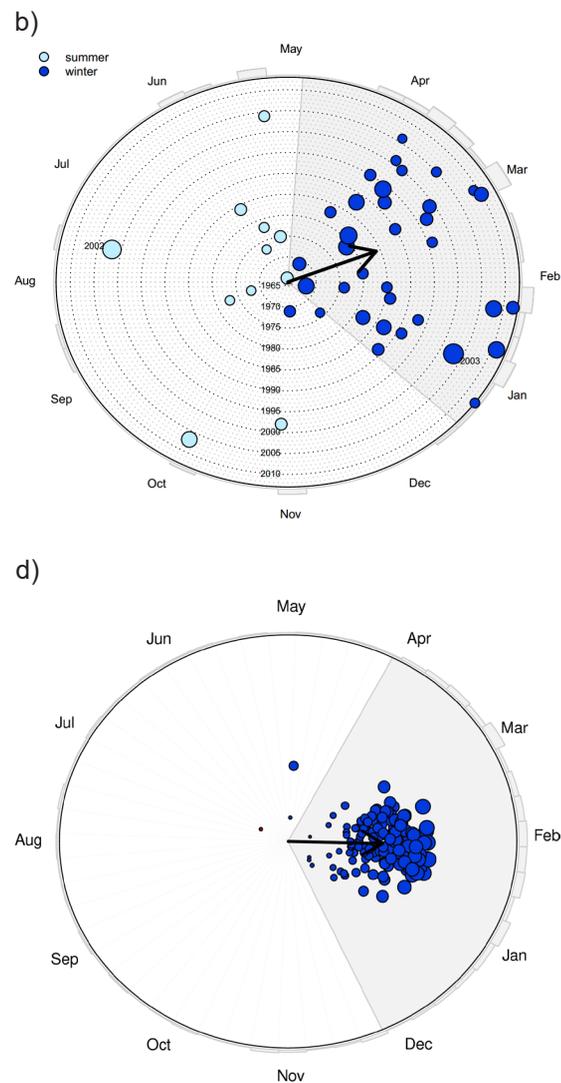
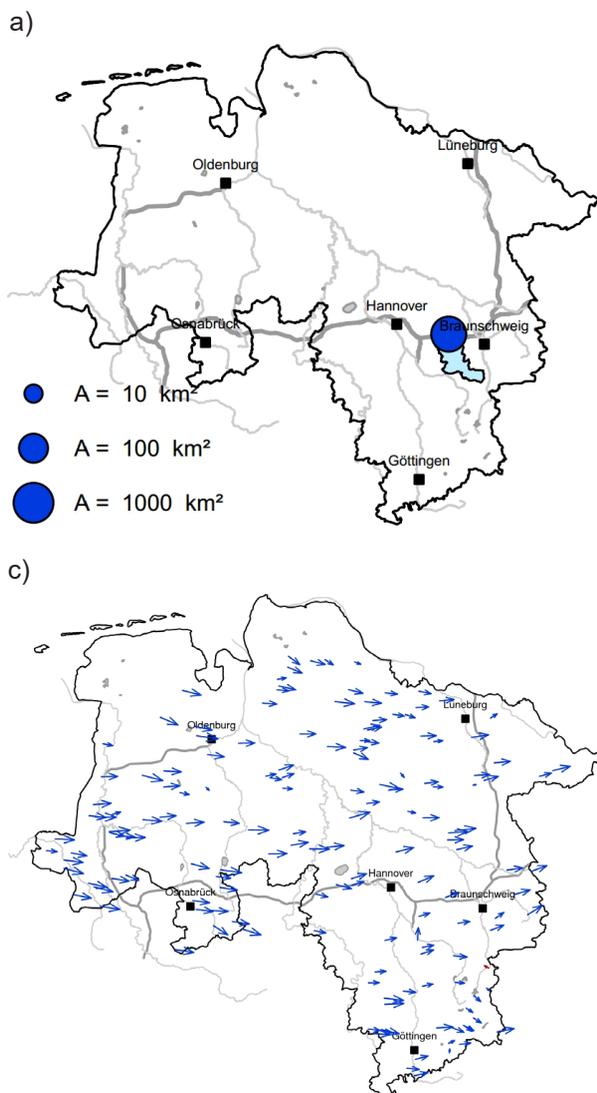


Abbildung 4-8: Saisonalität der Jahreshochwasser und daraus abgeleitetes mittleres Eintrittsdatum in Anlehnung an Haupt (2000) beispielhaft für den Pegel Peine: a) Lage und b) Eintrittsdatum der Jahreshochwasser, die Punktgröße ist relativ zur Größe des Hochwasserabflusses, der Pfeil zeigt das mittlere Eintrittsdatum an, der grau hinterlegte Bereich im Inneren des Kreises visualisiert die Bandbreite um das mittlere Eintrittsdatum auf Basis der Standardabweichung des Eintrittsdatums, der grau hinterlegte Bereich am äußeren Rand des Kreises visualisiert die relative Häufigkeitsverteilung auf Wochenbasis; sowie für ganz Niedersachsen: c) Kartendarstellung des mittleren Eintrittsdatums der ausgewählten Pegel und d) mittleres Eintrittsdatum der Jahreshochwasser an den ausgewählten Pegeln, die Punktgröße und der Abstand vom Zentrum sind relativ zur Ausprägung der Saisonalität, wobei je größer der Punkt ist und je weiter entfernt er vom Zentrum ist, desto stärker ist die Saisonalität ausgeprägt, d.h. desto geringer ist die Variabilität in der Eintrittszeit der Jahreshochwasser, der Pfeil zeigt das mittlere Eintrittsdatum für alle ausgewählten Pegel an, der grau hinterlegte Bereich visualisiert die mittlere Bandbreite um das mittlere Eintrittsdatum



Weiterhin gilt häufig die Annahme, dass ähnliche Gebietscharakteristiken zu ähnlich dominanten Abflussprozessen führen (DWA, 2012). Dafür wurden Einzugsgebietscharakteristiken der Topographie, der Landnutzung, des Bodens und der klimatischen Verhältnisse erhoben. Es wurde sich dafür an vorgeschlagenen Indizes entsprechend DWA M-552 (2012), Ali et al. (2012) sowie Rao & Srinivas (2006) orientiert.

Insgesamt stehen maximal 62 Einzugsgebietscharakteristiken zur Verfügung. Aus diesen werden die für das Hochwasserregime relevanten Einzugsgebietscharakteristiken extrahiert. Dafür wird die Einflussstärke mittels der Random Forest Methodik (Breiman, 2001) auf das mittlere jährliche Hochwasser und die Varianz der Jahreshochwasser für die einzelnen Charakteristiken bestimmt und entsprechend ihrer Relevanz geordnet. Im Anschluss werden stark untereinander korrelierte Einzugsgebietscharakteristiken entfernt, wobei jeweils nur das stärkere Kriterium bestehen bleibt. Ziel für robuste Aussagen ist es, so wenige Einzugsgebietscharakteristiken wie möglich und doch so viele wie nötig zu verwenden, um eine ausreichende Variabilität für die Heterogenität der Gebiete zu gewährleisten. Infolgedessen werden 26 Gebietseigenschaften als relevant deklariert (vgl. Anhang 1).

Sind die relevanten Einzugsgebietscharakteristiken bestimmt, erfolgt die Klassifizierung der Pegel zu hochwasserhomogenen Regionen. Es werden dabei Klassenanzahlen von 2 bis 40 Klassen untersucht, um ein Optimum für den Anteil an homogenen Regionen bei möglichst geringer Klassenanzahl zu finden. Da diverse Klassifizierungsmethoden unterschiedliche Ansätze verfolgen und in unterschiedlichen Gebietsmustern resultieren, werden sechs verschiedene Ansätze verglichen. Dazu zählen:

- Hierarchical Bootstrapped Classification (Suzuki & Shimodaira, 2006),
- K-means Partitioning (MacQueen, 1967),
- Modell-Based Classification (Fraley & Raftery, 1998),
- Partitioning Around Medoids (Kaufmann & Rousseeuw, 2008),
- Self-Organizing Maps (Kohonen, 1990),
- Ward's Hierarchical Classification (Ward, 1963).

Die Ausweisung homogener Regionen wird als einer der wichtigsten Schritte des Verfahrens erachtet, da diese dem Grundprinzip der gleichen Form der Verteilungsfunktion aller Pegel einer Region gerecht wird. Zur Entscheidung, ob eine Region homogen ist, kommt ein Homogenitätstest zum Einsatz. Dabei wird die Varianz der geschätzten lokalen L-Momente mit der Varianz einer als homogen eingestuften Region verglichen. Dieser Test resultiert in einer Prüfgröße $H1$. Die strikte Definition nach Hosking & Wallis (1997) besagt, dass eine Region als homogen angesehen wird, wenn die Prüfgröße $H1 \leq 1$ ist. Bei $H1 > 2$ wird die Region als heterogen angesehen. Im Übergangsbereich zwischen 1 und 2 sind

die Regionen undefiniert. Es finden sich jedoch auch Definitionen, die Regionen als eventuell homogen betrachten für den Fall $H1 \leq 3$ (Wallis et al., 2007). Zudem erfolgt die Ausweisung eines Diskordanzmaßes welches Aufschluss über die spezifische Individualität eines Pegels innerhalb einer Region gibt. Es zeigte sich, dass keiner der Klassifizierungsalgorithmen eine vollständige Einteilung der betrachteten Pegel in homogene Regionen ermöglicht.

Aufgrund der einfachen Handhabung in der späteren Zuordnung unbekannter Standorte und der erzielten regionalen Homogenität wurde die Klassifizierungsmethode der Self-Organizing Maps mit einer Anzahl von 24 Klassen ausgewählt (vgl. Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10). Es können unter Anwendung der strikten Definition der Homogenität 50% der Regionen bzw. 41 % der Stationen als wahrscheinlich homogen deklariert werden. Unter Anwendung der weicheren Definition der Homogenität können 71% der Regionen bzw. 66 % der Stationen als wahrscheinlich homogen deklariert werden.

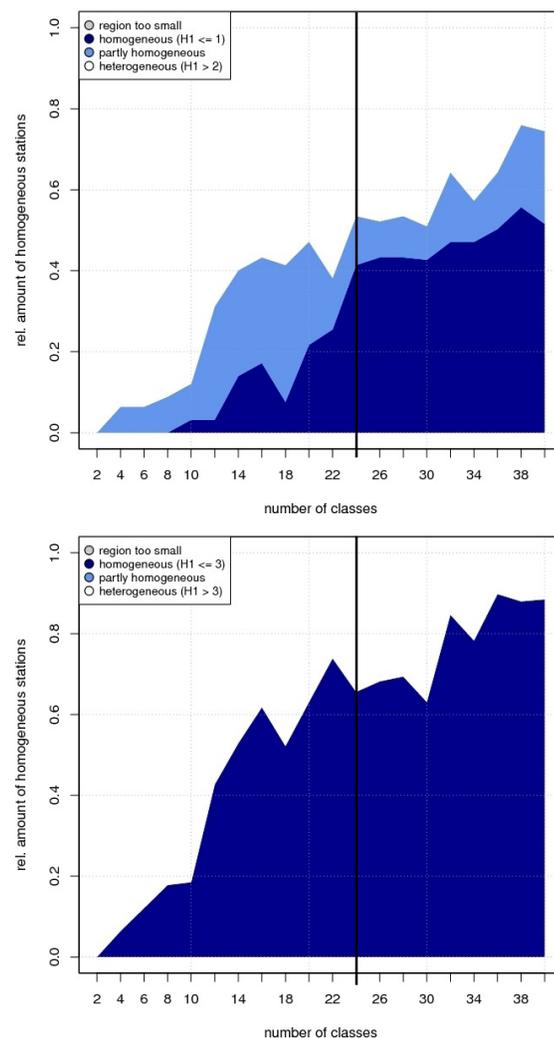


Abbildung 4-9: Vergleich der ausgewählten Klassifizierungsmethode hinsichtlich der erreichten relativen Anteile von als homogen eingestuften Pegeln an der gesamten Auswahl von Pegeln unter Verwendung des $H1 \leq 1$ Kriteriums (oben) und des $H1 \leq 3$ Kriteriums (unten)

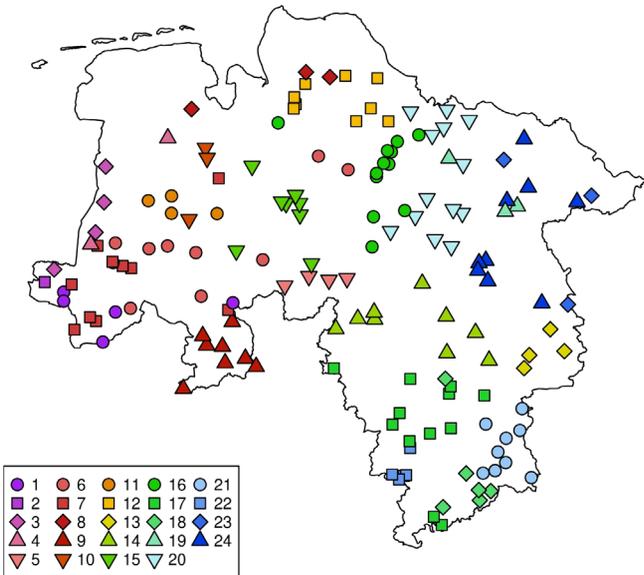


Abbildung 4-10: Klassifizierung der ausgewählten Pegel in 24 homogene Regionen mittels Self-Organizing Maps

In einem vierten Schritt erfolgt die Schätzung der lokalen L-Momente auf Basis der mittels des mittleren Jahreshochwassers normierten Jahreshochwasserabflüsse. In einem fünften Schritt werden die lokalen L-Momente entsprechend ihrer Reihenlänge innerhalb einer jeweiligen Region gewichtet um regionale L-Momente zu schätzen (Formel 4-5).

$$LR_i = \sum \frac{n^{lok} * LM_i}{n^{reg}}$$

Formel 4-5

LR_i ... regionales L – Moment i

LM_i ... lokales L – Moment i

n^{reg} ... regionaler Stichprobenumfang

n^{lok} ... lokaler Stichprobenumfang

In einem sechsten Schritt werden der Typ der regionalen Verteilungsfunktionen ausgewählt und die Parameter der Verteilungsfunktion mittels der zuvor geschätzten regionalen L-Momente bestimmt. Dies geschieht analog dem Vorgehen bei der lokalen Hochwasserstatistik der jeweiligen Pegel, d.h. bei einem Umfang von mindestens 50 Jahreshochwassern innerhalb einer Region wird die Allgemeine Extremwertverteilung angepasst, ansonsten die Gumbelverteilung. Die regionale Verteilungsfunktion (growth curve) erlaubt nun das Ableiten des normierten Hochwasserdurchflusses einer gegebenen Jährlichkeit für alle Pegel einer Region bzw. für einen dieser Region zugeordneten, unbeobachteten Standort. Beispielhaft ist in Abbildung 4-11 die Region 9 mit ihrer räumlichen Verteilung, sowie die an diese Region angepasste regionale Verteilungsfunktion dargestellt. Die Unsicherheitsbänder wurden mittels Bootstrapping unter Verwendung von 1000 Realisierungen erstellt. Jeweils das 10%- und das 90%-Quantil spiegeln die untere bzw. die obere Grenze wieder. Eine ausführliche Beschreibung des Bootstrapping-Verfahrens kann Efron (1979) entnommen werden.

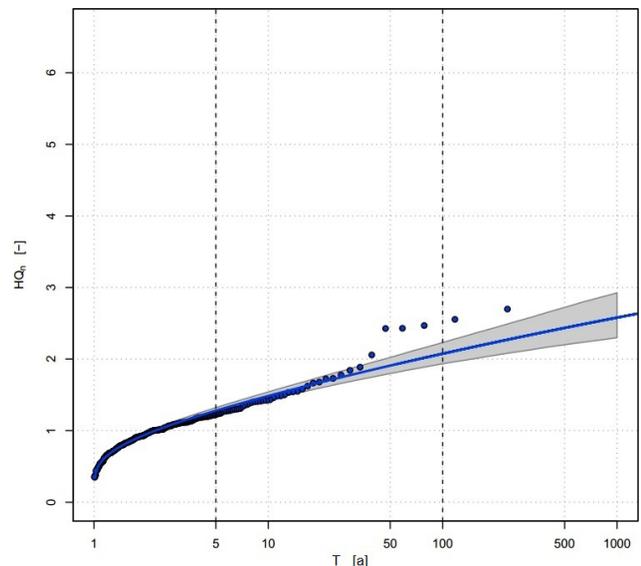


Abbildung 4-11: Räumliche Verteilung der zu Region 9 zugehörigen Pegel (links), die Größe der Punkte ist relativ zur Einzugsgebietsgröße der Pegel; Angepasste, regionale Verteilungsfunktion (rechts), die Jahreshochwasser aller Pegel der Region sind als Punkte dargestellt, der graue Bereich zeigt die Unsicherheitsbänder



Die jeweils gewählte regionale Verteilungsfunktion, sowie deren Parameter können Tabelle 4-3 entnommen werden. Es zeigte sich, dass 6 der 24 Regionen einen Stichprobenumfang von weniger als 4 Pegeln aufwiesen. Hochwasserquantile für Standorte, welche diesen Regionen zugeordnet werden, sollten mit besonderer Aufmerksamkeit geschätzt werden. Bei der Homogenität galt dies für 13 der 24 Regionen, da sie ein H1-Kriterium größer als 1 aufwiesen. Bei der Betrachtung der Abweichung des regionalisierten, geschätzten 100-jäh-

rigen Hochwasserabflusses von dem geschätzten 100-jährigen Hochwasserabfluss auf Basis der Beobachtungsdaten wiesen 9 von 24 Regionen einen regionalen RRMSE größer als 0,50 auf. Auch diese Regionen sollten mit besonderer Beachtung Verwendung finden. Bei der Anwendung des ausgewählten Verfahrens sind stets die Plausibilität der regionalisierten Hochwasserquantile zu prüfen und gegebenenfalls alternative Verfahren wie beispielsweise die Niederschlags-Abfluss-Modellierung vergleichsweise anzuwenden.

Tabelle 4-3: Übersicht der Regionen, deren Stichprobenumfang, die gewählte regionale Verteilungsfunktion (VF) sowie deren Parameter, Homogenität und RRMSE des 100-jährigen Hochwasserabflusses

Region	n (Pegel)	n (HQa)	gew. VF	c-Lage	d-Maßstab	a-Form	H1	RRMSE HQ ₁₀₀
1	5	208	GEV	0,8653	0,3145	0,1738	0,7	0,38
2	1	22	GUMBEL	0,8002	0,3462	-	-	0,02
3	4	95	GEV	0,7741	0,4064	0,0220	0,9	0,45
4	2	53	GEV	0,8074	0,3338	0,0002	3,3	1,78
5	4	145	GEV	0,8048	0,2839	-0,1012	-1,0	0,40
6	9	312	GEV	0,7887	0,3621	-0,0063	4,7	0,54
7	10	318	GEV	0,7406	0,3454	-0,1508	0,3	0,38
8	3	98	GEV	0,8115	0,3222	-0,0077	-0,6	0,27
9	8	234	GEV	0,8400	0,3066	0,0590	2,5	0,29
10	3	119	GEV	0,8625	0,3210	0,1740	0,9	0,28
11	5	109	GEV	0,6551	0,2960	-0,3776	0,8	1,18
12	9	256	GEV	0,8384	0,2882	0,0170	0,9	0,39
13	4	144	GEV	0,7480	0,3949	-0,0582	7,6	0,31
14	9	292	GEV	0,7712	0,3878	-0,0127	6,6	0,38
15	8	230	GEV	0,8087	0,3577	0,0446	2,0	0,71
16	12	369	GEV	0,8266	0,2945	-0,0118	3,1	0,24
17	12	517	GEV	0,7457	0,4168	-0,0323	4,4	0,68
18	6	203	GEV	0,7104	0,4280	-0,0920	5,1	0,36
19	3	122	GEV	0,7585	0,3184	-0,1565	2,7	1,05
20	13	540	GEV	0,8297	0,2745	-0,0420	-0,7	0,36
21	10	609	GEV	0,7321	0,3632	-0,1408	1,6	0,57
22	5	158	GEV	0,7848	0,4039	0,0467	0,1	0,69
23	3	138	GEV	0,7823	0,3569	-0,0321	0,6	0,16
24	9	340	GEV	0,8207	0,3446	0,0606	1,3	0,59



In einem siebten Schritt wird der gesuchte Standort einer bestehenden Region zugeordnet. Dies geschieht auf Basis der Gebietscharakteristiken für das Einzugsgebiet des gesuchten Standortes. Mittels der zugehörigen regionalen Verteilungsfunktion kann nun der normierte Hochwasserdurchfluss einer gegebenen Jährlichkeit am gesuchten Standort geschätzt werden.

In einem achten Schritt wird der Skalierungsparameter, das MHQ, für den unbeobachteten Standort regionalisiert. Häufig wird zur Ermittlung von flächendeckenden MHQ-Werten eine Multiple Lineare Regression (MLR) durchgeführt, bei der das MHQ in Beziehung zu verschiedenen Gebietskenngrößen gesetzt wird. Diese wurde hierbei nicht regionsspezifisch, sondern global durchgeführt (MLR-global). Alternativ wurden die Verfahren Nächster-Nachbar (NN), Ordinary Kriging (OK), Kriging mit externer Drift (EDK) und Top-Kriging (TK, Skøien et al., 2006) untersucht. Weiterhin wurde eine regionsweise Multiple Lineare Regression für ausgewiesene Hauptregionen untersucht (MLR-group). Diese Hauptregionen sind dabei Agglomerate einzelner Regionen. Es wurden Varianten auf Basis der originalen Werte und auf Basis logarithmierter Werte erstellt. Zudem erfolgte die Schätzung für jede Methode vergleichsweise auf Basis des mittleren Jahreshochwassers MHQ und der mittleren Jahreshochwasserspense MHq, wobei die Gütekriterien stets auf den MHQ basierten. Im Folgenden wird sich auf die jeweils beste Variante beschränkt. Die Güte der Kreuzvalidierung im Vergleich zu anderen Methoden ist in Tabelle 4-4 zusammengefasst.

Tabelle 4-4: Kreuzvalidierungsergebnisse der Regionalisierung des Skalierungsparameters auf Basis der Referenzpegel

Methode	Zielvariable	COD ref.	MRE ref.	RRMSE ref.
MLR-global	MHQ	0,81	0,26	0,32
MLR-group	MHQ	0,86	0,23	0,29
OK	MHq	0,81	0,27	0,33
EDK	MHq	0,87	0,22	0,28
TK	MHq	0,85	0,24	0,30
NN	MHq	0,47	0,34	0,42

Sowohl Multiple Lineare Regression (MLR) als auch Ordinary Kriging (OK), Kriging mit externer Drift (EDK) und Top-Kriging (TK) weisen höhere Güten auf als die Methode Nächster Nachbar (NN). Es zeigt sich zudem, dass die globale MLR hohe Güten erzielt, die vergleichbar mit denen der besten Varianten sind. Weiterhin zeigt sich, dass eine regionsweise MLR auf Basis von Hauptregionen zu einer Verbesserung führen kann. Ebenso liefern EDK und TK bessere Güten als bei der globalen MLR.

Sofern es die Gütekriterien der im Anschluss an die MHQ-Regionalisierung stattfindenden Rückskalierung zulassen, wird die globale MLR zur Regionalisierung des MHQ empfohlen. Die Gründe sind dabei, dass eine regionsweise MLR als weniger robust angesehen wird als die globale MLR. Zudem sind die Verfahren EDK und TK deutlich komplexer und die Unterschiede in den Gütekriterien sehr gering. Die Gleichung der final empfohlenen globalen MLR lautet (Formel 4-6 und Tabelle 4-5):

$$\widehat{MHQ} = \exp^{\alpha} * \prod CD_i^{\beta_i} \quad \text{Formel 4-6}$$

\widehat{MHQ} ... Schätzung des Mittleren Jahreshochwasser

CD_i ... Gebietseigenschaften

α und β_i ... Koeffizienten der MLR

Tabelle 4-5: Koeffizienten der globalen Multiplen Linearen Regression

α	β_i	CD_i
73,22139	+ 0,75308	Fläche
	- 8,90364	Lage X Gebietsauslass
	+ 0,38177	max. Höhe
	- 0,58609	Luftkapazität in effektiver Wurzelzone
	+ 13,71589	Luftfeuchte

In einem neunten und letzten Schritt erfolgt die Rückskalierung durch Multiplikation des regionalisierten MHQs mit dem geschätzten, normierten Hochwasserabfluss der gesuchten Jährlichkeit. Auf diese Weise kann für jeden beliebigen Gewässerabschnitt der Hochwasserabfluss einer beliebigen Jährlichkeit bestimmt werden (Formel 4-7).

$$\widehat{HQ}(T) = \widehat{MHQ} * \widehat{HQ}_n(T) \quad \text{Formel 4-7}$$

$\widehat{HQ}(T)$... Schätzung des Hochwasserquantils

$\widehat{HQ}_n(T)$... Schätzung des normierten Hochwasserquantils aus reg. Verteilungsfunkt

\widehat{MHQ} ... Schätzung des Mittleren Jahreshochwassers

Die Ergebnisse der Kreuzvalidierung des Index-Flood Verfahrens mit der MHQ-Regionalisierung mittels Multipler Linearer Regression sind in Abbildung 4-12 dargestellt. Die räumliche Verteilung der Schätzung der 100-jährigen Hochwasserabflussspende auf Basis der Kreuzvalidierung kann sehr gut wiedergegeben werden. Dabei wurde die Farbverteilung so gewählt, dass vor allem die räumlichen Muster hinsichtlich besonders niedriger und besonders hoher Werte deutlich hervortreten. Die räumliche Verteilung der relativen Abweichungen zwischen regionaler Schätzung und lokaler Schätzung an dem jeweiligen Pegel zeigt keine räumlich differenzierten Muster.

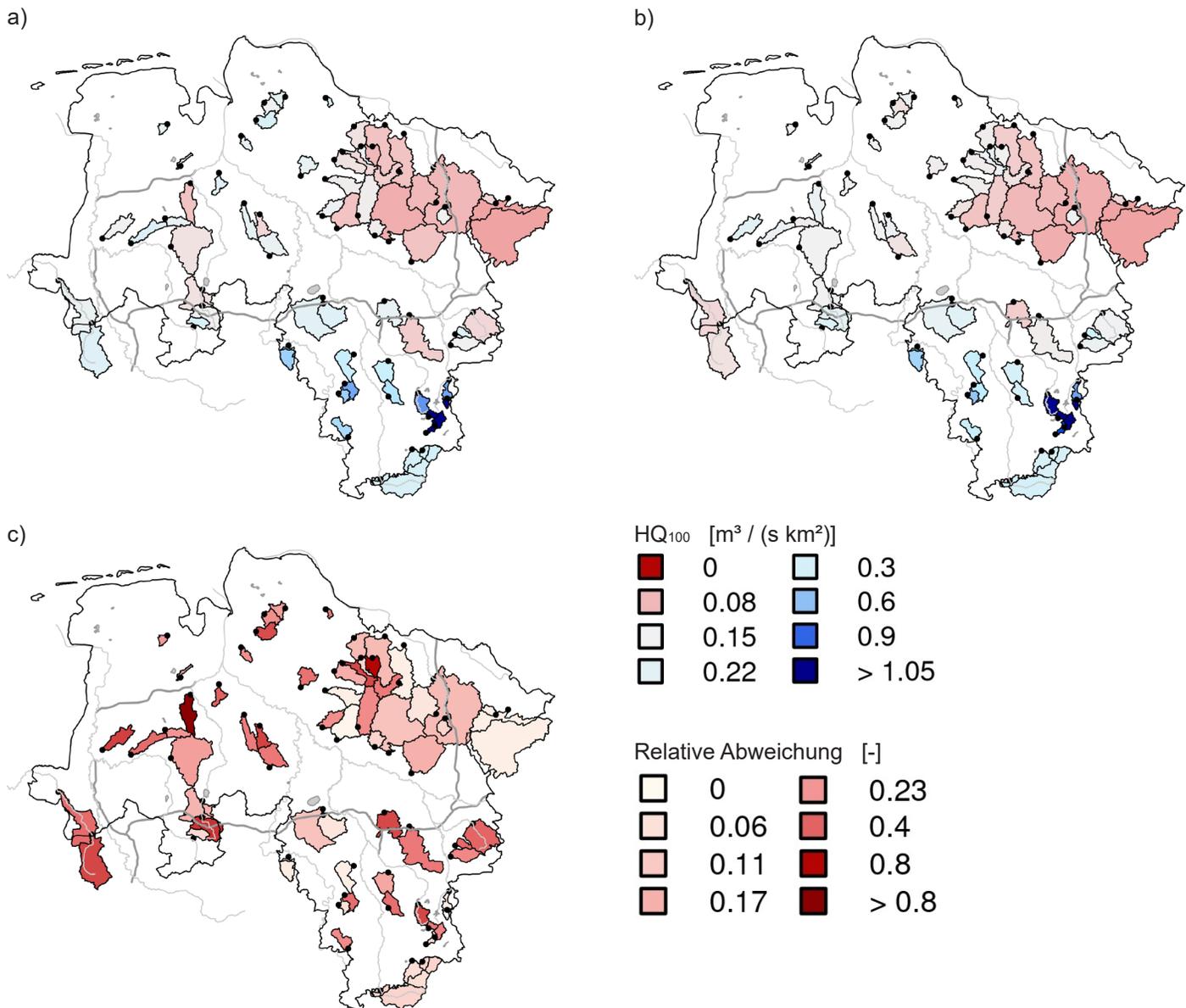


Abbildung 4-12: Lokale Schätzung der 100-jährigen Hochwasserabflussspende für die Referenzpegel (a), räumliche Verteilung der Kreuzvalidierungsergebnisse für das ausgewählte Hochwasserregionalisierungsverfahren Index-Flood unter Verwendung der globalen Multiplen Linearen Regression für die Regionalisierung des Skalierungsparameters MHQ für die Referenzpegel (b) und deren relativen Abweichungen (c)

4.2.6 Methodenvergleich

Für eine fundierte Einordnung hinsichtlich der Güte des ausgewählten Index-Flood Verfahrens im Vergleich zu anderen Hochwasserregionalisierungsverfahren wurde ein Methodenvergleich für die Jährlichkeiten von 2, 5, 10, 20, 50, 100 und 200 Jahren durchgeführt. Ähnliche Vergleiche können z. B. in Merz & Blöschl (2005) gefunden werden. An dieser Stelle erfolgt lediglich eine Kurzbeschreibung der Methoden, eine weiterführende Beschreibung kann DWA M-552 (2012) bzw. der jeweils angegebenen Literatur entnommen werden. Die für den Methodenvergleich ausgewählten Verfahren können in drei Gruppen eingeteilt werden.

Gruppe 1 - direkte Regionalisierung der Hochwasserquantile:

- Nächster Nachbar (NN-HQ),
- Multiple Lineare Regression (MLR-HQ),
- Ordinary Kriging (OK-HQ),
- Kriging mit externer Drift (EDK-HQ),
- Top-Kriging (TK-HQ).

Die erste Gruppe regionalisiert die Hochwasserquantile direkt. Die Methode Nächster Nachbar (NN-HQ) übernimmt die Hochwasserquantile des nächst gelegenen Gebietes. Dabei wurden Varianten erstellt, die entweder auf den Lagekoordinaten des Pegels oder des Gebietsschwerpunktes beruhen sowie eine Variante, die



die Nähe hinsichtlich der Größe des überlappenden Einzugsgebiets beurteilt. Die Methode Multiple Lineare Regression (MLR-HQ) erstellt einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Hochwasserquantilen und Gebietscharakteristiken. Einen Überblick liefern Lutz (1984), Schumann & Pfützner (2002) oder Gattermayr (2011). Dabei wurden Varianten erstellt, die entweder auf den ursprünglichen Hochwasserquantilen und Gebietscharakteristiken oder den logarithmierten Werten beruhen. Die Methode Ordinary Kriging (OK-HQ) beruht auf der Annahme, dass es einen Bezug zwischen der räumlichen Lage und der Variabilität gibt. Je näher, desto größer ist das Gewicht. Auch hier wurden Varianten erstellt, die entweder auf Basis der ursprünglichen Hochwasserquantile oder der logarithmierten Werten arbeiten. Die Methode Kriging mit externer Drift (EDK-HQ) ist eine Erweiterung des Ordinary Kriging unter Verwendung von zusätzlichen Informationen wie beispielsweise ausgewählten Gebietscharakteristiken. Auch hier wurden Varianten erstellt, die entweder auf den ursprünglichen Hochwasserquantilen oder den logarithmierten Werten basieren. Die Methode Top-Kriging (TK-HQ) ist ebenfalls eine Erweiterung des Ordinary Kriging, wobei die Gewässernetzstruktur Berücksichtigung findet. Pegel eines gleichen Gewässers erhalten bei gleicher Entfernung wie Pegel eines anderen Gewässers ein größeres Gewicht. Eine detaillierte Beschreibung kann Skøien et al. (2006), Skøien & Blöschl (2007) oder Merz et al. (2008) entnommen werden.

Gruppe 2 - Varianten des Index-Flood Verfahrens:

- Index-Flood mit MHQ-Regionalisierung mittels globaler Multipler Linearer Regression (IF-MLR-global),
- Index-Flood mit MHQ-Regionalisierung mittels gruppenweiser Multipler Linearer Regression (IF-MLR-group),
- Index-Flood mit MHQ-Regionalisierung mittels Ordinary Kriging (IF-OK),
- Index-Flood mit MHQ-Regionalisierung mittels Kriging mit externer Drift (IF-EDK).

Die zweite Gruppe beschreibt Varianten des Index-Flood Verfahrens (Dalrymple, 1960 oder Hosking & Wallis, 1997). Die Regionalisierung des MHQ erfolgte dabei entweder mittels der Multiple Lineare Regression (IF-MLR), Ordinary Kriging (IF-OK) oder Kriging mit externer Drift (IF-EDK). Die Multiple Lineare Regression wurde dabei einerseits global (IF-MLR-global) und andererseits auf Basis von Hauptregionen (IF-MLR-group) durchgeführt.

Gruppe 3 - Varianten des Region-Of-Influence Verfahrens:

- Region-Of-Influence mit MHQ-Regionalisierung mittels Multipler Linearer Regression mit einer minimalen regionalen Stichprobe von 100 Jahreshochwassern (ROI-100-MLR),

- Region-Of-Influence mit MHQ-Regionalisierung mittels Ordinary Kriging mit einer minimalen regionalen Stichprobe von 100 Jahreshochwassern (ROI-100-OK),
- Region-Of-Influence mit MHQ-Regionalisierung mittels Kriging mit externer Drift mit einer minimalen regionalen Stichprobe von 100 Jahreshochwassern (ROI-100-EDK),
- Region-Of-Influence mit MHQ-Regionalisierung mittels Multipler Linearer Regression mit einer minimalen regionalen Stichprobe von 500 Jahreshochwassern (ROI-500-MLR),
- Region-Of-Influence mit MHQ-Regionalisierung mittels Ordinary Kriging mit einer minimalen regionalen Stichprobe von 500 Jahreshochwassern (ROI-500-OK),
- Region-Of-Influence mit MHQ-Regionalisierung mittels Kriging mit externer Drift mit einer minimalen regionalen Stichprobe von 500 Jahreshochwassern (ROI-500-EDK).

Die dritte Gruppe beschreibt Varianten des Region-Of-Influence Verfahrens (Burn, 1990 oder Institute of Hydrology, 1999). Die Grundidee ist analog zum Index-Flood Verfahren. Der Unterschied hierbei ist, dass die hochwasserhomogenen Regionen dynamisch sind. Auch hier muss der Skalierungsparameter regionalisiert werden. Dafür wurden ebenfalls die Methoden Multiple Lineare Regression (ROI-MLR), Ordinary Kriging (ROI-OK) und Kriging mit externer Drift (ROI-EDK) angewandt. Je nach Jährlichkeit des gesuchten Hochwasserquantils sollte der Stichprobenumfang der dynamischen Region eine minimale Größe haben (Jakob et al., 1999). Es werden zwei Varianten erstellt. Zum einen eine mit einem minimalen Stichprobenumfang von 100 Jahreshochwassern innerhalb der Region und zum anderen eine mit 500 Jahreshochwassern. Damit ergeben sich insgesamt die Varianten ROI-100-MLR, ROI-100-OK, ROI-100-EDK bzw. ROI-500-MLR, ROI-500-OK, ROI-500-EDK.

Für einige der Verfahren wurden verschiedene Varianten erstellt. Im weiteren Verlauf wird sich jeweils auf die Ergebnisse der besten Variante beschränkt. Zudem wurden die einzelnen Verfahren sowohl auf Basis der Hochwasserabflüsse als auch auf Basis der Hochwasserabflussspenden getestet. Einzelne Verfahren sind naturgemäß auf die Verwendung von Hochwasserabflussspenden beschränkt. Beispielsweise können zwei benachbarte Pegel unterschiedlicher Gewässer deutlich unterschiedliche Einzugsgebietsgrößen und Abflussprozesse aufweisen. Damit sind trotz nahezu identischer Lage, deutliche Unterschiede in der Größenordnung der gemessenen Abflüsse möglich. Die Verwendung von Abflussspenden ermöglicht in diesem Zusammenhang eine bessere Vergleichbarkeit. Der Vergleich der Gütekriterien erfolgt jedoch weiterhin stets auf Basis der Hochwasserabflüsse.



Die Kreuzvalidierungsergebnisse für die Regionalisierung der 100-jährigen Hochwasserabflüsse der jeweiligen Verfahren sind Tabelle 4-6 zu entnehmen. Zu beachten ist dabei, dass die Ausweisung der Regionen und ebenso die Schätzung der regionalen Verteilungsfunktion auf Basis aller ausgewählten Pegel erfolgte und damit nicht in die Kreuzvalidierung einbezogen wurde. Die Güten der Verfahren für den 100-jährigen Hochwasserabfluss liegen in einer Bandbreite von 0,12 bis 0,85 für den COD auf Basis der Referenzpegel mit einem Mittelwert von 0,75. Der mittlere relative Fehler (MRE) auf Basis der Referenzpegel liegt im Bereich von 0,23 bis 0,38 mit einem Mittelwert von 0,27. Der RRMSE auf Basis der Referenzpegel liegt im Bereich von 0,29 bis 0,49 mit einem Mittelwert von 0,34. Das vorgeschlagene Index-Flood Verfahren mit der Regi-

onalisierung des Skalierungsparameters mittels globaler Multipler Linearer Regression (IF-MLR) liegt jeweils nah bei den Bestwerten und deutet damit auf eine vergleichbare und vertretbare Güte hin. Das Verfahren Nächster Nachbar (NN-HQ) weist dabei die schlechteste Güte auf. Die besten Gütekriterien werden von den Verfahren ROI-500-EDK gefolgt von IF-MLR-group erzielt. Untersucht man die Robustheit der Verfahren gegenüber der Jährlichkeit zeigt sich, dass die meisten Verfahren stabil in ihrer Güte sind. Einzig die direkte Multiple Lineare Regression der Hochwasserabflüsse (MLR-HQ) deutet auf ein leicht sprunghaftes Verhalten hin. Das Index-Flood Verfahren mit MHQ-Regionalisierung mittels globaler MLR (IF-MLR-global) zeigt dabei ebenfalls ein stabiles Verhalten (vgl. Abbildung 4-13).

Tabelle 4-6: Güte der Kreuzvalidierung der Regionalisierung der 100-jährigen Hochwasserabflüsse auf Basis der Referenzpegel

Method	COD ref.	MRE ref.	RRMSE ref.
IF-MLR-global	0,81	0,25	0,32
IF-MLR-group	0,85	0,23	0,29
IF-OK	0,74	0,30	0,38
IF-EDK	0,83	0,24	0,31
MLR-HQ	0,71	0,28	0,39
OK-HQ	0,76	0,29	0,34
EDK-HQ	0,81	0,23	0,31
TK-HQ	0,82	0,27	0,32
ROI-100-MLR	0,82	0,26	0,32
ROI-100-OK	0,72	0,29	0,37
ROI-100-EDK	0,83	0,24	0,30
ROI-500-MLR	0,84	0,25	0,32
ROI-500-OK	0,72	0,30	0,37
ROI-500-EDK	0,84	0,23	0,29
NN-HQ	0,12	0,38	0,49

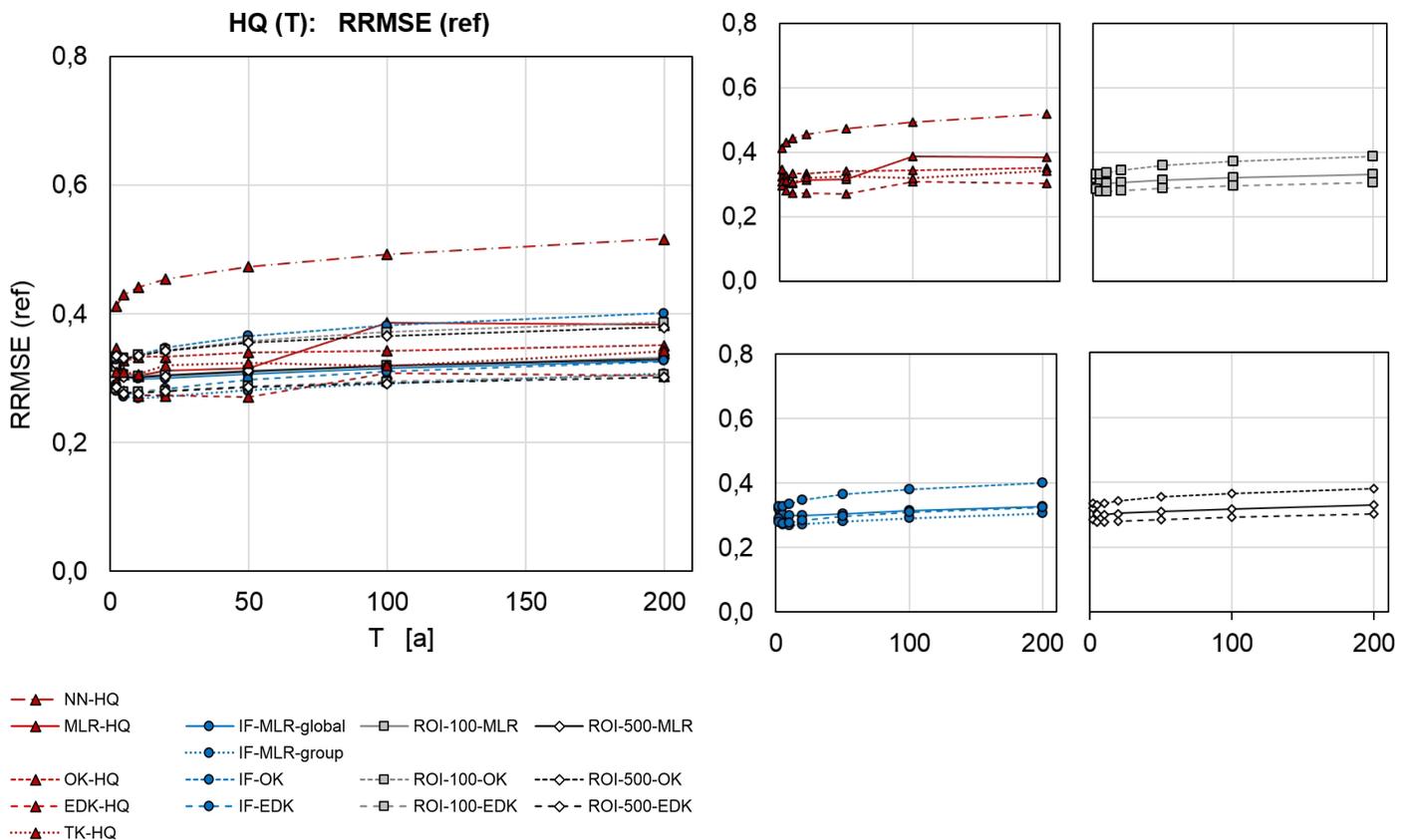


Abbildung 4-13: Vergleich der Hochwasserregionalisierungsmethoden für die ausgewählten Stationen und die gegebenen Jährlichkeiten auf Basis des RRMSE der Kreuzvalidierung für die Hochwasserabflüsse

Für einen Vergleich mit den erzielten Güten der Bundesländer Sachsen (Walther et al., 2012) und Thüringen (TLUG, 2014) werden zudem die entsprechenden Gütekriterien auf Basis der Hochwasserabflussspenden berechnet und verglichen. Es zeigt sich, dass die Güten der hier vorgestellten Index-Flood-Varianten in einer vergleichbaren Größenordnung liegen bzw. teilweise bessere Ergebnisse liefern. Die Unterschiede liegen zum einen in der Anzahl der ausgewiesenen Regionen und andererseits in der Regionalisierung des Skalierungsparameters MHQ. In den Studien von Sachsen und Thüringen wurden deutlich weniger Regionen ausgewiesen als es in Niedersachsen möglich war. Mit Hinblick auf den Anteil von als homogen eingestuftem Regionen bzw. Stationen an der Gesamtkulisse mussten jedoch mehr Regionen ausgewiesen werden. Darauf aufbauend wird eine globale Regionalisierung des Skalierungsparameters (MHQ) anstelle einer regionsweisen empfohlen, da die regionalen Stichproben deutlich kleiner sind.

4.2.7 Längsschnittverfahren

Die Längsschnitte wurden für übergeordnete Gewässer durchgeführt. Die Auswahl der übergeordneten Gewässer basierte dabei auf dem Verfahren nach Elsholz & Berger (2003), wobei einzelne Längsschnitte zusätzlich erstellt wurden z. B. Schunter, und einzelne Längsschnitte entfernt wurden, da diese nicht genügend lokale Stützstellen aufwiesen z. B. Krummes Wasser. Die Voraussetzung ist, dass nur seitliche Zuflüsse mit verhältnismäßig kleinem Einzugsgebiet zum Hauptgewässer vorliegen (DWA, 2012). Übergeordnete Gewässer sind (siehe auch Abbildung 4-14):

- Aller,
- Düte,
- Ecker,
- Emmer,
- Ems,
- Große Aue,
- Hase,
- Hunte,
- Innerste,
- Leine,
- Oder-Rhume,
- Oker
- Oste,
- Schunter,
- Sieber,
- Söse,
- Soeste,
- Stederau-Ilmenau,
- Vechte,
- Weser,
- Wümme.

Bekanntere Verfahren sind in Lauterbach & Glos (1965) oder Dyck et al. (1977) beschrieben. Die Längsschnitte wurden abschnittsweise zwischen den lokal an den Pegeln geschätzten Hochwasserabflussspenden interpoliert. Dabei wurde bei einer Abnahme der Hochwasser-



abflussspende mit zunehmendem Einzugsgebiet ein exponentieller Verlauf und bei einer Zunahme der Hochwasserabflussspende mit zunehmendem Einzugsgebiet ein linearer Verlauf angenommen (TLUG, 2014 oder Walther et al., 2012).

Zu beachten ist, dass Zuflüsse und bekannte Speicherbauwerke nur gekennzeichnet wurden, nicht jedoch im Aufbau der Längsschnitte Einfluss finden. Die Anwendung der Längsschnitte erfordert demnach stets eine hydrologische Plausibilisierung. Die Unsicherheitsbänder wurden mittels Bootstrapping unter Verwendung

von 1000 Realisierungen erstellt. Jeweils das 10%- und das 90%-Quantil spiegeln die untere bzw. die obere Grenze wieder. Eine ausführliche Beschreibung des Bootstrapping-Verfahrens kann Efron (1979) entnommen werden.

Einen Überblick über die räumliche Verteilung der ausgewählten übergeordneten Gewässer kann Abbildung 4-14 entnommen werden. Beispielhaft ist das übergeordnete Gewässer der Aller ausgewählt worden. In Abbildung 4-15 ist der Längsschnitt für die 100-jährige Hochwasserabflussspende der Aller dargestellt.

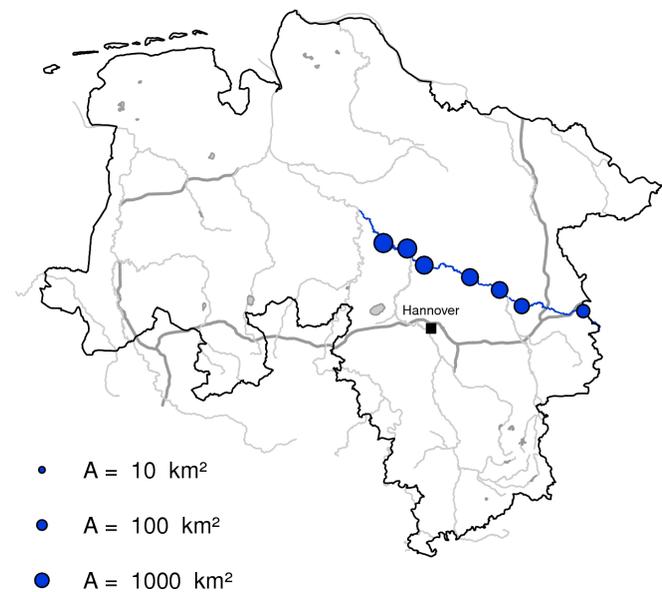
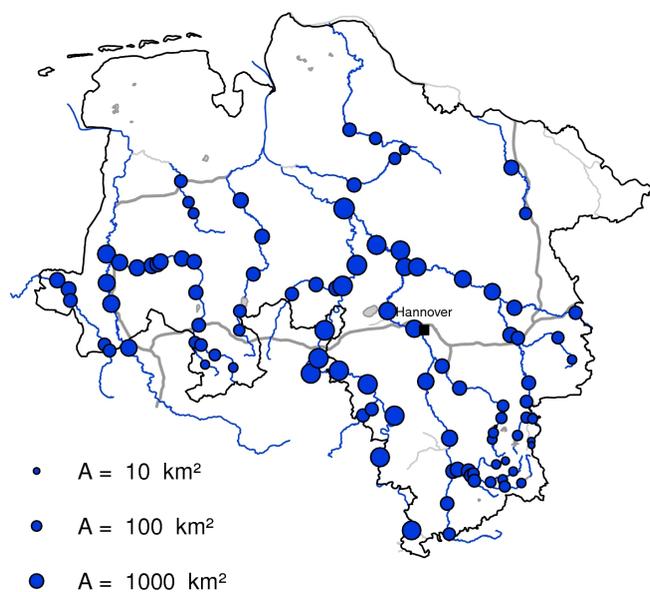


Abbildung 4-14: Räumliche Verteilung der hydrologischen Längsschnitte und der dafür ausgewählten Pegel (links), räumliche Verteilung der für den hydrologischen Längsschnitt des übergeordneten Gewässers der Aller verwendeten Pegel (rechts)



Aller: Hq100 [l/skm²]

red: linear, blue: exponential
520 - 14730 km²

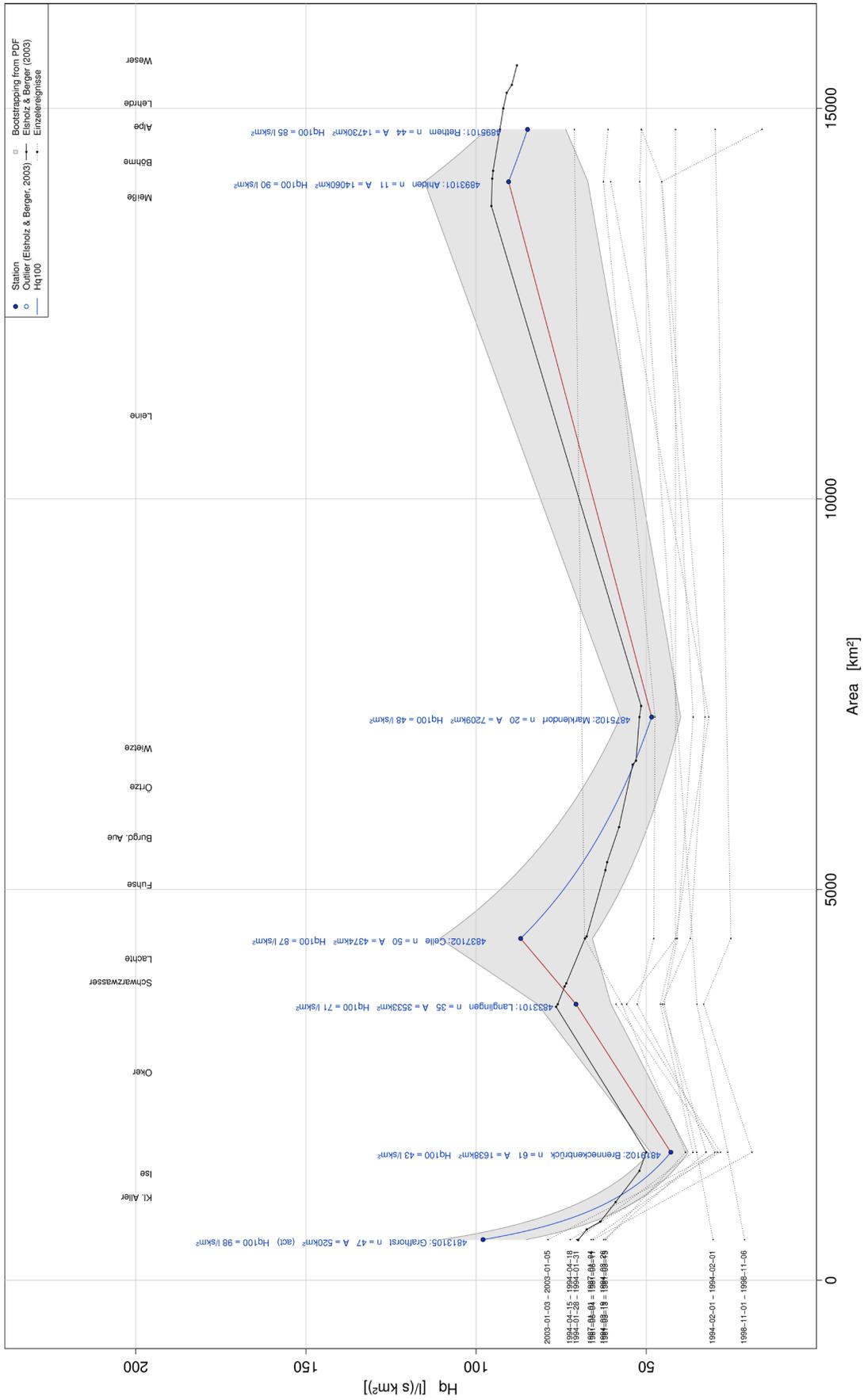


Abbildung 4-15: Hydrologischer Längsschnitt des übergeordneten Gewässers der Aller für die 100-jährige Hochwasserabflussspende Hq100. Der graue Bereich markiert die Unsicherheitsbänder durch das 10% und das 90% Quantil. Die schwarzen, unterbrochenen Linien stellen ausgewählte Einzelereignisse dar



4.2.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für die Regionalisierung von Hochwasserkennwerten wird bei übergeordneten Gewässern das Längsschnittverfahren empfohlen. Für meso-skalige Einzugsgebiete zeigte der Methodenvergleich, dass das Index-Flood Verfahren eine vertretbare Güte erzielt. Zudem ist diese über die Jährlichkeiten stabil. Unter Beachtung der bereits zu Beginn genannten Vorteile wird das Index-Flood Verfahren mit einer globalen Multiplen Linearen Regression für meso-skalige Einzugsgebiete in Niedersachsen empfohlen.

Das vorgestellte Verfahren ist entsprechend DWA M-552 (2012) als einzelne Stütze zu betrachten. Außerdem sind die regionalisierten Ergebnisse hinsichtlich ihrer hydrologischen Plausibilität einzuschätzen. Es wird empfohlen Ensembles von verschiedenen Methoden wie beispielsweise einer Nachbarschaftsanalyse oder der Niederschlag-Abfluss-Simulation zu Rate zu ziehen und den Prozess der Hochwasserregionalisierung als mehrstufiges Konzept zu betrachten (TLUG, 2014).

Weiterhin wurden entsprechend der Pegelkenntnis stark anthropogen beeinflusste Gebiete nicht bei der

Anwendung der Methoden berücksichtigt. Die regionalisierten Hochwasserquantile spiegeln demnach eher die natürlichen Verhältnisse wieder (TLUG, 2014).

Das vorgestellte Verfahren beruht auf einer Auswahl von Pegeln mit ihren Gebietscharakteristiken. Bei einer Anwendung für unbekannte Standorte muss geprüft werden, ob die Gebietscharakteristiken der unbekannt Standorte innerhalb des Bereichs der dem Verfahren zugrundeliegenden Gebietseigenschaften liegen. Insbesondere Unterschiede im ober- und unterirdischen Einzugsgebiet sind problematisch für die Hochwasserregionalisierung (Haupt, 2000). Da Abflüsse stets die integrative Antwort eines Einzugsgebiets auf die Niederschläge in einem Gebiet sind, können allein aufgrund der unterschiedlichen Einzugsgebietsgröße unterschiedliche Prozesse dominant sein. Beschreibungen des Skalenproblems liefern Blöschl & Sivapalan (1995), Blöschl (1996) oder Gattermayr (2011).

Eine Bereitstellung von Hochwasserabflussspendenkarten für einen landesweiten Einsatz in der Praxis ist derzeit in Vorbereitung.



5 Die Klimamodell-Ensemble von KliBiW

5.1 Regionale Klimamodellierung

Abbildung 5-1 stellt die verschiedenen Arbeitsschritte in der Klimamodellierung dar. Grundlage sind Szenarien, welche die zukünftige Entwicklung klimarelevanter Treibhausgase (THG) unter verschiedenen soziökonomischen Entwicklungen beschreiben. Die ersten vom IPCC entwickelten Emissionsszenarien wurden im Jahr 2000 im „Special Report on Emissions Scenarios“ (SRES, 2000) veröffentlicht. Die 40 Emissionsszenarien sind 4 „Familien“ zugeordnet, die sich hinsichtlich ihrer Annahmen über die zukünftige Entwicklung von Demographie, Weltbevölkerung, Wirtschaft, Technologie und Umweltschutz unterscheiden. Die Szenarien geben die Entwicklung verschiedener THG bis zum Jahr 2100 an (IPCC, 2000). Mit dem 5. IPCC-Sachstandsbericht wurde im Jahr 2014 eine neue Generation von Szenarien der THG-Entwicklung veröffentlicht, die auf einer anderen Methodik beruht. Diese Szenarien basieren auf sogenannten repräsentativen Konzentrationspfaden (Representative Concentration Pathways = RCPs). Im Gegensatz zu den SRES-Szenarien geben die RCP-Szenarien zunächst einen Strahlungsantrieb in W/m^2 am Ende des 21. Jahrhunderts vor, nach dem das jeweilige Szenario benannt ist. Das Szenario „RCP8.5“ steht also für einen Strahlungsantrieb von $8,5 W/m^2$ im Jahr 2100. Der Strahlungsantrieb entspricht der Erwärmungswirkung einer THG-Konzentration. Ausgehend von dem Endwert wird durch die RCP-Szenarien auch der zeitliche Verlauf des Strahlungsantriebs definiert. Jeder Verlauf entspricht einem Szenario. Dabei kann jedes der vier Szenarien durch eine Kombination unterschiedlicher sozioökonomischer Entwicklungen erreicht werden (IPCC, 2014). Informationen dazu, auf welchen Szenarien die in KliBiW 4 verwendeten Klimaprojektionen basieren finden sich in Kapitel 5.2.

Basierend auf den zuvor genannten Szenarien der THG-Entwicklung bilden Globale Klimamodelle das Klimasystem der Erde und seine zukünftige Entwicklung ab. Sie liegen in der neuesten Generation in einer räumlichen Auflösung von 100 bis 200 km vor und simulieren das Klimageschehen mit entsprechenden Rückkopplungsprozessen global zwischen Landmassen, Ozeanen und Atmosphäre. Für regional differenzierte Aussagen ist diese räumliche Auflösung jedoch zu gering, da vor allem der Einfluss der Topographie (z. B. Gebirge, Höhenzüge) auf klimatische Prozesse stark vereinfacht betrachtet wird. Um eine bessere (räumliche) Auflösung dieser Prozesse zu erreichen, muss eine differenzierte Darstellung für einen Ausschnitt aus dem Globalmodell erfolgen. Dies geschieht durch das sogenannte Downscaling. Es werden zwei Arten von Downscaling-Methoden unterschieden, das statistische und das dynamische Downscaling (Jacob et al., 2012a). Beide Verfahren nutzen die Ergebnisse der Globalmodelle als Randbedingungen. Dynamische Regionalmodelle simulieren das Klima in einem dreidimensionalen Ausschnitt des Globus anhand von atmosphärischen Zirkulationsmustern. Dabei werden die Eigenschaften der Erdoberfläche wie Höhenlage, Böden, Landnutzung und ihre Wechselwirkungen mit der Atmosphäre berücksichtigt. Durch die höhere Auflösung von 2,5 bis 50 km können dynamische Regionalmodelle den Prozess der Niederschlagsbildung besser repräsentieren als Globalmodelle (Jacob et al., 2017). Statistische Regionalmodelle basieren auf lokalen Stationsdaten. Sie analysieren Zusammenhänge zwischen beobachteten großräumigen Zirkulationsmustern und den meteorologischen Messdaten. Die Zusammenhänge wenden sie dann auf die von den Globalmodellen projizierten Klimaänderungen an. Im Gegensatz zu den dynamischen geben statistische Regionalmodelle ihre Klimasimulationen nicht auf einem regelmäßigen Raster, sondern als Stationszeitreihen aus. Die Auflösung des jeweiligen statistischen Modells hängt daher von der Anzahl der ihm zugrundeliegenden Messstationen ab (Jacob et al., 2017).

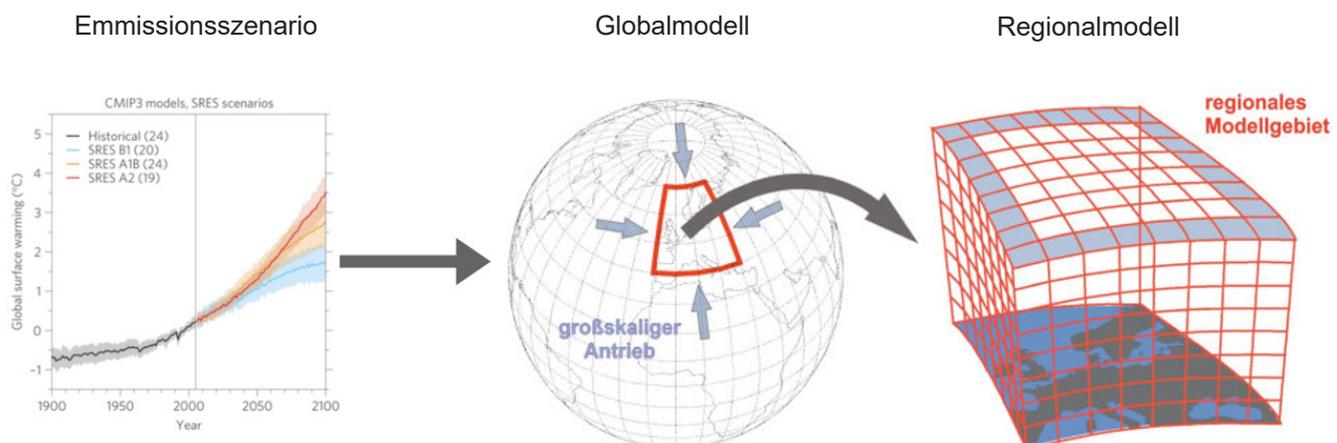


Abbildung 5-1: Modellkette der regionalen Klimamodellierung (ergänzt nach Klimanavigator, 2017)



5.2 Ensemble-Mitglieder

Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die in KliBiW 4 verwendeten 14 Klimamodellketten. Dargestellt sind die zugrundeliegenden Emissionsszenarien, die Globalmodelle sowie die Regionalmodelle und ihre Eigenschaften (Auflösung und Downscaling-Methode).

Die für das Projekt ausgewählten Klimaprojektionen basieren auf zwei verschiedenen Emissionsszenarien, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Emissionsszenario SRES A1B:

Das Szenario SRES A1B gehört zur Familie der SRES-Szenarien (vgl. Kapitel 5.1). Es gilt als vergleichsweise gemäßigttes Emissionsszenario und liegt daher bezüglich seines anthropogenen Strahlungsantriebs im mittleren Bereich (Abbildung 5-2). SRES A1B

geht aus von einem sehr raschen Wirtschaftswachstum, einer Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung, der raschen Einführung neuer und effizienterer Technologien und einer ausgewogenen Nutzung aller Energiequellen.

RCP-Szenario RCP8.5:

Das Szenario RCP8.5 gehört zur Gruppe der RCP-Szenarien (vgl. Kapitel 5.1). Es geht von einem kontinuierlichen Anstieg der Treibhausgasemissionen durch eine wachsende Weltbevölkerung und einen steigenden Verbrauch fossiler Brennstoffe aus. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird ein Strahlungsantrieb von 8.5 W/m^2 erreicht (Abbildung 5-2). Das Szenario bildet eine Entwicklung ab, die wenig am Klimaschutz orientiert ist und wird deshalb auch als „Weiter-wie-bisher“-Szenario bezeichnet.

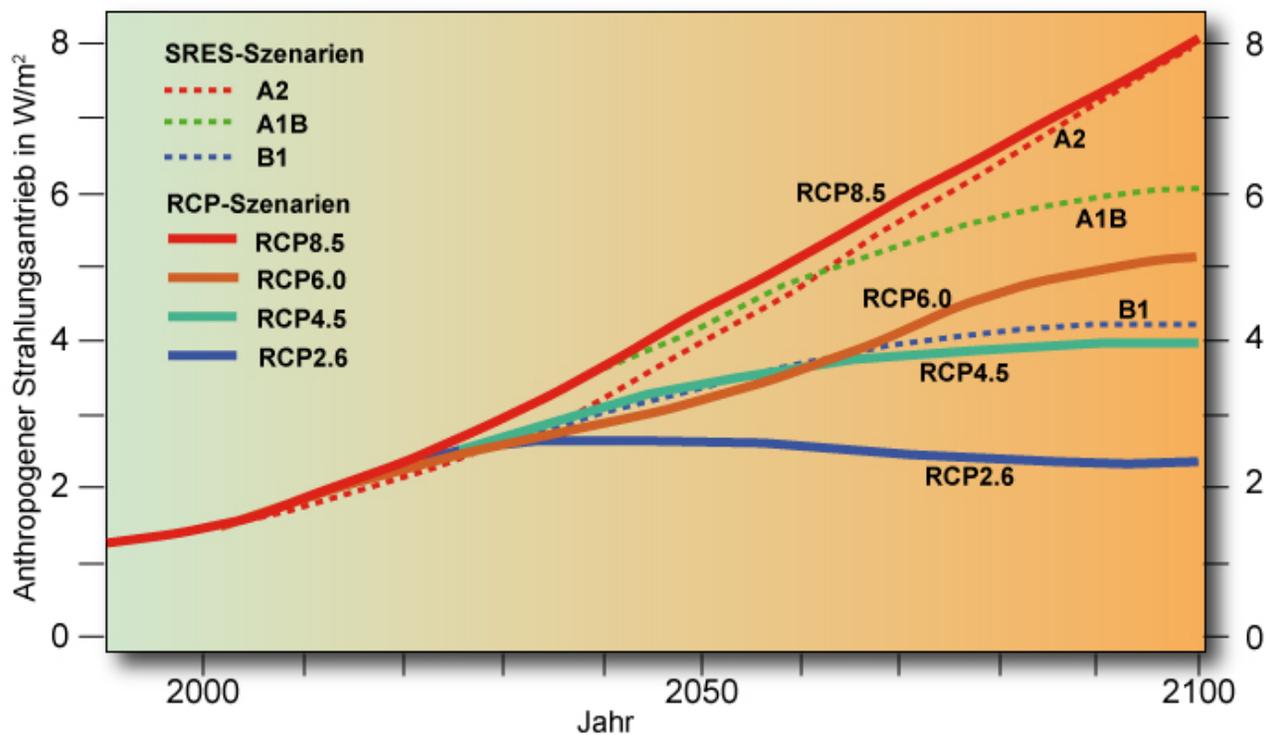


Abbildung 5-2: Die Szenarien der THG-Entwicklung im Vergleich (Hamburger Bildungsserver, 2017)



Die auf dem Emissionsszenario SRES A1B basierenden Regionalen Klimaprojektionen wurden primär im Rahmen des europäischen Projekts ENSEMBLES (Ensembles-based Predictions of Climate Changes and their Impacts) entwickelt und besitzen eine horizontale Auflösung von 25 km. Nähere Informationen dazu finden sich im Projektbericht (Van der Linden, P. & Mitchell, J.F.B., 2009). Die in KliBiW 4 verwendeten Klimaprojektionen wurden als Ergänzung zu ENSEMBLES für Deutschland erstellt, um vor allem der Impactmodellierung räumlich höher aufgelöste Modelldaten zur Verfügung stellen zu können. Für KliBiW 4 wurden sechs auf dem Szenario SRES A1B basierende Modellketten davon ausgewählt, wobei alle mit demselben Globalmodell ECHAM5 (Roeckner et al., 2003) angetrieben wurden. Die Regionalen Klimamodelle REMO (Jacob et al., 2008) und CLM (Rockel et al., 2008) verwenden eine dynamische, WETTREG (Spekat et al., 2007; Kreienkamp et al., 2010) eine statistische Regionalisierungsmethode.

Die auf dem RCP-Szenario RCP8.5 basierenden regionalen Klimaprojektionen wurden im Rahmen der Europäischen Initiative EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment for Europe) entwickelt und besitzen eine horizontale Auflösung von 0,11° (etwa 12,5 km). Nähere Informationen dazu finden sich z. B. in Jacob et al. (2013). Es erfolgte eine Regionalisierung von globalen Klimasimulationen aus dem fünften Sachstandsbericht des IPCC, die im Rahmen des Coupled Model Intercomparison Projects Phase 5 (CMIP5) entwickelt worden waren (Taylor et al., 2012). Für KliBiW 4 wurden acht auf dem Szenario RCP8.5 basierende Klimaprojektionen ausgewählt. Die Auswahl basierte auf den zum Start der Projektphase verfügbaren Klimamodellketten. Sie sind Kopplungen aus fünf globalen und vier regionalen Klimamodellen (Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Übersicht über die in KliBiW 4 verwendeten Klimamodelldaten

Globalmodell	Regionalmodell	Bezeichnung in KliBiW	Räumliche Auflösung	Downscaling-Methode	Projekt	Szenario der THG-Entwicklung
ECHAM5-Lauf1	WETTREG 2006	ECH5_W06	282 N-Stationen 60 KL-Stationen	statistisch	WETTREG	SRES A1B
ECHAM5-Lauf1	WETTREG 2010	ECH5_W10	440 N-Stationen 65 KL-Stationen	statistisch	WETTREG	SRES A1B
ECHAM5-Lauf1	REMO	ECH5_REMO-UBA	10 X 10 km (rotiertes Gitter)	dynamisch	ENSEMBLES*	SRES A1B
ECHAM5-Lauf2	REMO	ECH5_REMO-BfG	10 X 10 km (rotiertes Gitter)	dynamisch	ENSEMBLES*	SRES A1B
ECHAM5-Lauf1	COSMO-CLM	ECH5_CLM1	0,165 X 0,165 ° (~ 18x18 km)	dynamisch	ENSEMBLES*	SRES A1B
ECHAM5-Lauf2	COSMO-CLM	ECH5_CLM2	0,165 X 0,165 ° (~ 18x18 km)	dynamisch	ENSEMBLES*	SRES A1B
CNRM-CM5	RCA4	CNRM_RCA4	0,11 X 0,11 ° (~ 12,5X12,5km)	dynamisch	EURO-CORDEX	RCP8.5
EC-EARTH	HIRHAM5	ECE_HIRHAM5	0,11 X 0,11 ° (~ 12,5X12,5km)	dynamisch	EURO-CORDEX	RCP8.5
EC-EARTH	RACMO22E	ECE_RACMO22E	0,11 X 0,11 ° (~ 12,5X12,5km)	dynamisch	EURO-CORDEX	RCP8.5
EC-EARTH	RCA4	ECE_RCA4	0,11 X 0,11 ° (~ 12,5X12,5km)	dynamisch	EURO-CORDEX	RCP8.5
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	ESM_CCLM	0,11 X 0,11 ° (~ 12,5 X 12,5km)	dynamisch	EURO-CORDEX	RCP8.5
MPI-ESM-LR	RCA4	ESM_RCA4	0,11 X 0,11 ° (~ 12,5 X 12,5km)	dynamisch	EURO-CORDEX	RCP8.5
HadGEM2-ES	RCA4	HadGEM2_RCA4	0,11 X 0,11 ° (~ 12,5 X 12,5km)	dynamisch	EURO-CORDEX	RCP8.5
IPSL-CM5A-MR	RCA4	IPSL_RCA4	0,11 X 0,11 ° (~ 12,5 X 12,5km)	dynamisch	EURO-CORDEX	RCP8.5

*) Die Modellläufe von ECHAM5 mit den Regionalen Modellen CLM und REMO basieren grundsätzlich auf dem ENSEMBLES-Projekt, wurden aber für Deutschland (bzw. den deutschsprachigen Raum) in einer höheren horizontalen Auflösung berechnet



5.3 Regionalisierung der Modelldaten

Für die Simulation von klimatisch bedingten Veränderungen mittels Wirkmodellen, in diesem Fall mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen, werden als Eingangsgrößen u. a. Klimamodelldaten benötigt. Diese liegen je nach Modelltyp in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen und ggf. Koordinatensystemen vor. Die Daten dynamischer Klimamodelle (z. B. von EURO-CORDEX) liegen in der Regel als Rasterdaten mit einer horizontalen Auflösung zwischen etwa 10 und 50 km vor. Statistische Modelle (z. B. WETTREG) basieren auf beobachteten Stationsdaten und besitzen eine entsprechend unregelmäßige räumliche Verteilung (vgl. auch Kapitel 5.1). Um diese unterschiedlichen Datenstrukturen zu vereinheitlichen, werden sie in der Fläche interpoliert. Hierbei werden die Werte der einzelnen Klimavariablen für jeden Zeitschritt anhand ausgewählter Verfahren auf ein Raster mit der gewünschten räumlichen Auflösung umgerechnet. Im Folgenden werden diese Methoden für die Interpolation der statischen bzw. dynamischen Klimamodelldaten, die in KliBiW Phase 4 verwendet wurden, beschrieben.

5.3.1 Regionalisierung der Daten der statistischen Klimamodelle

Die Daten des regionalen statistischen Modells WETTREG basieren auf gemessenen Beobachtungsdaten von meteorologischen Niederschlags- und Klimastationen in Deutschland, die unregelmäßig im Raum verteilt vorliegen (vgl. Abbildung 5-3). Für die Regionalisierung dieser Daten im Zuge von KliBiW wurden für die Version WETTREG2006 insgesamt 282 Niederschlags- und 60 Klimastationen betrachtet, für die Version WETTREG2010 insgesamt 440 Niederschlags- und 65 Klimastationen. Die in diesem Zusammenhang zu interpolierenden Klimagrößen sind in Tabelle 5-2 aufgeführt. Um aus den unregelmäßig verteilten Stützpunkten der Stationsdaten ein regelmäßiges Raster zu interpolieren, wurden je nach Klimavariablen verschiedene Interpolationsverfahren angewendet. Zum einen handelt es sich hierbei um das Ordinary Kriging (OK), zum anderen um das External Drift Kriging (EDK). Die Verfahren wurden zuvor mittels Kreuzvalidierung hinsichtlich ihrer Interpolationsgüte anhand verschiedener Gütekriterien geprüft (vgl. Kapitel 3.2). Weitere Informationen hierzu sind in Haberlandt et al. (2015) zu finden. Die ausgewählten Verfahren sind in Tabelle 5-2 aufgeführt.

Die Interpolation der Klimagrößen erfolgte für alle Realisationen von WETTREG (20 bei WETTREG2006, 10 bei WETTREG2010) über den Zeitraum von 1961 bis 2100 auf ein 5x5 km Raster.

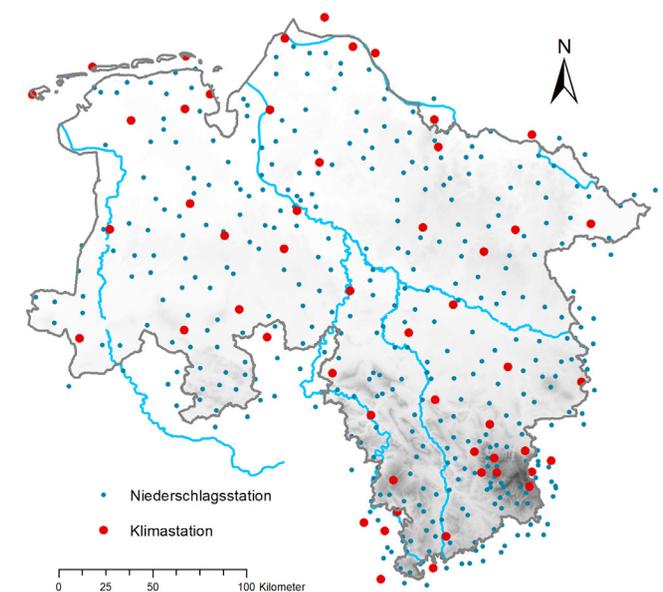
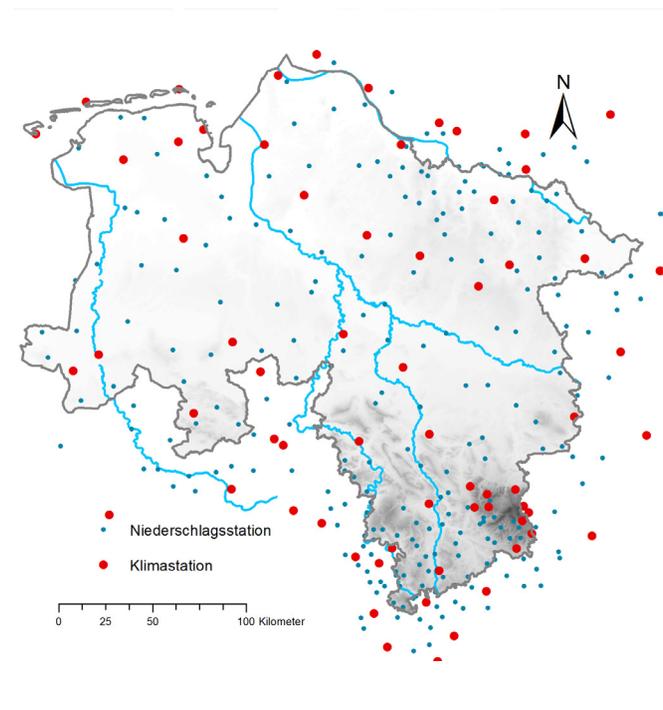


Abbildung 5-3: Lage der Stationen mit Zeitreihendaten des Niederschlags (RR) bzw. verschiedener Klimagrößen (KL) vor der Regionalisierung (oben: WETTREG2006, unten: WETTREG2010)



Tabelle 5-2: Klimagrößen von WETTREG und Interpolationsverfahren, die für die Umrechnung der Daten auf ein regelmäßiges Raster verwendet wurden (OK: Ordinary Kriging, EDK: External Drift Kriging mit digitalem Höhenmodell als Zusatzinformation)

Klimagröße	Einheit	Interpolationsverfahren WETTREG2006	Interpolationsverfahren WETTREG2010
Tagesniederschlagssumme	mm/d	OK	OK
Mittlere Tagestemperatur	°C	EDK	EDK
Maximale Tagestemperatur	°C	OK	EDK
Minimale Tagestemperatur	°C	OK	EDK
Relative Luftfeuchte	%	OK	EDK
Sonnenscheindauer	h/d	OK	EDK
Windgeschwindigkeit	m/s	OK	OK

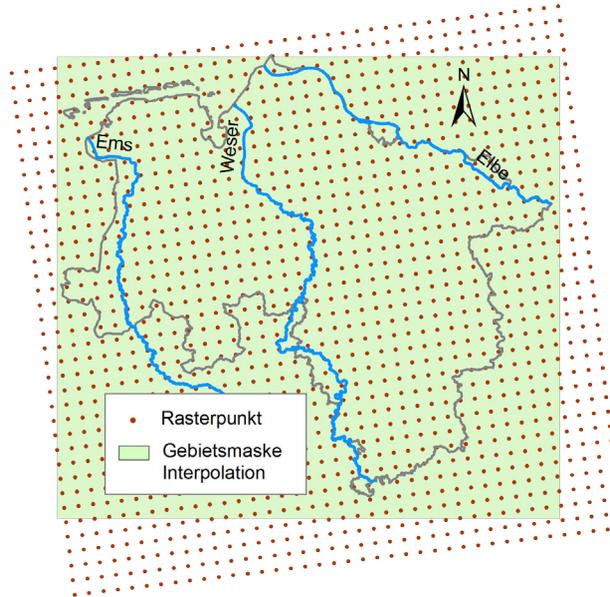
5.3.2 Regionalisierung der Daten der dynamischen Klimamodelle

Die Daten der im Projekt verwendeten regionalen dynamischen Klimamodelle, d.h. der Modellketten aus Global- und Regionalmodell, liegen im Original in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen vor (vgl. Abbildung 5-4). Alle Datensätze weisen ein regelmäßiges Raster auf, dessen Rasterzellen jedoch je nach Modell unterschiedliche Ausdehnungen und z.T. unterschiedliche Koordinatensysteme besitzen. Die Daten des mit ECHAM5 angetriebenen Regionalmodells REMO (Szenario SRES A1B) besitzen eine Rasterweite von 10x10 km und liegen in einem rotierten Kugelkoordinatensystem vor, d.h. der Äquator des geographischen Gitters verläuft durch das Modellgebiet. Die Daten des ebenfalls mit ECHAM5 angetriebenen Regionalmodells CLM (Szenario SRES A1B) besitzen eine Rasterweite von etwa 18x18 km und liegen in einem nicht-rotierten geographischen Koordinatensystem vor. Sämtliche Modelldaten aus dem EURO-CORDEX Projekt (Szenario RCP8.5) besitzen eine Rasterweite von etwa 0,11° (12,5x12,5 km) und liegen wiederum auf einem rotierten Kugelkoordinatensystem vor. Das Ziel dieser Regionalisierung war es zum einen, die Klimamodelldaten in ein einheitliches Koordinatensystem zu überführen, in diesem Fall in das kartesische Gauß-Krüger-System. Zum anderen sollten alle Datensätze eine einheitliche Ausdehnung und Auflösung erhalten. Zu diesem Zweck erfolgte eine räumliche Interpolation aller Datensätze und aller Klimavariablen auf Tageswertbasis über den

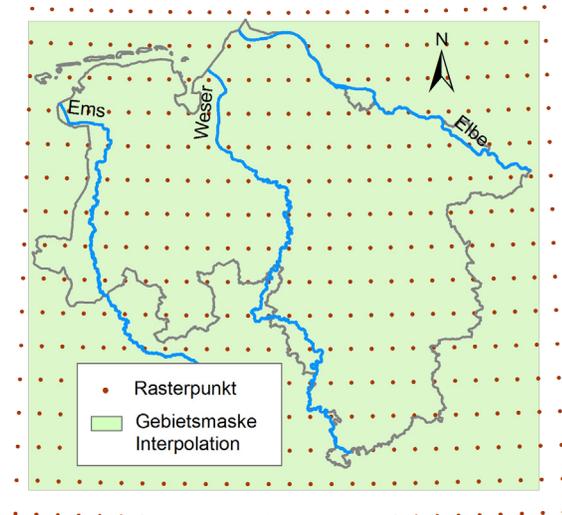
Zeitraum 1971 bis 2100 auf ein 10x10 km Raster (siehe Abbildung 5-4). Die Werte des neuen Rasters wurden mittels Inverser Distanz in Form des Quadrantenverfahrens berechnet. Dabei ergibt sich der (Tages-)Wert an einem (neuen) Rasterpunkt aus den gewichteten Mitteln benachbarter Punkte. Die Gewichte sind dabei umgekehrt proportional zum Abstand zwischen dem bekannten und dem zu interpolierenden Rasterpunkt, d.h. je weiter entfernt ein (originaler) Punkt von dem gesuchten (neuen) Punkt liegt, desto weniger Einfluss hat sein Wert bei der Interpolation des Wertes für den neuen Punkt. Hierbei wurden die Werte der Klimavariablen in den jeweiligen Mittelpunkten der Rasterzellen angenommen. Die Ergebnisse wurden anschließend visuell auf Plausibilität geprüft, indem für jede Klimavariablen die Rasterwerte vor und nach der Interpolation, über 30jährige Zeiträume gemittelt, verglichen wurden (Abbildung 5-5). Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Werte aus den Originalrastern aufgrund der gewählten Interpolationsmethode geglättet werden können, was besonders bei lokal auftretenden Extremwerten zu einer Abschwächung führt. Auf die Anwendung komplexerer Interpolationsverfahren, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wurde verzichtet, da alle Daten bereits auf einem regelmäßigen Raster mit relativ geringer Rasterweite vorlagen. Die Ausdehnung des Datenfensters wurde so festgelegt, dass die Rasterpunkte Niedersachsen komplett abdecken.



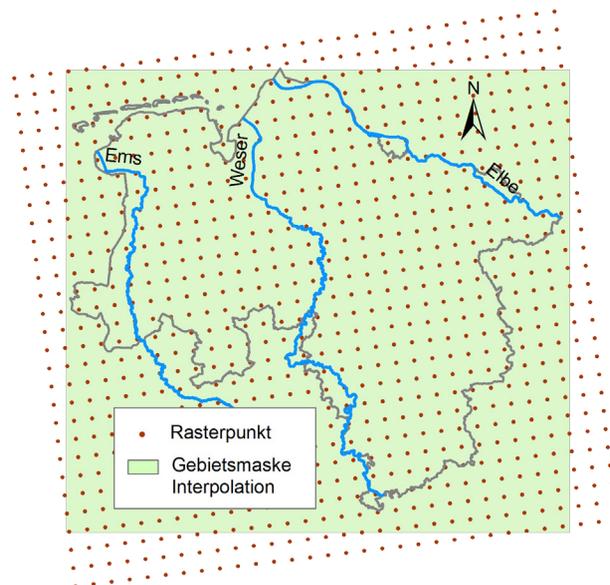
Raster ECHAM5/REMO



Raster ECHAM5/CLM



Raster EURO-CORDEX



Raster nach Interpolation

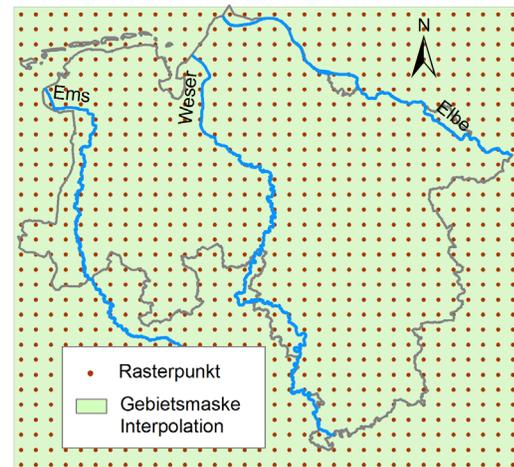


Abbildung 5-4: Lage der Gitterpunkte der regionalen dynamischen Klimamodelle (oben links: ECHAM5/REMO auf rotiertem 10x10 km Raster, oben rechts: ECHAM5/CLM auf nicht-rotiertem 18x18 km Raster, unten links: EURO-CORDEX Modellläufe auf rotiertem 12,5x12,5 km Raster, unten rechts: Lage der Gitterpunkte aller Modellläufe nach der Interpolation auf 10x10 km Raster)



Raster Original

Raster interpoliert

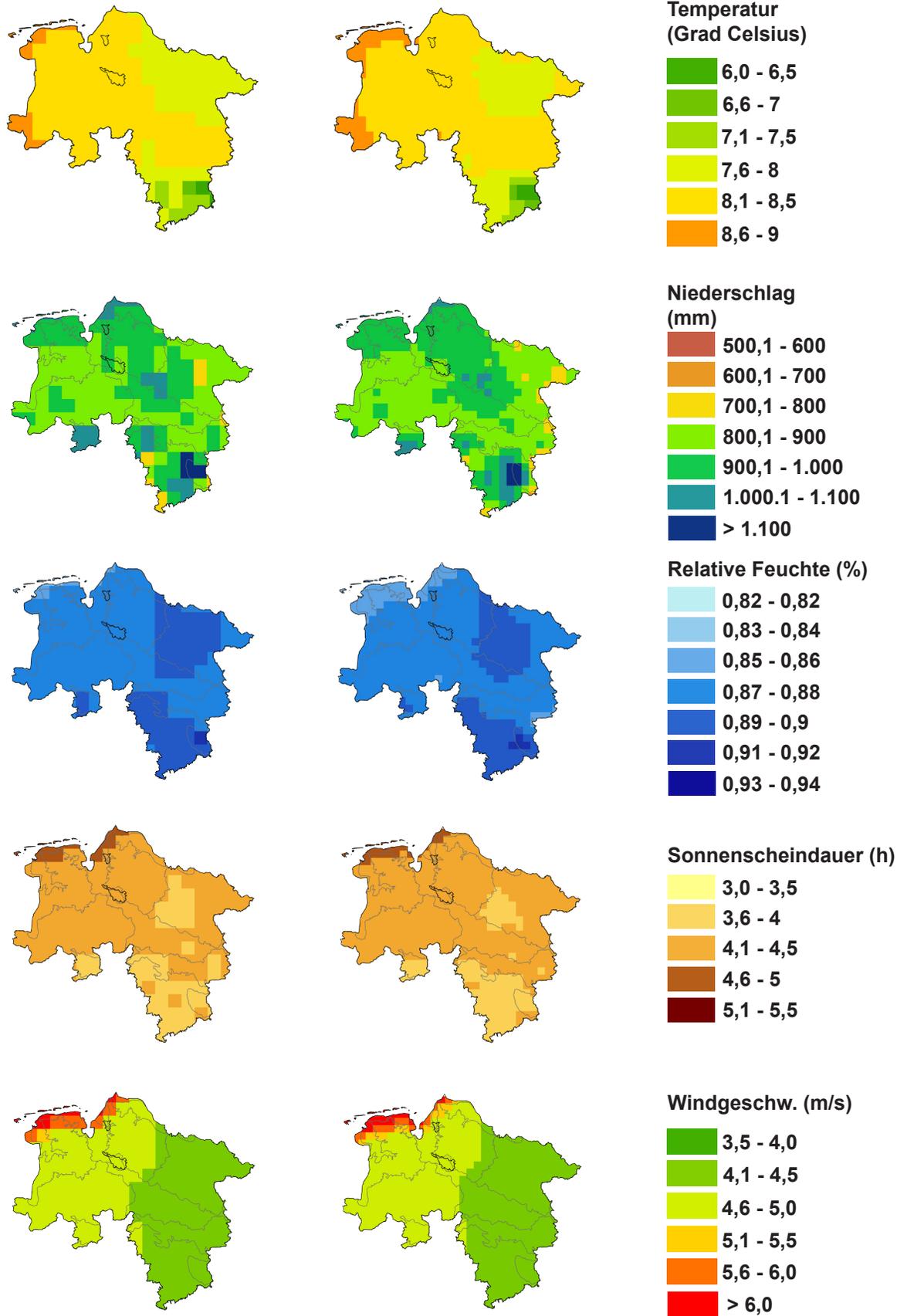


Abbildung 5-5: Plausibilisierung der interpolierten Klimamodelldaten am Beispiel der Modellkette ECHAM5-Lauf1_CLM (SRES); alle Klimagrößen gemittelt über den Zeitraum 1971-2000



5.4 Auswahl von WETTREG-Realisationen für die Simulationen im Wasserhaushaltsmodell

Das WETTREG-Modell stellt ein Regionalisierungsverfahren dar, das die statistischen Zusammenhänge zwischen großräumigen Wetterlagen und dem lokalen Klimageschehen analysiert. Das Ergebnis sind verschiedene Realisationen, die eine (annähernd) repräsentative Stichprobe der Grundgesamtheit möglicher Klimaentwicklungen entsprechend dem Modell darstellen. Um diese Entwicklungen auch in einem Impaktmodell zu verdeutlichen, müssten alle Realisationen (WETTREG2006: 20, WETTREG2010: 10) mit dem Modell simuliert werden. Dies würde aufgrund der komplexen Natur hydrologischer Modelle einen hohen Zeit- und Ressourcenaufwand bedeuten. Zur Verringerung dieses Aufwandes haben sich die Projektpartner von KliBiW darauf verständigt, jeweils drei Realisationen des jeweiligen Modells (WETTREG2006 bzw. WETTREG2010) in den beiden Impaktmodellen (PANTA RHEI und HBV-IWW) anzuwenden: eine tendenziell eher nasse, eine mittlere und eine tendenziell eher trockene Realisation. Die drei ausgewählten Realisationen sollen die Bandbreite aller Realisationen der jeweiligen WETTREG-Variante (2006 bzw. 2010) im Hinblick auf die wesentlichen, für Hochwasser besonders relevanten Klimagrößen möglichst gut wiedergeben. In die weiteren Analysen floss jeweils der Mittelwert aus den drei gewählten Realisationen als Wert für das WETTREG-Modell (2006 bzw. 2010) ein. Zur Auswahl der drei genannten Realisationen je Modell wurde folgende Vorgehensweise von der Lenkungsgruppe in KliBiW abgestimmt:

- Ermittlung von Gebietsmittel-Zeitreihen des Niederschlages für alle betrachteten Einzugsgebiete (ALO, Große Aue, Hase, Hunte, Ilmenau, Vechte, Wümme)
- Betrachtung des zukünftigen mittleren Jahresniederschlages je Gebiet für die Eingruppierung aller Realisationen in die drei Kategorien (nass, mittel, trocken)
- zusätzliche Betrachtung des zukünftigen 95%-Quantils des Jahresniederschlages je Gebiet für die Auswahl der „nassen“ Realisation
- Analyse der Änderungssignale für den Zeitraum 2071-2100 gegenüber 1971-2000 für den mittleren Jahresniederschlag und das 95%-Quantil des Jahresniederschlages
- Ranking der Realisationen entsprechend der ermittelten Änderungssignale (gemittelt über alle Gebiete)

Als Ergebnis der Analysen wurden jeweils drei Realisationen aus WETTREG für die weitere Impakt-Modellierung ausgewählt (vgl. Tabelle 5-3). Dabei tragen die 20 Realisationen von WETTREG2006 die Bezeichnungen R01, R02 usw. bis R20 und die 10 Realisationen von WETTREG2010 die Bezeichnungen R00, R11 usw. bis R99.

Tabelle 5-3: Auswahl einer tendenziell jeweils nassen, mittleren und trockenen Realisation der beiden WETTREG-Modelle für die Impaktmodellierung im Wasserhaushaltsmodell

Kategorie	WETTREG2006	WETTREG2010
nass	R17	R22
mittel	R13	R00
trocken	R11	R55



Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass aufgrund der beschriebenen Herangehensweise ein objektiv eindeutiges Ranking für alle Betrachtungs(räume nicht möglich ist. Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 verdeutlichen diesen Sachverhalt am Beispiel der 20 Realisationen von WETTREG2006 bzw. der 10 Realisationen von WETTREG2010 für die Jahres-Niederschlagssumme (Psum). Während in Abbildung 5-6 die Realisation 17 für die vier betrachteten Einzugsgebiete im Zeitraum 2071 – 2100 eines der größten positiven Änderungssignale aufweist, ist die Realisation 11 nur für die Gebiete der Hase und Hunte trockener als die Realisation 13. Abbildung 5-7 zeigt dagegen, dass bei WETTREG2010 die gewählte Klassifikation der Realisationen prinzipiell bei allen vier Betrachtungsräumen

gültig ist. Allerdings gab es bei der Auswertung der Analysen keine Realisation, die in allen Gebiete durchgängig zu der Kategorie der nassen, mittleren bzw. trockenen Läufe zählte. Würde man diese Einschätzung noch auf saisonale Tendenzen erweitern, würde eine eindeutige Zuordnung letztlich unmöglich werden.

Anhand des beschriebenen Auswahlverfahrens sollte deshalb lediglich jeweils eine im Grundsatz tendenziell eher nasse, mittlere bzw. trockene Realisation aus allen Realisationen des Modells identifiziert werden, um die charakteristische Bandbreite aller Entwicklungen dieses Modells mit wenig Aufwand zu erfassen und im Wasserhaushaltsmodell modellieren zu können.

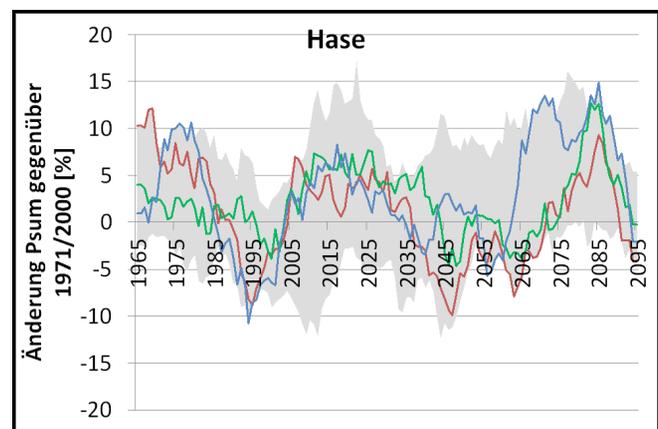
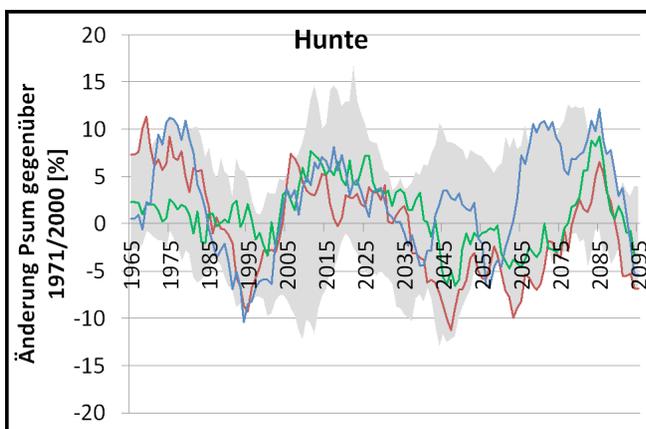
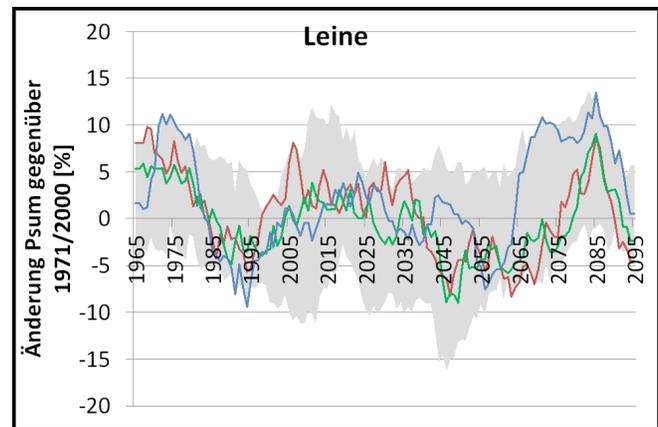
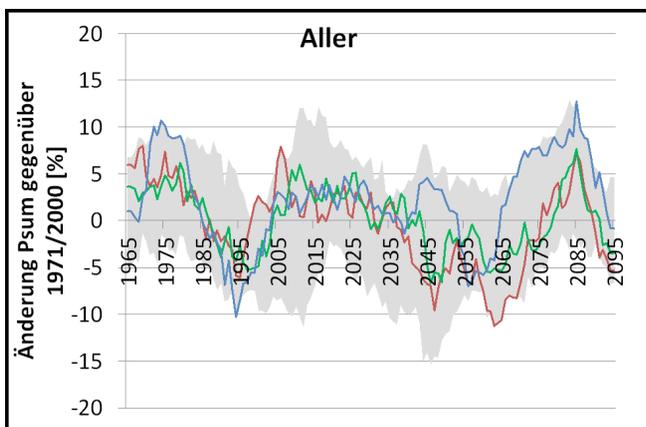


Abbildung 5-6: Auswahl einer tendenziell nassen, mittleren und trockenen Realisation von WETTREG2006 anhand der Änderungssignale gegenüber dem 30jährigen Mittel des Zeitraumes 1971-2000 für den Jahresniederschlag aus allen 20 Realisationen, jeweils gemittelt für die Einzugsgebiete von Aller, Leine, Hase und Hunte

- Bandbreite
- 20 Realisationen
- R11 (tro)
- R13 (mit)
- R17 (feu)

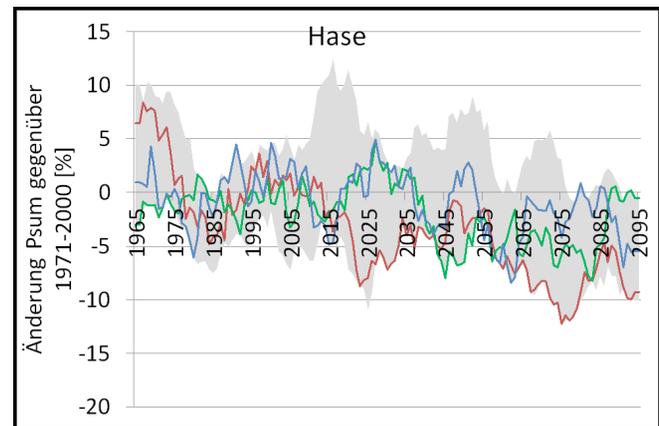
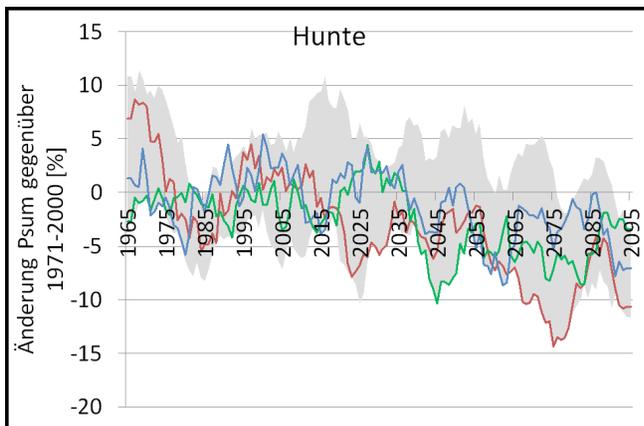
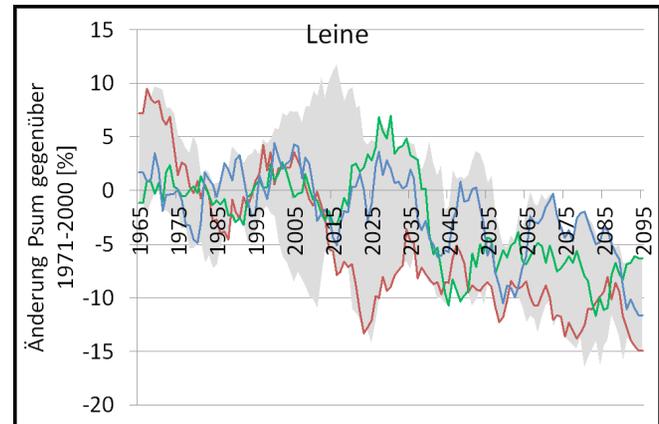
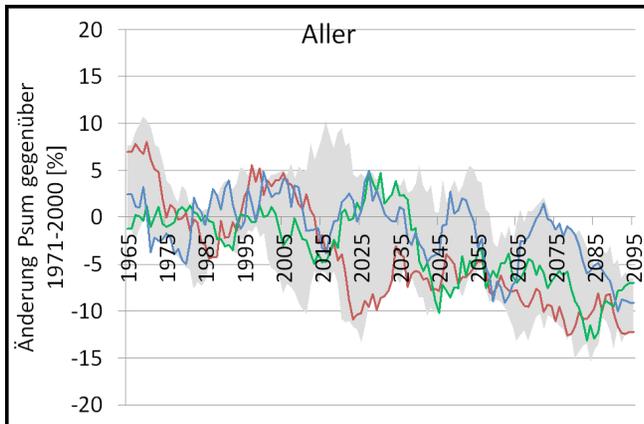


Abbildung 5-7: Auswahl einer tendenziell nassen, mittleren und trockenen Realisation von WETTREG2010 anhand der Änderungssignale gegenüber dem 30jährigen Mittel des Zeitraumes 1971-2000 für den Jahresniederschlag aus allen 10 Realisationen, jeweils gemittelt für die Einzugsgebiete von Aller, Leine, Hase und Hunte

■ Bandbreite
 ■ 10 Realisationen
 ■ R55 (tro)
 ■ R00 (mit)
 ■ R22 (feu)

5.5 Validierung der Klimamodelldaten anhand von Beobachtungsdaten

Die Verlässlichkeit der Ergebnisse aus der Wirkmodellierung, sei es für gegenwärtige oder zukünftige Verhältnisse, hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Bei der Wasserhaushaltsmodellierung zählt hierzu u. a. die Fähigkeit des Modells, mit gemessenen Klima-Eingangsdaten (z. B. Temperatur, Niederschlag) die beobachteten Abflüsse an den Pegeln nachzubilden, sofern die Messdaten korrekt sind. In gleicher Weise wird davon ausgegangen, dass ein Modell mit plausiblen zukünftigen Klimadaten die zukünftigen Abflüsse „realitätsnah“ simulieren kann. Ein Kriterium, das in diesem Zusammenhang an Klimamodelldaten bzgl. deren Verlässlichkeit gestellt wird, ist, dass sie in der Lage sein sollten, die klimatischen Verhältnisse der Gegenwart im Mittel repräsentativ darzustellen. Allerdings kann umgekehrt nicht der Schluss gezogen werden, dass ein Klimamo-

dell, welches nicht in der Lage ist, die gegenwärtigen Verhältnisse in ausreichend guter Weise nachzubilden, grundsätzlich ungeeignet erscheint, Aussagen für die Zukunft zu ermöglichen, sofern die Daten physikalisch konsistent und plausibel erscheinen (vgl. Linke et al., 2015).

5.5.1 Methode

Der Vergleich der Klimamodelldaten mit denen der Beobachtung erfolgte in KliBiW auf zwei räumlichen Betrachtungsskalen. Zum einen wurden die Daten für ganz Niedersachsen auf Basis des 10x10 km Rasters der regionalisierten Klimagrößen flächendifferenziert betrachtet. Hierzu wurden die regionalisierten Beobachtungsdaten von ihrem ursprünglichen 1x1 km Raster auf die Rasterweite von 10x10 km der Modelldaten umgerechnet. Zum anderen wurde je eine Gebietsmittel-Zeitreihe für jedes der sieben betrachteten Einzugs-



gebiete (Kapitel 2.2) aus den regionalisierten Daten (Beobachtung und Modell) gebildet. Als Vergleichszeitraum wurde die Periode 1971-2000 festgelegt, in Anlehnung an den Referenzzeitraum für die Identifikation der zukünftigen Änderungssignale (s. Kapitel 6.2). Der Vergleich von Beobachtung und Modell fand auf Basis von Tageswerten für das Gesamtjahr und die einzelnen Jahreszeiten statt. Da die Kalibrierung bzw. Validierung der hydrologischen Modelle, die für die Simulation der zukünftigen Abflüsse genutzt wurden, auf Basis von Niederschlagsdaten ohne eine Korrektur nach Richter (1995) erfolgte (vgl. Kapitel 7.1 und Kapitel 7.3), wurden auch die Klimamodelldaten im Fall der betrachteten Niederschlagskenngößen den beobachteten Zeitreihen ohne Richter-Korrektur bei der Validierung gegenübergestellt.

Die analysierten klimatischen Kenngößen sind in Tabelle 5-4 dargestellt.

Als Maß für die Modellgüte, d.h. die Einschätzung, wie gut die Modelle die Beobachtung wiedergeben können, wurde die absolute bzw. prozentuale Abweichung (Bias) zwischen Modell und Beobachtung als Mittel über den 30-jährigen Zeitraum für jede Zeitreihe (Rasterzelle bzw. Teilgebiet) berechnet. Zusätzlich wurde bei den flächendifferenzierten Auswertungen mit Hilfe des Wilcoxon-Mann-Whitney-Tests (kurz U-Test) geprüft, ob die ermittelten Abweichungen zwischen Modell und Beobachtung statistisch signifikant sind oder ob sie innerhalb der Bandbreite der natürlichen Klimaschwankungen liegen und somit das Modell die „Realität“ ausreichend gut wiedergeben kann. Für den Test wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ angenommen.

Tabelle 5-4: Betrachtete Klima-Kenngößen bei der Validierung der Klimamodelldaten

Klimakenngröße	Beschreibung	Einheit
Tav	Tagesmitteltemperatur	°C
Psum	Summe der Niederschläge für Tage mit $N \geq 1$ mm/d	mm
Pq90	90 %-Quantil der Tagesniederschläge (für Tage mit $N > 1$ mm/d)	mm/d
Pxcd	Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Tage mit $N < 1$ mm/d)	d



5.5.2 Ergebnisse

Abbildung 5-8 bis Abbildung 5-11 stellen die flächendifferenzierte Gegenüberstellung der Kenngrößen mittlere Tagestemperatur (Tav) und mittlere Niederschlagssumme (Psum) auf Basis der 10x10 km Raster der regionalisierten Klimamodelldaten dar.

Beim Vergleich der Tagesmitteltemperaturen der Klimamodelle in Abbildung 5-8, die aus dem 4. Sachstandsbericht des IPCC (IPCC, 2007) stammen (SRES-Modellketten), fällt auf, dass die Modellketten mit dem regionalen dynamischen Modell CLM die beobachteten Temperaturen in weiten Teilen von Niedersachsen um etwa $-0,5$ bis $-1,5^{\circ}\text{C}$ unterschätzen (Cold-Bias). Auffällig sind hierbei der Osten und Süden von Niedersachsen sowie besonders der Südharz. Im Gegensatz dazu überschätzen die Modellketten mit dem regionalen dynamischen Modell REMO die Temperaturen im Herbst und z.T. im Frühling flächig um rund $+0,5$ bis $+1,5^{\circ}\text{C}$ (Warm-Bias). Besonders der Nordharz fällt hierbei durch Abweichungen mit z.T. über $+2,0^{\circ}\text{C}$ auf. Die Modellketten mit dem statischen regionalen Modell WETTREG weisen erwartungsgemäß kaum Abweichungen zur Beobachtung auf. Dies liegt vor allem daran, dass diese Modelle sich bei der Ableitung regionaler Klimaverhältnisse im Wesentlichen an statistischen Zusammenhängen der beobachteten Daten von Klimastationen orientieren (vgl. Kapitel 5.1). Abbildung 5-9 zeigt den gleichen Sachverhalt für die Klimamodelle aus dem 5. Sachstandsbericht des IPCC (IPCC, 2013) (RCP-Modellketten aus EURO-CORDEX). Hier zeigen viele der Modellketten einen flächenhaften Cold-Bias mit einem leichten Nord-Süd-Gefälle. Dieser liegt nicht selten unter $-1,0^{\circ}\text{C}$ und vereinzelt, vor allem im Südharz, sogar unter $-2,0^{\circ}\text{C}$. Die Gründe für die aufgezeigten Abweichungen sind im Wesentlichen modellspezifisch und können an dieser Stelle im Einzelnen nicht geklärt werden. Auffällig ist aber, dass die Abweichungen häufiger bzw. deutlicher im Frühling / Sommer auftreten, seltener im Winter. Außerdem scheint die Simulation der Temperaturen im Bereich des Harzes über alle Modelle und alle Saisons schwierig, was u. a. vermutlich mit der räumlichen Auflösung der Modelle einerseits und der geringen Stationsdichte mit Beobachtungsdaten in diesem Bereich andererseits zu tun haben kann.

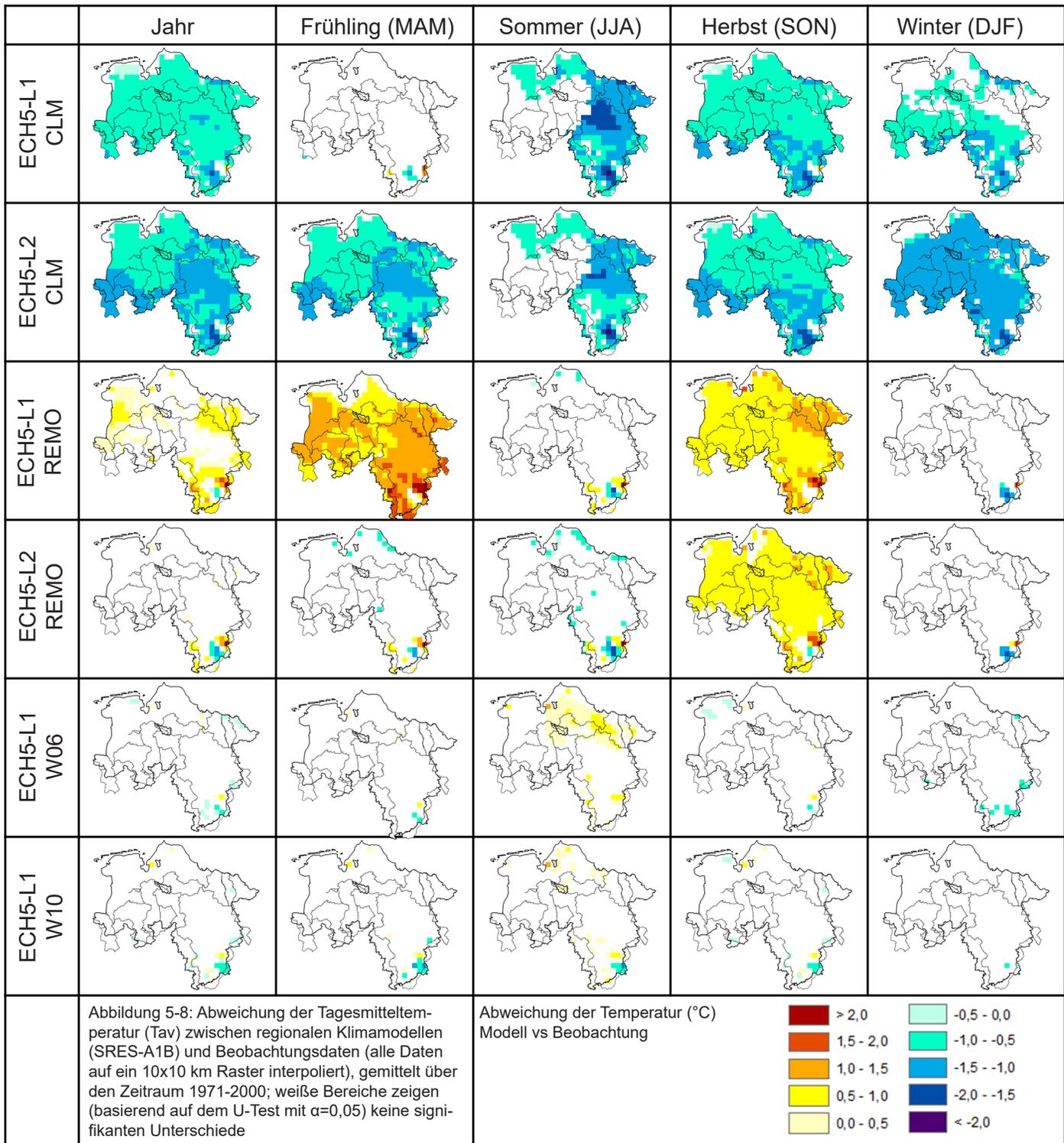
Abbildung 5-10 zeigt die Abweichungen der Niederschlagssummen für die SRES-Modelle. Während die beiden CLM-Modellketten die mittleren Niederschlagsmengen vor allem im östlichen bzw. südöstlichen Niedersachsen deutlich überschätzen (bis zu $+50\%$), ist bei den beiden REMO-Modellketten das nördliche Niedersachsen mit den Küstenbereichen auffällig (ebenfalls bis $+50\%$). Beide regionalen dynamischen Modelle zeigen zudem vor allem im Sommer bzw. Gesamtjahr und im Bereich des Harzes deutliche Abweichungen von der Beobachtung. Das regionale statistische Modell WETTREG zeigt erwartungsgemäß wiederum praktisch keine signi-

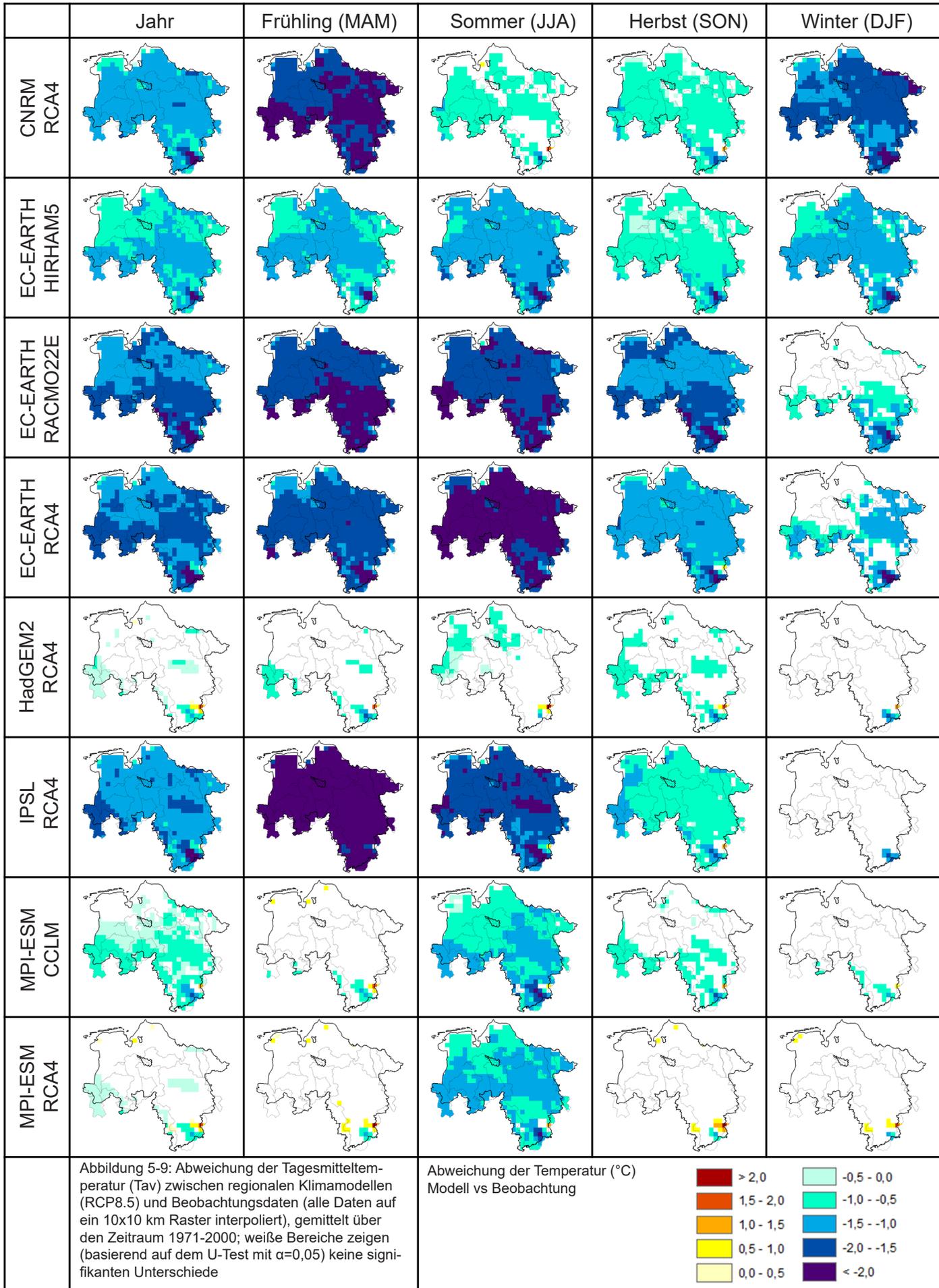
fikanten Abweichungen von der Beobachtung. Abbildung 5-11 zeigt den gleichen Sachverhalt für die RCP-Modelle. Auch diese überschätzen den Niederschlag im Vergleich zur Beobachtung in den meisten Fällen erheblich, häufig sogar deutlicher ($> +50\%$) als die dynamischen SRES-Modelle. Räumliche oder saisonale Muster sind dabei kaum zu erkennen, lediglich die Niederschläge im Südharz werden bei allen Modellen fast gleichermaßen überschätzt. Die Modellketten mit dem Regionalmodell RCA4 zeigen zumeist flächenhaft die größten Abweichungen, unabhängig vom antreibenden Globalmodell.

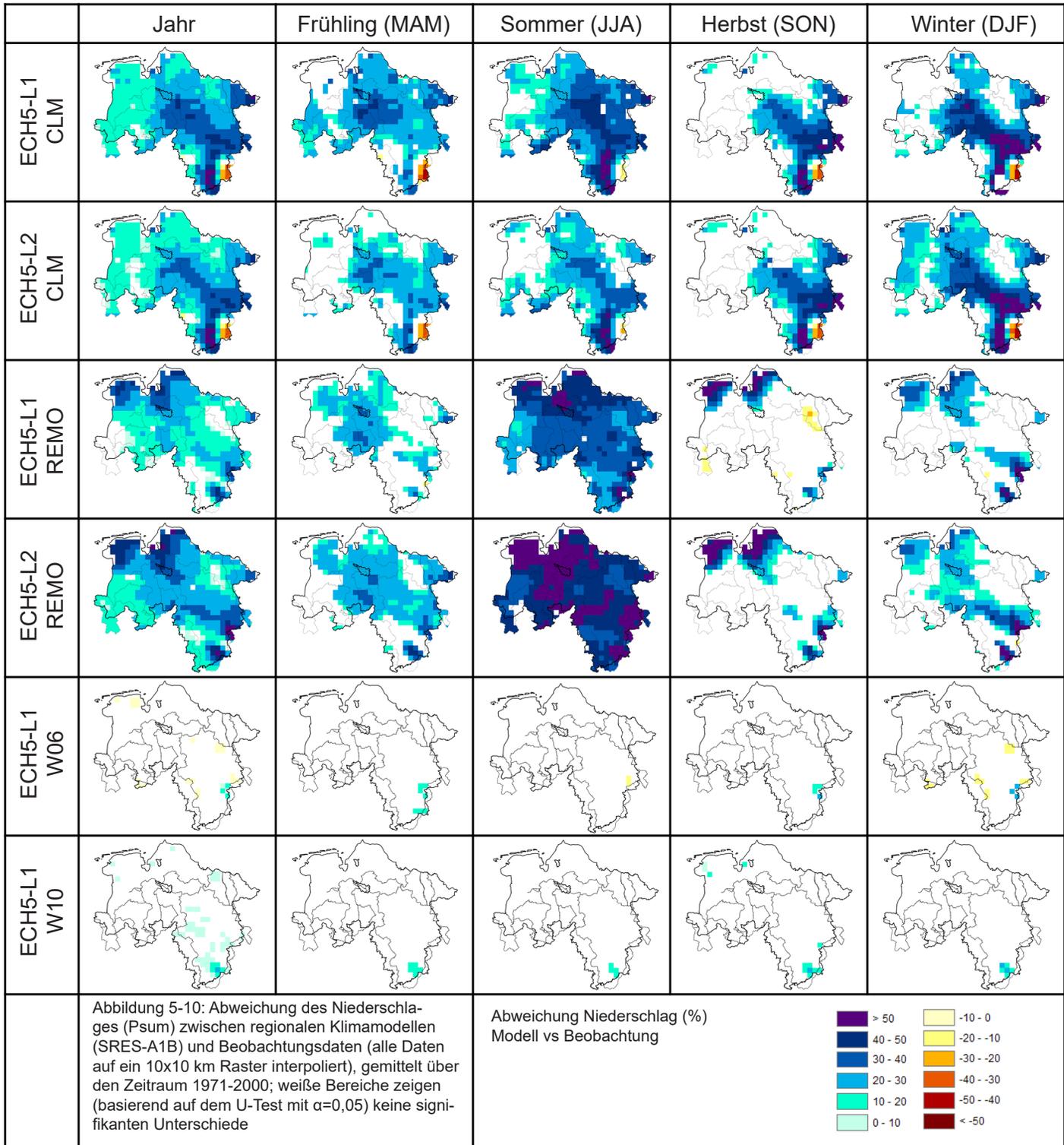
In Abbildung 5-12 sind die Abweichungen von beiden Modellgruppen beim 90%-Quantil der Niederschläge, also bei größeren Niederschlagsereignissen, dargestellt. Auf der linken Seite (SRES-Modelle) ist zu erkennen, dass die dynamischen Regionalmodelle (CLM und REMO), angetrieben durch das Globalmodell ECHAM5, diese Kenngröße in Bezug auf die Beobachtung grundsätzlich überschätzen. CLM weist dabei Abweichungen auf, die wenigstens $+10\%$ betragen und vor allem in den östlichen bzw. südöstlichen Einzugsgebieten und im Sommer $+20\%$ und mehr erreichen können. Die Abweichungen bei REMO sind im Winter etwas geringer (-10 bis $+10\%$), im Sommer etwas größer ($+20$ bis $+30\%$). Die Abweichungen von WETTREG sind erwartungsgemäß gering (ca. -5 bis $+5\%$). Auf der rechten Seite zeigt sich, dass die Überschätzungen der RCP-Modelle insgesamt etwas größer ausfallen als bei den SRES-Modellen (meist 0 bis $+40\%$), vor allem im Sommer (bis $+60\%$).

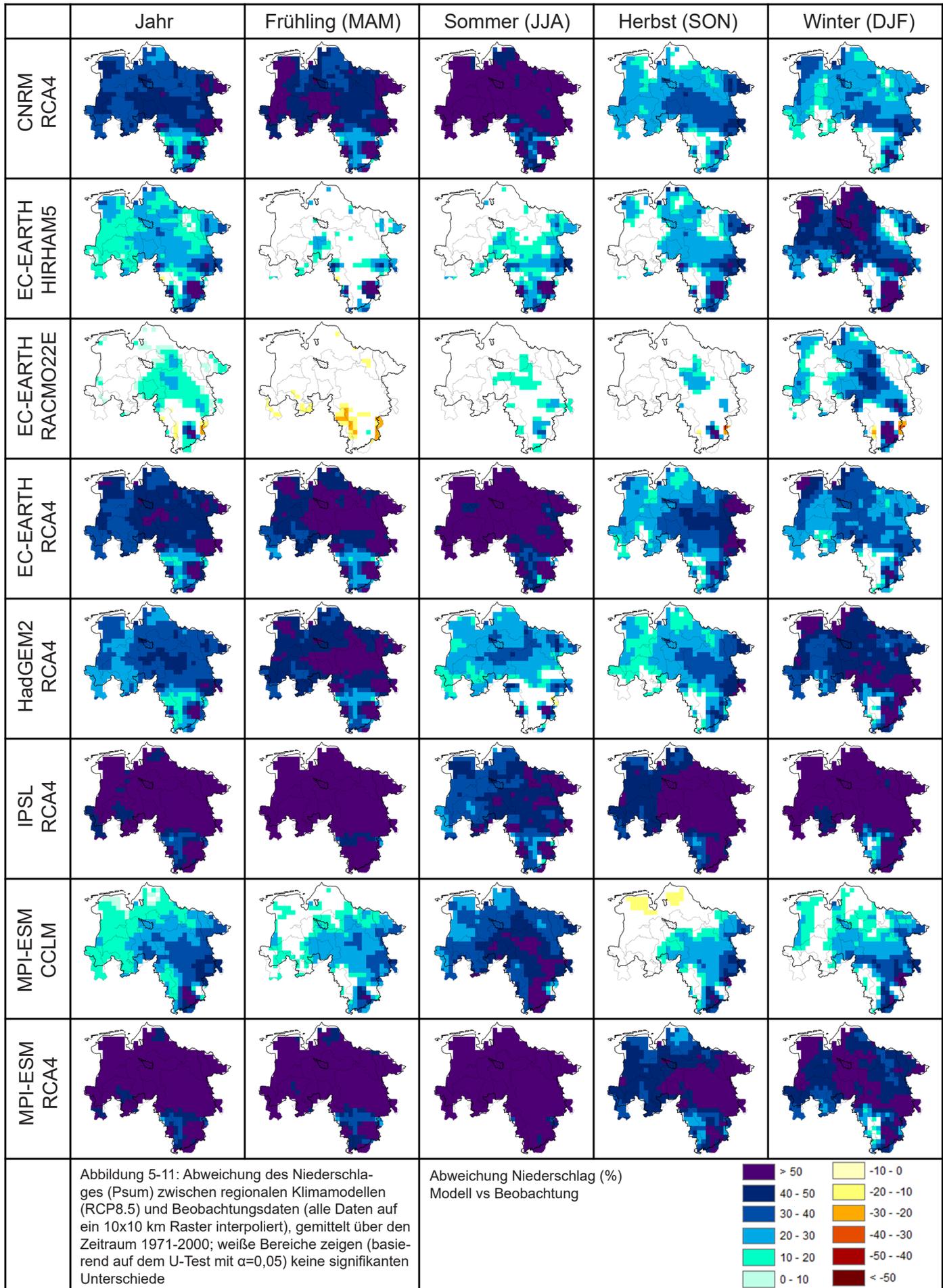
Auffällig sind speziell die Modellketten mit dem Regionalmodell RCA4, die häufig das obere Drittel der Bandbreite abbilden. Insgesamt scheinen auch hier die Verhältnisse in den östlichen bzw. südöstlichen Gebieten schlechter dargestellt zu werden.

Die Abbildung 5-13 zeigt die Abweichungen der Modelldaten bzgl. der maximalen Anzahl aufeinander folgender Trockentage. Diese wird von den SRES-Modellen (links) häufig unterschätzt. CLM weist hier im Jahresmittel Abweichungen von -10 bis -20% auf, im Sommer / Winter gebietsweise sogar bis zu knapp -40% . REMO liegt im Jahresmittel bei etwa 0 bis -20% , unterschätzt den Sommer etwas stärker und den Winter etwas weniger als CLM. Auffällig gegenüber den bisher betrachteten Kenngrößen ist, dass WETTREG (2010) bei der maximalen Trockendauer ebenfalls Unterschätzungen aufweist, die unterhalb von -10% liegen. Die Bandbreite der Abweichungen bei den RCP-Modellen ist deutlich größer als bei den SRES-Modellen. Die Werte liegen zwischen etwa 0 und rund -50% , mit den größten Abweichungen im Winter. Auch hier ist zu bemerken, dass die Modellketten mit dem Regionalmodell RCA4 die größten Abweichungen aufweisen (meist die unteren 50% der gesamten Bandbreite aus allen Modellen).











Pq90

SRES-Modelle (20C)

RCP-Modelle (20C)

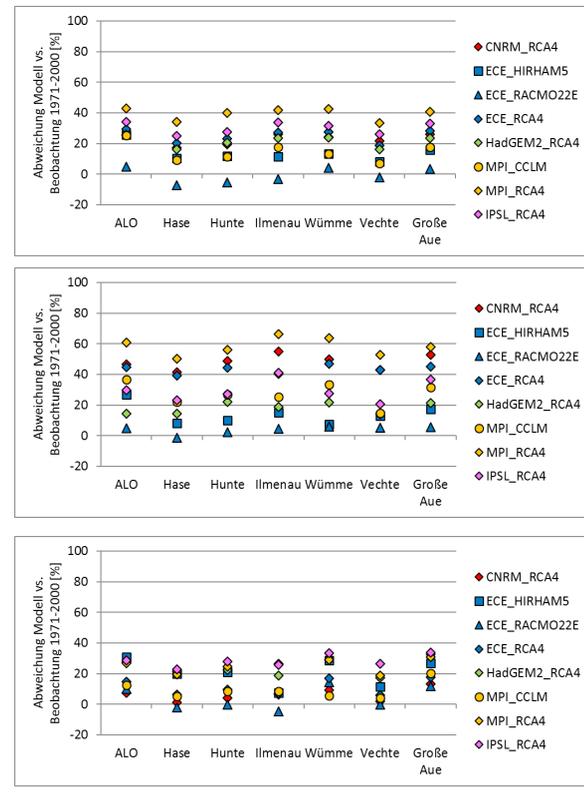
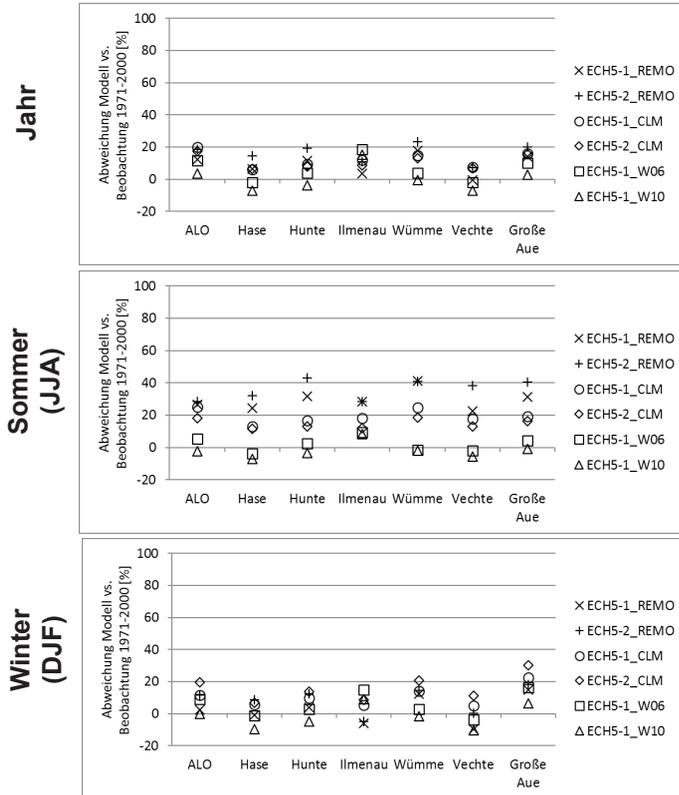


Abbildung 5-12: Abweichungen zwischen Klimamodelldaten und Beobachtung beim 90%-Quantil des Niederschlages auf Basis der jeweiligen Gebietsmittel der 7 Einzugsgebiete, gemittelt für den Zeitraum 1971-2000

Pxcd

SRES-Modelle (20C)

RCP-Modelle (20C)

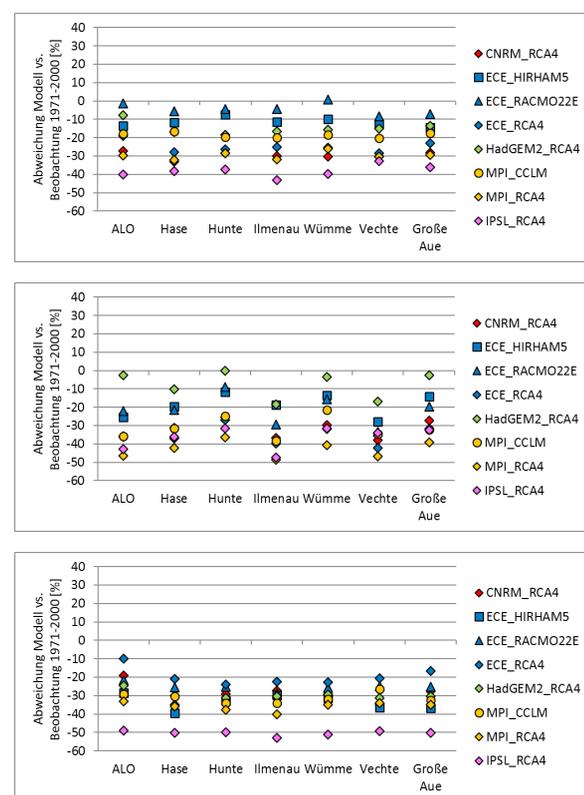
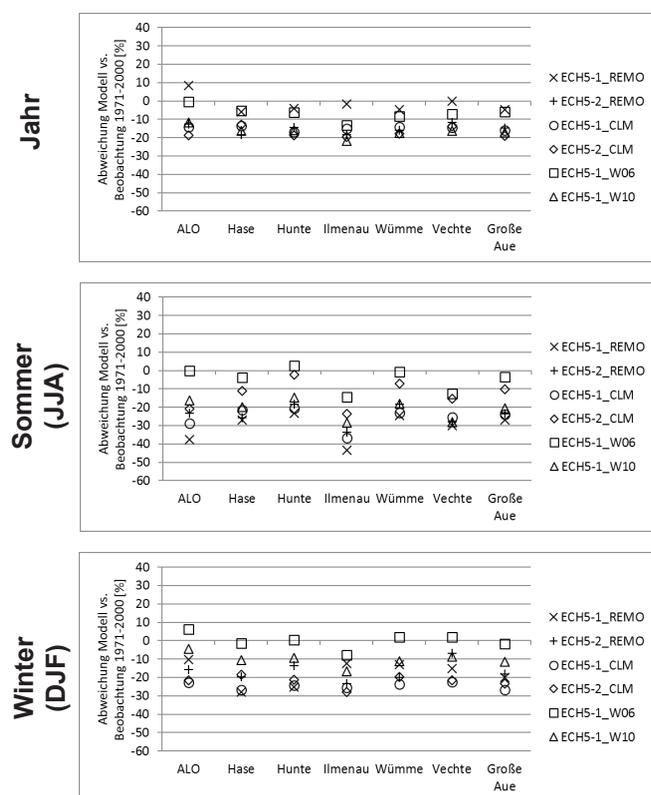


Abbildung 5-13: Abweichungen zwischen Klimamodelldaten und Beobachtung bei der max. Anzahl aufeinander folgender Trockentage auf Basis der jeweiligen Gebietsmittel der 7 Einzugsgebiete, gemittelt für den Zeitraum 1971-2000



5.5.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Gegenüberstellung von klimatischen Modell- und Beobachtungsdaten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei der mittleren Temperatur neigen die meisten Modellketten zu einer (signifikanten) Unterschätzung der Beobachtung (Cold-Bias) in einer Größenordnung von $-0,5$ bis $-2,0^{\circ}\text{C}$ (Ausnahme: ECHAM5_REMO bei den SRES-Modellen).
- Die Abweichungen bei der Temperatur zeigen bei vielen Modellketten ein Nord-Süd-Gefälle innerhalb Niedersachsens (die Verhältnisse im Bereich des Harzes werden grundsätzlich schwach abgebildet).
- Die Temperaturen im Winter werden tendenziell etwas besser abgebildet als im Sommer.
- Bei den niederschlagsabhängigen Kenngrößen neigen die meisten Modellketten zu einer (signifikanten) Überschätzung der beobachteten Niederschläge bzw. einer Unterschätzung der maximalen Trockenphasen.
- Die Niederschläge liegen stellenweise um $+50\%$ und mehr über der Beobachtung, während die Dauer der maximalen Trockenphase um bis zu -50% unterschätzt wird.
- Die Abweichungen zeigen häufig ein leichtes Nordwest-Südost-Gefälle (die Verhältnisse im Bereich des Harzes werden meist schwächer abgebildet).
- Die Niederschläge (bzw. Trockenphasen) werden im Winter tendenziell etwas besser abgebildet als im Sommer.

Erwartungsgemäß zeigen die Modellketten mit dynamischen Regionalmodellen größere Abweichungen gegenüber der Beobachtung als diejenigen mit statischen Regionalmodellen, da letztere mittels statistischer Zusammenhänge zwischen großräumigen Wetterlagen und regional beobachteten Klimaverhältnissen aus der Vergangenheit entwickelt wurden. Abweichungen bei WETTREG sind vermutlich zum einen auf unterschiedliche Referenzdaten bei der Modellkalibrierung (Modellentwicklung) bzw. Validierung (Prüfung in diesem Bericht) und auf das antreibende Globalmodell zurückzuführen.

Die größere (Global-)Modellvielfalt des vorliegenden RCP-Ensembles scheint insgesamt zu größeren Abweichungen gegenüber der Beobachtung zu führen als beim SRES-Ensemble, das ausschließlich von einem Globalmodell (ECHAM5) angetrieben wird. Auffällig ist beim RCP-Ensemble vor allem das Regionalmodell RCA4, das (fast unabhängig vom antreibenden Globalmodell) häufig die größten Abweichungen bei den Niederschlags-Kenngrößen aufweist.

5.6 Anpassung der Klimamolldaten an die Beobachtung (Bias-Adjustierung)

In Kapitel 5.5 wurde dargelegt, dass die Daten von Klimamodellen bzw. davon abgeleitete Kenngrößen, gemittelt über einen längeren Zeitraum (mindestens 30 Jahre), mehr oder weniger deutlich von den Beobachtungsdaten des entsprechenden Zeitraumes in der Vergangenheit abweichen können. Man spricht auch vom sogenannten Bias. Sollen diese Molldaten als Eingangsdaten für die Impaktmodellierung (z. B. in Wasserhaushaltsmodellen) genutzt werden, kann dies zu Problemen führen bzw. falsche Ergebnisse liefern. Impaktmodelle werden in der Regel mit Hilfe von Beobachtungsdaten über einen gewissen Zeitraum der Vergangenheit kalibriert bzw. validiert (siehe auch Kapitel 7.1 und Kapitel 7.3). Somit liefern diese Modelle mit entsprechend korrekten Eingangsdaten Ergebnisse, die der Realität (hier z. B. den an Pegeln gemessenen Abflüssen) relativ nahekommen. Weichen die Eingangsdaten von der Realität ab (wie z. B. bei Klimamolldaten), so können auch die Ergebnisse der Impaktmodellierung, je nach Sensitivität des Modells, von der Realität (auch der zukünftigen) abweichen. Da viele Prozesse innerhalb eines Wasserhaushaltsmodells nicht linear ablaufen, bedeuten beispielsweise 20% zu viel Niederschlag nicht automatisch auch 20% zu viel Abfluss, was eine Korrektur der Ergebnisse im Nachgang vereinfachen würde. Überschreitet das „zu viel“ (oder „zu wenig“) zusätzlich noch kritische Grenzwerte, kann das Impaktmodell ggf. gar nicht mehr rechnen, da entsprechende Werte in den Algorithmen nicht vorgesehen sind.

Daher sollte eine Anpassung bzw. Korrektur der Eingangsdaten, also der Klimamolldaten, bereits vor der Anwendung im Impaktmodell erfolgen, damit dieses im Rahmen seiner Möglichkeiten plausible Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft produzieren kann. Eine Korrektur oder Anpassung von systematischen Abweichungen bei Molldaten gegenüber den gemessenen Beobachtungsdaten wird in der Fachsprache auch Bias-Korrektur oder Bias-Adjustierung genannt. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Abweichung der Klimamolldaten von der Beobachtung, z. B. die Überschätzung des gemessenen Niederschlages, in der Zukunft in ähnlicher Größenordnung fortsetzt. Dies muss jedoch nicht grundsätzlich der Fall sein (Teutschbein und Seibert, 2013; Maraun, 2012). In der Regel werden dabei diejenigen Variablen systematisch angepasst, die den größten Einfluss auf die Ergebnisse (d.h. für eine bestimmte Fragestellung relevante Ausgabegrößen) des Impaktmodells haben. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass jede Veränderung einer Variablen die physikalische Konsistenz aller Größen des Klimamodells beeinflusst bzw. mögliche Rückkopplungseffekte zwischen den Variablen unberücksichtigt lässt (Ehret et al., 2012). Daher wurden in KliBiW nur



diejenigen Klimagrößen angepasst, die einen wesentlichen Einfluss auf das Abflussgeschehen, vor allem im Hochwasserfall, haben. Hierzu zählt neben dem Niederschlag die Temperatur, die die Verdunstung und damit die Bodenfeuchte beeinflusst, welche wiederum Auswirkungen auf die Infiltration bzw. die Abflussbildung im Falle eines Niederschlagsereignisses hat.

Es gibt inzwischen eine Vielzahl von Verfahren, die bei der Anpassung von Klimamodelldaten an die Beobachtung sowohl in der Wissenschafts- wie auch in der Fachwelt Anwendung finden (Fang et al., 2015; Teutschbein und Seibert, 2012). Sie alle haben gemein, dass sie tendenziell zu einer verbesserten Anpassung der Klimamodelldaten, d.h. zu einer Verringerung der Abweichung gegenüber der Beobachtung führen. Je nach Methode erstreckt sich diese Verbesserung auf unterschiedliche Charakteristika der Daten wie beispielsweise auf mittlere und/oder extreme Ausprägungen von Variablen, auf deren Varianz oder auf Häufigkeiten. Dies kann zu unterschiedlichen Ergebnissen für die Zukunft auf Basis einer einzigen Klimamodellkette (GCM/RCM) führen, allein anhand unterschiedlicher Verfahren bei der Anpassung des Bias. Damit ist die Wahl einer Methode zur Anpassung des Bias eine weitere Quelle von Bandbreiten und damit Unsicherheiten in den Ergebnissen von Klimafolgenbetrachtungen.

5.6.1 Methode

In KliBiW wurden folgende Kenngrößen für die Anpassung der Klimamodelldaten an die Beobachtung herangezogen (vgl. Tabelle 5-5).

Tabelle 5-5: Betrachtete Klima-Kenngrößen bei der Bias-Adjustierung der Klimamodelldaten

Klima-Kenngröße	Einheit	Beschreibung
Tav	°C	Mittlere Tagestemperatur
Tmax	°C	Maximale Tagestemperatur
Tmin	°C	Minimale Tagestemperatur
Psum	mm	Tagesniederschlagssumme

Die Gründe für den Fokus auf diese ausgewählten Größen waren, dass die Tagesniederschlagssumme einen wesentlichen Einfluss auf die Abflussbildung im Wasserhaushaltsmodell hat. Auch die Tagesmitteltemperatur trägt über ihren Einfluss auf die Verdunstung und damit letztlich auf die Bodenfeuchte, speziell im Vorfeld eines Hochwasserereignisses, zur Abflussbildung bei. Die minimale und maximale Tagestemperatur wird u. a. bei der Abschätzung des Tagesganges der Temperatur bei verschiedenen Prozessen berücksichtigt. Daher wurden auch diese beiden Klimagrößen zusätzlich

angepasst, um die Konsistenz bei einer angepassten Tagesmitteltemperatur zu wahren.

Die Anpassung der Klimamodelldaten erfolgte dabei über den einfachen Ansatz des Linear Scaling. Bei dieser Methode wird für jeden Monat (Januar bis Dezember) ein Faktor berechnet, der sich aus dem Verhältnis von Beobachtungsdaten zu Modelldaten des jeweiligen Monats ergibt, gemittelt über einen Referenzzeitraum (hier 1971 bis 2000). Die Niederschlagswerte des Modells werden anschließend mit diesem Faktor multipliziert, bei den Temperaturwerten wird der Faktor addiert (vgl. Formel 5-1 und Formel 5-2). Die Anpassung der Modellwerte erfolgt anschließend über die gesamte Zeitreihenlänge, also von 1971 bis 2100, mittels der berechneten Monatskorrekturfaktoren.

$$P_{sim}^*(d) = P_{sim}(d) * \left[\frac{\bar{P}_{obs,ref}(m)}{\bar{P}_{sim,ref}(m)} \right] \quad \text{Formel 5-1}$$

$$T_{sim}^*(d) = T_{sim}(d) + [\bar{T}_{obs,ref}(m) - \bar{T}_{sim,ref}(m)] \quad \text{Formel 5-2}$$

Hierbei beschreibt P_{sim}(d) die Tagesniederschlagssumme bzw. T_{sim}(d) die Tagestemperatur (Mitte, Minimum, Maximum) des Klimamodells, P*_{sim}(d) und T*_{sim}(d) die entsprechend mittels Linear Scaling korrigierten Größen sowie P_{obs,ref}(m) bzw. T_{obs,ref}(m) den Monatsmittelwert der Beobachtung über den Referenzzeitraum und P_{sim,ref}(m) bzw. T_{sim,ref}(m) den Monatsmittelwert des Klimamodells über den Referenzzeitraum.

Die Vorteile dieses Linear Scaling sind:

- Die Methode ist einfach umsetzbar.
- Die Mittelwerte der angepassten Klimagrößen stimmen anschließend mit den beobachteten Verhältnissen sehr gut überein.
- Es erfolgt keine Veränderung des zukünftigen Klimasignals bezogen auf das Mittel der Klimakennwerte.

Dem gegenüber stehen folgende Nachteile des Verfahrens:

- Alle Werte innerhalb einer Zeitreihe werden gleichermaßen verändert (entsprechend der Abweichungen im Bereich der Mittelwerte), d.h. es kann bei Werten oberhalb bzw. unterhalb des Mittels zu einer Verschlechterung der Modellgüte (in Bezug auf die Beobachtung) kommen, sofern diese in anderem Maße von der Beobachtung abweichen als das Mittel.
- Es erfolgt keine Anpassung bzgl. der Varianz der Werte sowie der Häufigkeiten (z. B. Anzahl Regen / Trockentage).



Die beschriebene Methode wurde in KliBiW ausschließlich für die dynamischen Modellketten durchgeführt, da die statistischen Modelldaten auf Basis von beobachteten Klimadaten entwickelt wurden. Die Anpassung der Modellwerte erfolgte auf Basis der Zeitreihen des jeweils originalen Modell-Rasters, d.h. bei den SRES-Modellläufen auf dem 10x10 km bzw. 18x18 km Raster und bei den RCP-Modellläufen auf dem 12,5x12,5 km Raster (vgl. Abbildung 5-4). Hierzu wurden die Referenzdaten der Beobachtung, die auf ein 1x1 km Raster interpoliert worden waren (vgl. Kapitel 183.2), auf die entsprechenden Rastergrößen umgerechnet.

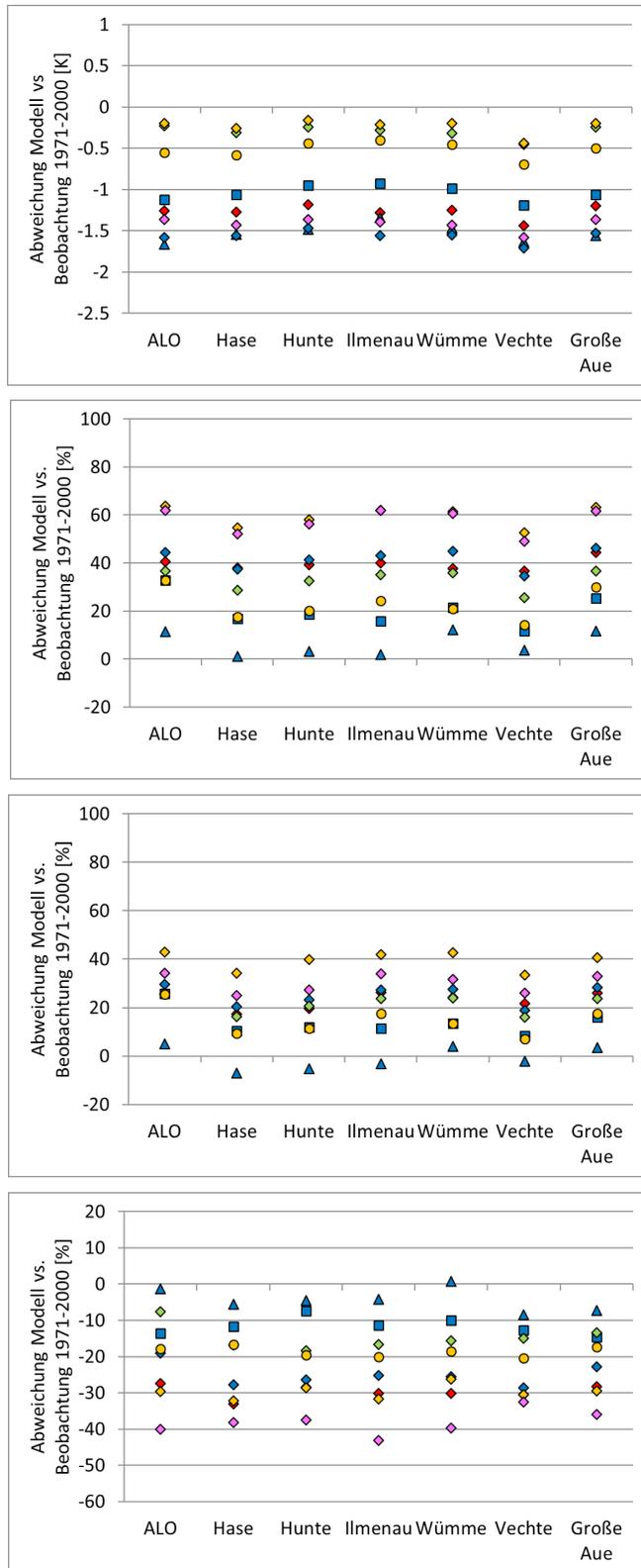
5.6.2 Ergebnisse

Die Wirkung des Linear Scaling auf den Bias der Klimamodelldaten wird in Abbildung 5-14 anhand der RCP-Läufe verdeutlicht. Hier wurden für die sieben betrachteten Haupteinzugsgebiete in KliBiW anhand der regionalisierten Klimadaten zunächst Gebietsmittelzeitreihen abgeleitet, sowohl für die Beobachtungs- wie auch für die Modelldaten. Anschließend wurden für verschiedene klimatische Kenngrößen (vgl. Tabelle 5-4) die Abweichungen zwischen den Modelldaten und der Beobachtung jeweils vor und nach der Bias-Adjustierung berechnet und zwar als Jahresmittel über den Referenzzeitraum 1971-2000.

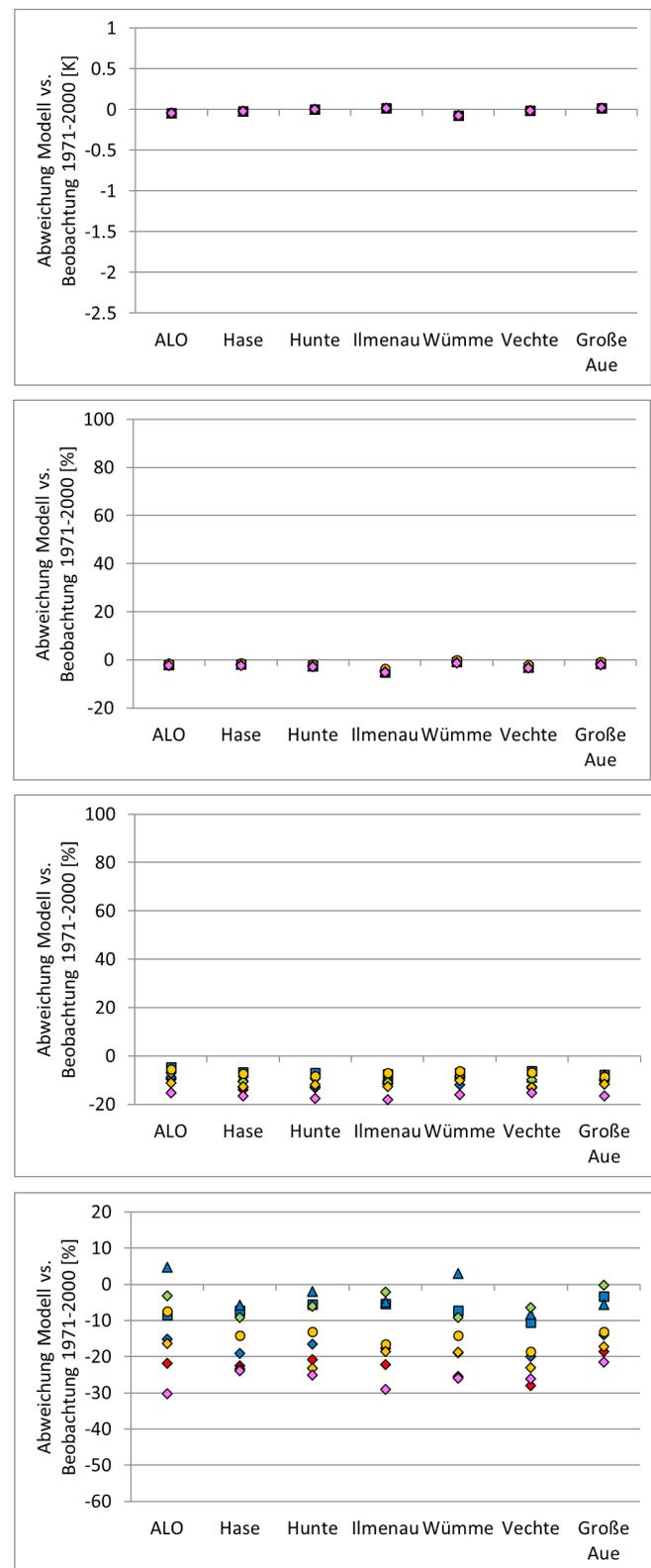
Die Ergebnisse zeigen, dass die Modelldaten ohne Bias-Adjustierung z.T. erheblich von der Beobachtung abweichen können, während sie nach der Anpassung die Beobachtungsdaten annähernd perfekt oder zumindest besser wiedergeben. Bei der mittleren Tagestemperatur (T_{av}) liegen die Abweichungen ohne Anpassung bei bis zu $-1,5^{\circ}\text{C}$, während sie nach der Anpassung praktisch keine Abweichungen mehr aufweist. Die Niederschlagssummen werden ohne Anpassung bis zu etwa $+60\%$ überschätzt, nach der Anpassung gibt es ebenfalls praktisch keine Abweichungen mehr. Die Abweichungen des 90%-Quantils der Niederschläge (P_{q90}) liegen zwischen etwa 0 und $+40\%$. Da die Anpassung linear erfolgte, d.h. auf Basis der Faktoren aus den mittleren Niederschlägen, welche Abweichungen bis $+60\%$ aufweisen, wird das 90%-Quantil der Niederschläge nach der Anpassung tendenziell leicht unterschätzt. Auch die maximale Anzahl aufeinander folgender Trockentage (P_{xcdd}) wird leicht verbessert. Wurde sie ohne Anpassung von den Modelldaten noch bis zu -40% unterschätzt, so hat sie nach der linearen Reduzierung der Niederschläge insgesamt leicht zugenommen und unterschätzt die Beobachtung nur noch um maximal -30% .



ohne Bias-Adjustierung



mit Bias-Adjustierung



- ◆ CNRM_RCA4 ◆ HadGEM2_RCA4
- ECE_HIRHAM5 ◆ IPSL_RCA4
- ▲ ECE_RACMO22E ● MPI-ESM_CCLM
- ◆ ECE_RCA4 ◆ MPI-ESM_RCA4

Abbildung 5-14: Abweichung der Klimamolldaten (RCP-Modelle) gegenüber der Beobachtung für die vier Klimakenngrößen mittlere Tagesstemperatur (Tav), Tagesniederschlagssumme (Psum), 90 %-Quantil der Tagesniederschläge (Pq90) und maximale Dauer von Trockenphasen (Pxcd), basierend auf den Gebietsmitteln der sieben betrachteten Flusseinzugsgebiete, gemittelt über den Zeitraum 1971-2000; links: ohne Bias-Adjustierung, rechts: mit Bias-Adjustierung (Linear Scaling)



Als Nächstes wurde untersucht, welche Auswirkungen die Anpassung der Klimamodell­daten an die Beobach­ tungs­daten auf die simulierten Abflüsse im Wasser­ haushaltsmodell hat. Dazu wurden am Beispiel des Einzugsgebietes der Hase die Abflüsse anhand von zwei verschiedenen Modellketten jeweils ohne und mit Anpassung der Klimagrößen Temperatur und Nieder­ schlag berechnet und am Pegel Haselünne im Bereich des Gebietsauslasses ausgewertet. Das hierfür benutzte Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI wurde zuvor mittels regionalisierter Beobachtungsdaten kalibriert (vgl. Kapitel 7.1.5).

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-15 (Klimadaten) bzw. Abbildung 5-16 (Abflussdaten) dargestellt. Wie zu erwarten bewirkt die Bias-Adjustierung mittels Linear Scaling beim Gebietsniederschlag (Psum) und der Gebietsmitteltemperatur (Tav) eine quasi perfekte Übereinstimmung zwischen Modell­daten und Beobach­ tungs­daten. Die Höhe des 3-Tages-Maximalnieder­ schlages (Px3d) wird dagegen nach der Adjustierung deutlich unterschätzt, bedingt durch die Tatsache, dass diese Größe ohne Anpassung weniger von der Beobach­ tung abweicht als der mittlere Tagesniederschlag, über den beim Linear Scaling die Skalierungsfaktoren abgeleitet wurden.

Bei den resultierenden Abflüssen führt die Adjustierung der Klimadaten im Fall der Modellkette MPI-ESM_RCA4 zu einer erheblichen Verringerung der Abweichungen

zwischen Simulation und Beobachtung (beim MQ von +90% auf -15%, beim MHQ von +40% auf -20%). Bei der Modellkette EC-EARTH_RACMO22E bewirkt die Anpassung von Temperatur und Niederschlag dagegen eine minimale Zunahme der Abweichungen von den beobachteten Abflüssen (beim MQ von -2% auf -11%, beim MHQ von -6% auf -13%).

Die Ergebnisse belegen, dass zum einen das Wasser­ haushaltsmodell die Abflussverhältnisse mit angepassten Niederschlagswerten besser wiedergeben kann, sofern die Niederschläge ohne Anpassung deutlich überschätzt werden. Zum anderen zeigt sich aber auch, dass neben dem Niederschlag und der Temperatur noch andere Größen bei der Abflussbildung im Wasser­ haushaltsmodell eine Rolle spielen müssen, die durch die Bias-Adjustierung nicht korrigiert wurden, da eine verbesserte Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtung bei den Temperatur- und Niederschlags­ werten nicht automatisch auch eine verbesserte Übereinstimmung bei den Abflusswerten ergibt. Insgesamt kann aber davon ausgegangen werden, dass das Wasserhaushaltsmodell die zukünftigen Änderungssignale der Abflüsse bei einer leichten Unterschätzung der klimatischen Eingangsdaten, vor allem des (Extrem-) Niederschlages, realistischer darstellt als bei einer Überschätzung. Letztere kann zu einer häufigen Boden­ sättigung führen, die wiederum eine überproportional starke Abflussbildung nach sich zieht.

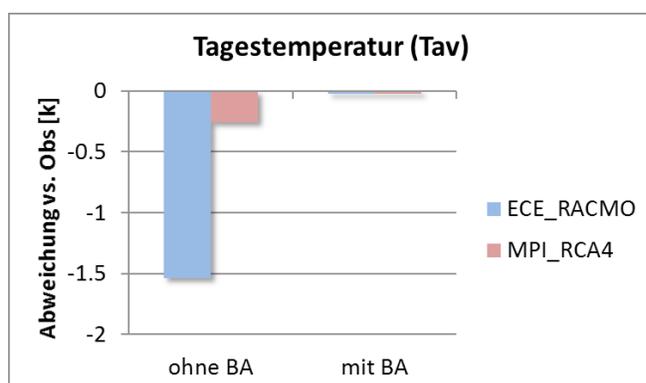
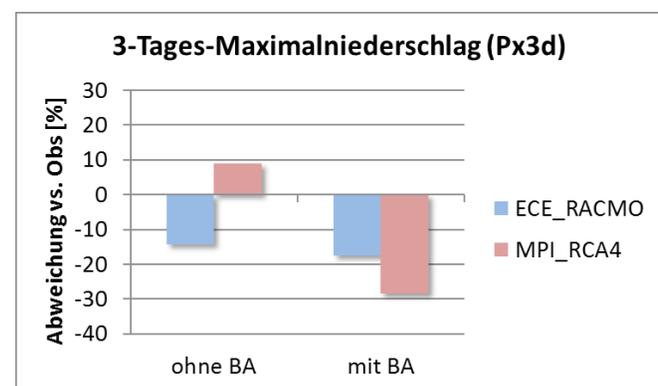
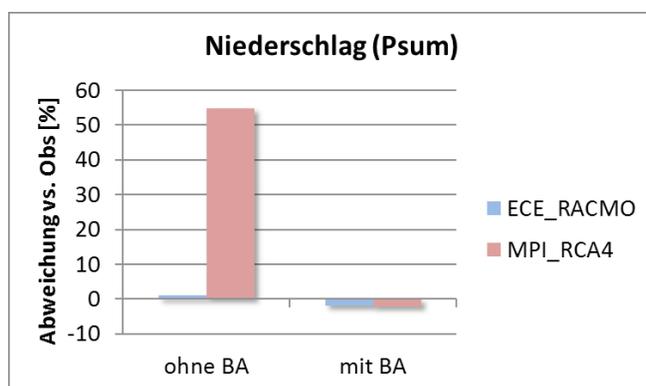


Abbildung 5-15: Abweichungen zwischen Klimamodell­daten (blau: EC-EARTH_RACMO22E, rot: MPI-ESM_RCA4) und Beobach­ tung für ausgewählte Klimagrößen im Einzugsgebiet der Hase jeweils ohne Bias-Adjustierung (ohne BA) und mit Bias-Adjustierung (mit BA)

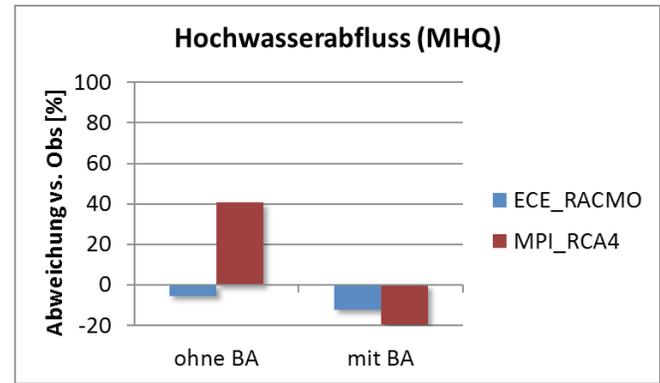
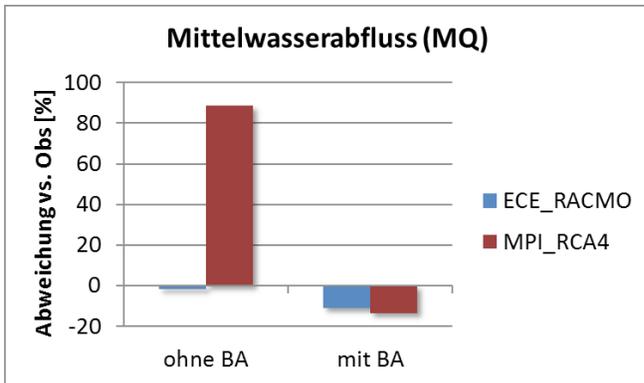


Abbildung 5-16: Abweichungen zwischen mittels Klimamodelldaten (blau: EC-EARTH_RACMO22E, rot: MPI-ESM_RCA4) und gemessenen Klimadaten simulierten Abflüssen in einem Wasserhaushaltsmodell für den Pegel Haselünne im Einzugsgebiet der Hase, jeweils ohne adjustierte Klimamodelldaten (ohne BA) und mit adjustierten Klimamodelldaten (mit BA)

Als Letztes wurde untersucht, welche Auswirkungen die Anpassung der Klimagrößen Temperatur und Niederschlag auf die zukünftigen Änderungssignale haben kann. Dazu wurden die Abflüsse für die Hase im Zeitraum 1971 bis 2100 ohne und mit Bias-Adjustierung in PANTA RHEI simuliert. Anschließend wurden die 30 jährigen Mittelwerte der fernen Zukunft (Z3: 2071-2100) mit denen des Referenzzeitraumes der Vergangenheit (20C: 1971-2000) ins Verhältnis gesetzt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass sich die klimatischen Änderungssignale bei den analysierten Kenngrößen durch die Anpassung mittels Linear Scaling nur geringfügig bei den Maximalnieder-

schlägen verändern. Trotzdem ergeben sich bei den resultierenden hydrologischen Änderungssignalen durchaus Unterschiede, vor allem beim Mittelwasserabfluss MQ. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass sich trotz annähernd gleicher Klimaänderungssignale durch die Bias-Adjustierung die Absolutwerte der Klimagrößen verändert haben, im Fall des Niederschlages erfolgte eine Reduzierung. Diese fließen als Eingangsdaten in das Wasserhaushaltsmodell ein und bewirken eine Verstärkung des hydrologischen Änderungssignals, da die Böden durch den angepassten Niederschlag nun im Referenzzeitraum nicht mehr übermäßig gesättigt sind und somit weniger Oberflächenabfluss verursachen.

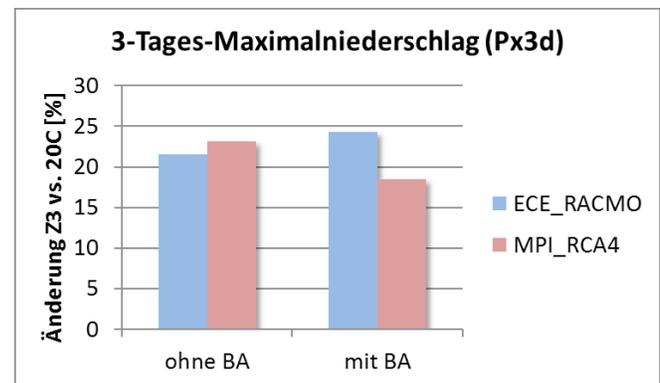
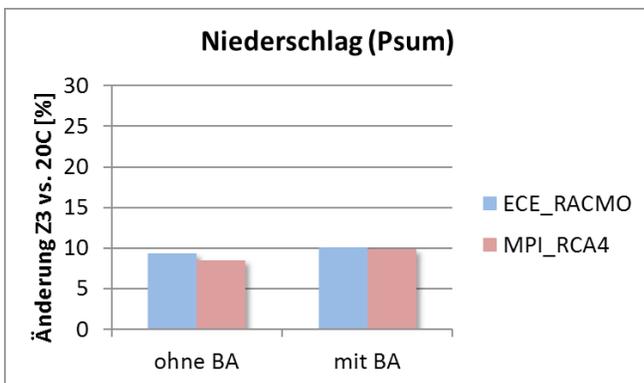
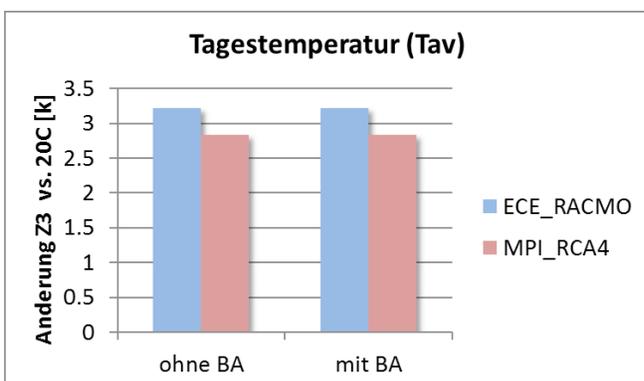


Abbildung 5-17: Klimatische Änderungssignale von zwei Klimamodellläufen (blau: EC-EARTH_RACMO22E, rot: MPI-ESM_RCA4) für die ferne Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1971-2000) im Einzugsgebiet der Hase, jeweils ohne Bias-Adjustierung (ohne BA) und mit Bias-Adjustierung (mit BA)



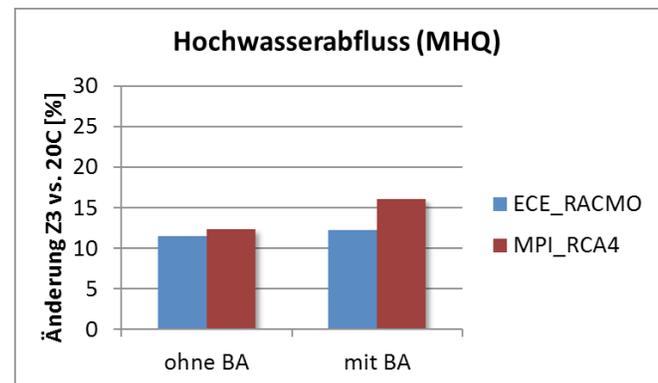
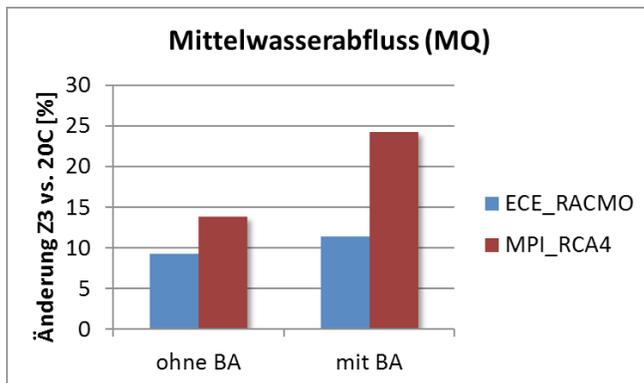


Abbildung 5-18: Änderungssignale der Abflüsse am Pegel Haselünne im Einzugsgebiet der Hase, basierend auf zwei Klimamodellläufen (blau: EC-EARTH_RACMO22E, rot: MPI-ESM_RCA4), für die ferne Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1971-2000), jeweils ohne adjustierte Klimamodelldaten (ohne BA) und mit adjustierten Klimamodelldaten (mit BA)

5.6.3 Zusammenfassung

Durch die Anwendung des Verfahrens des einfachen Linear Scaling zur Anpassung der Klimamodelldaten (an beobachtete Verhältnisse) kommt es zu folgenden Effekten:

- Die Mittelwerte der angepassten Klimagrößen (Temperatur und Niederschlag) passen sehr gut zu den beobachteten klimatischen Verhältnissen.
- Die Änderungssignale der angepassten Klimagrößen unterscheiden sich nur geringfügig gegenüber denen ohne Anpassung.
- Die Anwendung der angepassten Klimamodelldaten in einem Wasserhaushaltsmodell führt in der Regel zu einer Verbesserung der simulierten Abflüsse in Bezug auf die Beobachtung (allerdings können auch andere Klimagrößen bei der Abflussbildung eine Rolle spielen).
- Das Änderungssignal der Abflüsse, die auf Basis von angepassten Klimagrößen simuliert wurden, erscheint gegenüber nicht angepassten Daten verstärkt zu werden, vor allem dann, wenn der Niederschlag ohne Anpassung überschätzt wird.



6 Analyse der möglichen klimatischen Verhältnisse der Zukunft

6.1 Robustheit von Klimaänderungssignalen

Regionale Klimaprojektionen sind mit Unsicherheiten behaftet. Neben der unvollständigen Abbildung der physikalischen Prozesse des Klimasystems bestehen diese in der Unsicherheit über die zukünftig tatsächliche Entwicklung von Klimaantrieben wie Globalstrahlung und Treibhausgasemissionen sowie in der internen Klimavariabilität (Dobler et al., 2017; Collins et al., 2013). Zur Verbesserung der Verlässlichkeit empfiehlt es sich, Multimodell-Ensembles aus mehreren Klimaprojektionen zu bilden und die Änderung eines Klimasignals anhand der Ensemblebandbreite anzugeben (Dobler et al., 2017). Grundsätzlich gilt, dass ein Klimaänderungssignal tendenziell umso sicherer ist, je kleiner die Bandbreite der Klimaänderung ausfällt. Große Band-

breiten deuten auf große Unsicherheiten hin. Erlaubt eine Ergebnisdarstellung die Angabe der Bandbreite nicht, so empfiehlt sich die Bewertung der Robustheit des mittleren Klimaänderungssignals des Ensembles. In der Wissenschaft sind hierzu verschiedene Ansätze getestet worden (Collins et al., 2013). Für die Auswertungen im Rahmen des Projektes KliBiW wurde ein mehrstufiges Verfahren in Anlehnung an Tebaldi et al. (2011) angewendet, das die Robustheit als Kombination aus der statistischen Signifikanz und der Richtungssicherheit des mittleren Ensemblesignals ermittelt. Die statistische Signifikanz eines Klimaänderungssignals wurde anhand verschiedener statistischer Tests nach den Empfehlungen aus den Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten (Linke et al., 2015) bestimmt (vgl. Abb. 6-1). Das mittlere Signal wurde als Median aus allen Klimaprojektionen des jeweiligen Ensembles ermittelt.

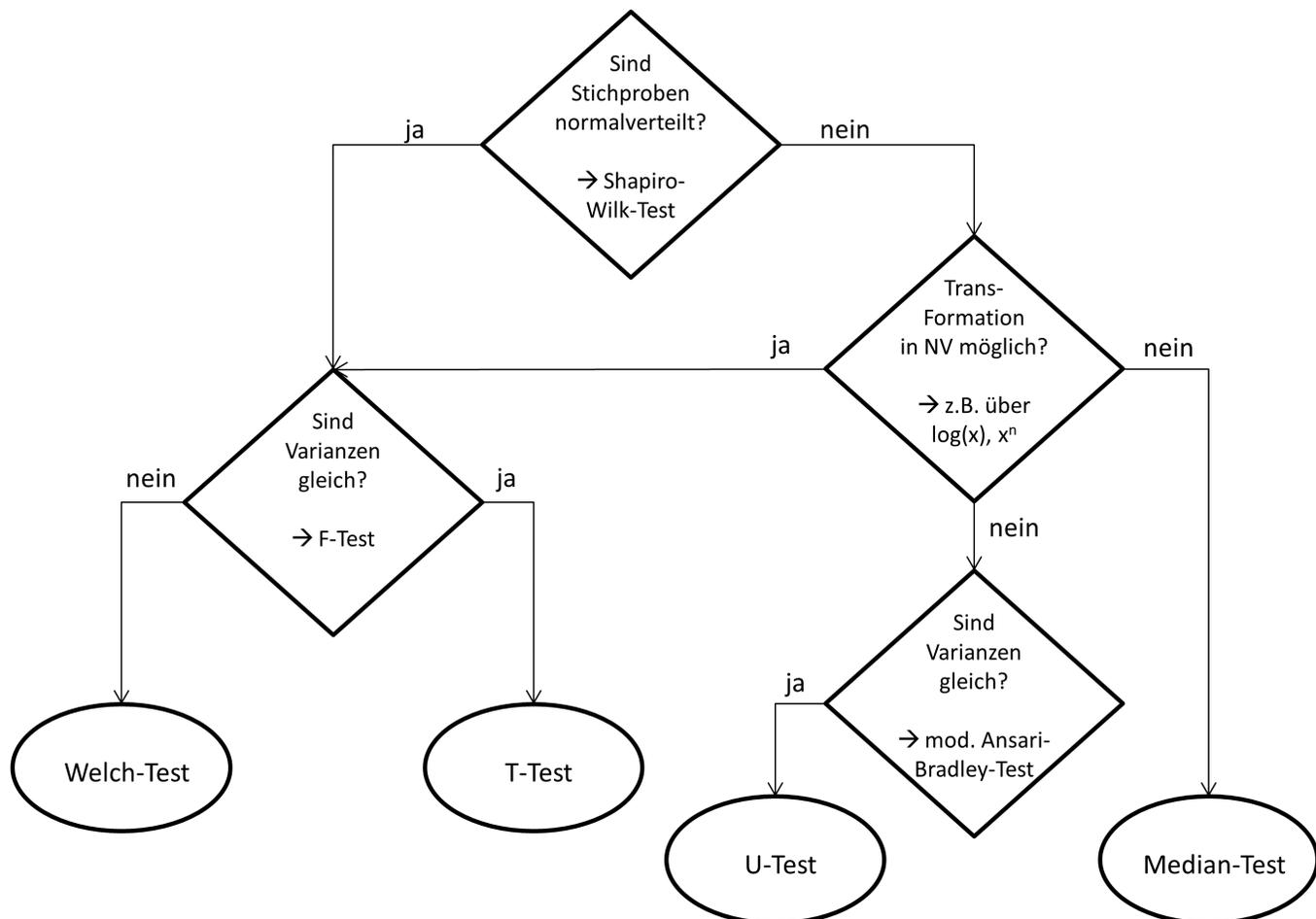


Abbildung 6-1: Signifikanztests (eigene Darstellung basierend auf: Leitlinien zur Interpretation v. Klimamodelldaten, Linke et al., 2016)



Es wurden drei Stufen der Robustheit unterschieden (vgl. Abb. 6-2):

Fall 1: Robuste Zu- oder Abnahme einer Klimagröße (= „Robustheit +/-Änderung“): Mindestens 66% der Mitglieder des Klimamodellensembles zeigen eine statistisch signifikante Änderung und von allen statistisch signifikanten Signalen haben mindestens 66% dasselbe Vorzeichen

Beispiel RCP8.5: 7 von 8 Ensemblemitgliedern zeigen eine statistisch signifikante Änderung an. Von den 7 signifikanten Signalen haben 6 ein positives Vorzeichen und 1 ein negatives Vorzeichen.

Fall 2: Keine Robustheit:

a) Mindestens 66% der Mitglieder des Klimamodellensembles zeigen eine statistisch signifikante Änderung, von allen statistisch signifikanten Signalen haben aber weniger als 66% dasselbe Vorzeichen (Modelluneinigkeit).

Beispiel RCP8.5: 7 von 8 Ensemblemitgliedern zeigen eine statistisch signifikante Änderung an. Von den 7 signifikanten Signalen haben 4 ein positives Vorzeichen und 3 ein negatives Vorzeichen.

b) Von allen Mitgliedern des Klimamodellensembles zeigen weniger als 66%, aber mehr als 33% eine statistisch signifikante Änderung.

Beispiel RCP8.5: 5 von 8 Ensemblemitgliedern zeigen eine statistisch signifikante Änderung an.

Fall 3: Modellübereinstimmung darüber, dass sich die Klimagröße nicht ändert („keine Änderung“):

Mindestens 66% der Mitglieder des Klimamodellensembles zeigen eine statistisch nicht signifikante Änderung

Beispiel RCP8.5: 7 von 8 Ensemblemitgliedern zeigen eine statistisch nicht signifikante Änderung an.

Die oben dargestellte Klassifizierung zur Robustheit wurde für jede Rasterzelle durchgeführt und Anhand einer Schraffur in die Klimasignalkarten für Niedersachsen übernommen. War das Signal robust, wurde keine Schraffur verwendet. War das Signal nicht robust, wurde die jeweilige Rasterzelle kreuzschraffiert. Zwischen Typ a) und Typ b) wurde hierbei nicht unterschieden. Lag eine Modellübereinstimmung darüber vor, dass sich die Klimagröße nicht ändert, wurde eine einseitige Schraffur angewendet.

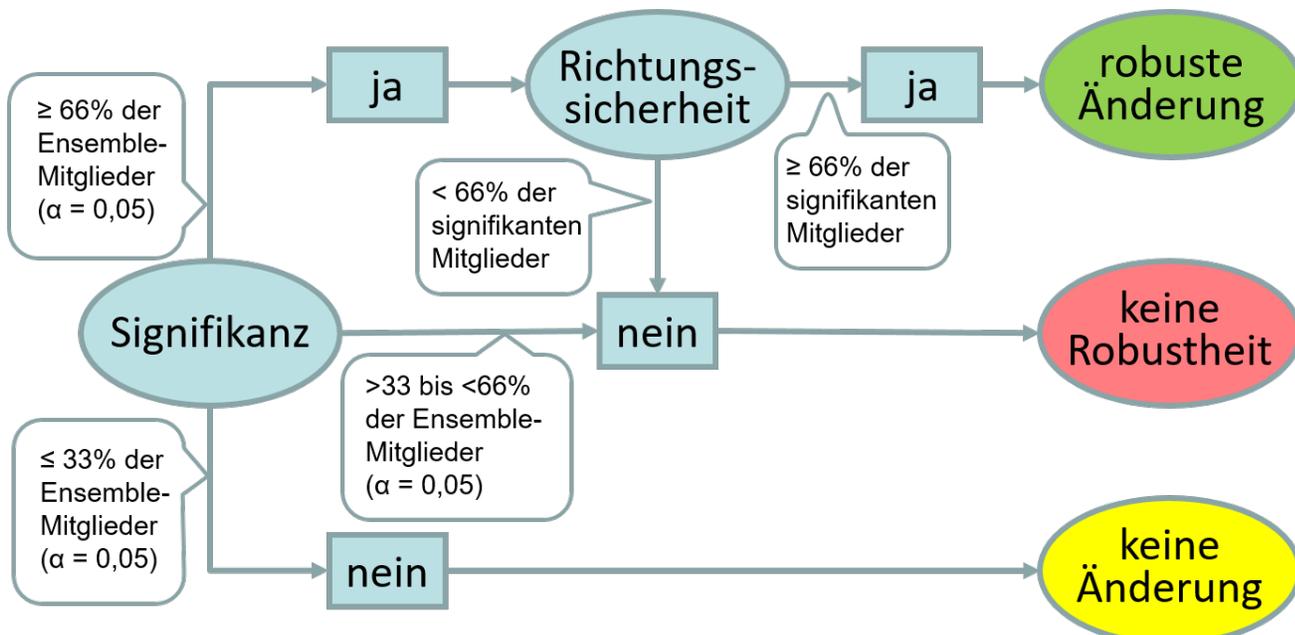


Abbildung 6-2: Schema zur Klassifizierung der Robustheit von Klimaänderungssignalen (eigene Darstellung)



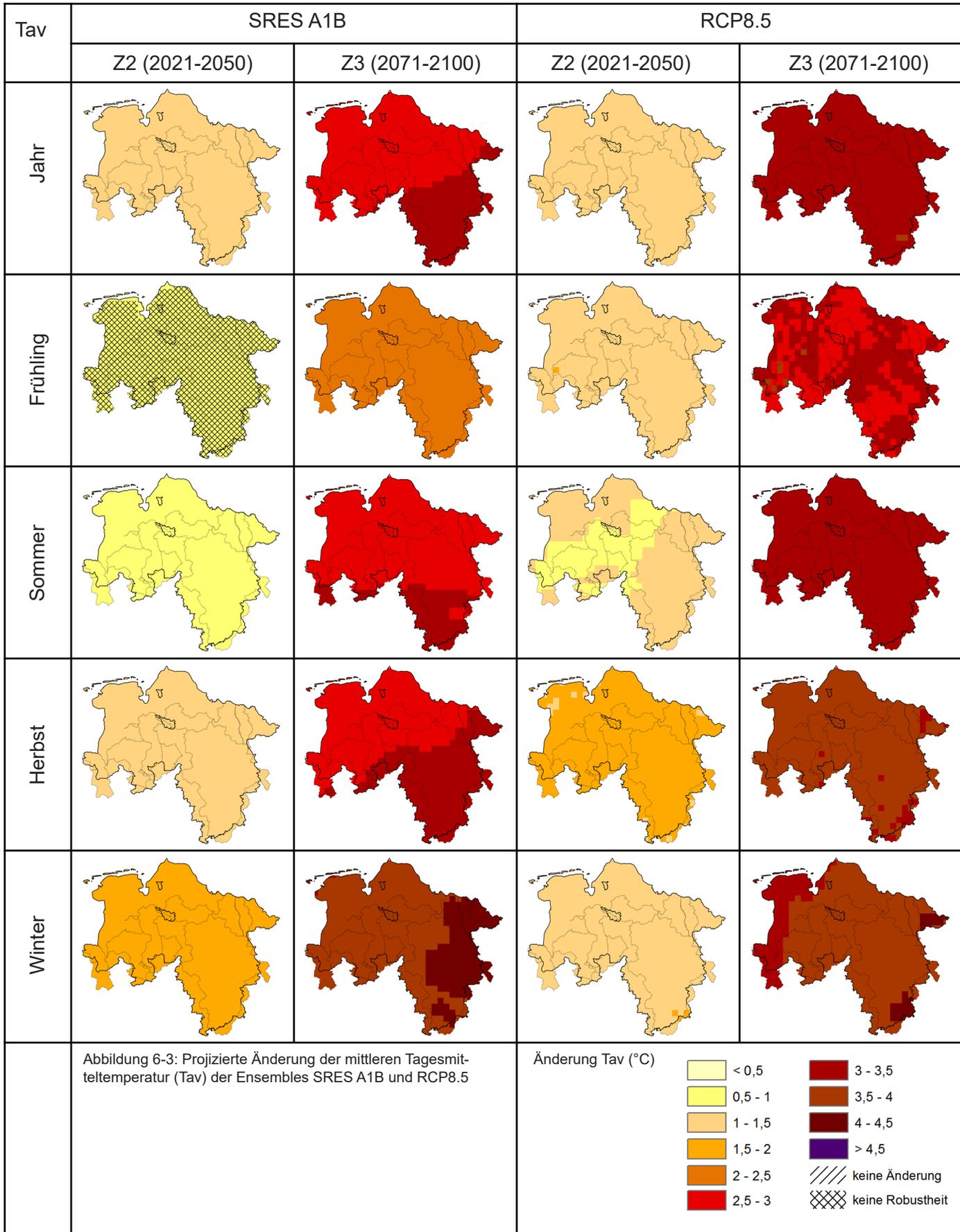
6.2 Analyse ausgewählter Klima-Kenngrößen

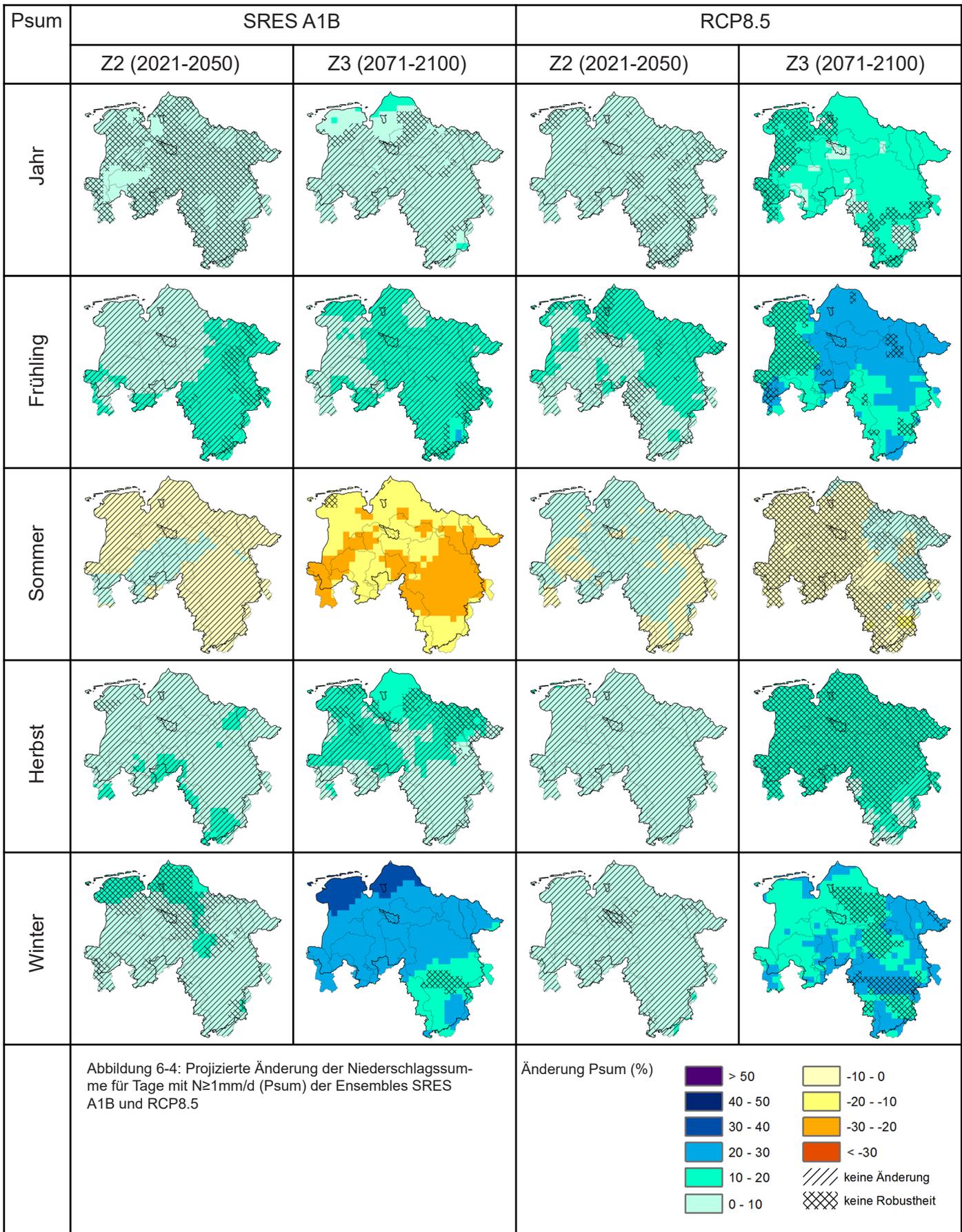
Zur Charakterisierung des Klimas der Zukunft wurden im Rahmen von KliBiW verschiedene Klimakenngrößen aus den regionalisierten Klimaprojektionen ermittelt. Dabei wurden vier Niederschlagskenngrößen sowie eine Temperaturkenngröße analysiert, die zum einen das mittlere Verhalten und zum anderen Extremereignisse charakterisieren (Tabelle 6-1). Methodisch wurde nach den Empfehlungen aus den Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten (Linke et al., 2015) vorgegangen. Verglichen wurden die Zukunftsperioden Z2 (2021-2050) und Z3 (2071-2100) jeweils mit der Referenzperiode 20C (1971-2000). Zur Auswertung der Klimakenngrößen wurde das Mittel der 30jährigen Zukunftsperiode (Z2 bzw. Z3) mit dem Mittel der 30jährigen Referenzperiode (20C) verglichen und ein Änderungssignal ermittelt. Bei den Niederschlagskenngrößen wurde die Änderung in Prozent, bei der Temperaturkenngröße die absolute Änderung in °C angegeben. Die Analysen wurden zum einen für das gesamte Raster über die niedersächsische Landesfläche und zum anderen separat für jedes untersuchte Einzugsgebiet (als Mittel über alle im Gebiet liegenden Rasterzellen) durchgeführt. Für die beiden betrachteten Klimamodellensembles SRES A1B und RCP8.5 wurde jeweils die mittlere Tendenz in Form des Medians aus den Ergebnissen der einzelnen Ensemblemitglieder berechnet. Die Analysen wurden für das kalendarische Gesamtjahr (Januar-Dezember) sowie für die meteorologischen Jahreszeiten Frühling (März-Mai), Sommer (Juni-August), Herbst (September-November) und Winter (Dezember-Februar) durchgeführt.

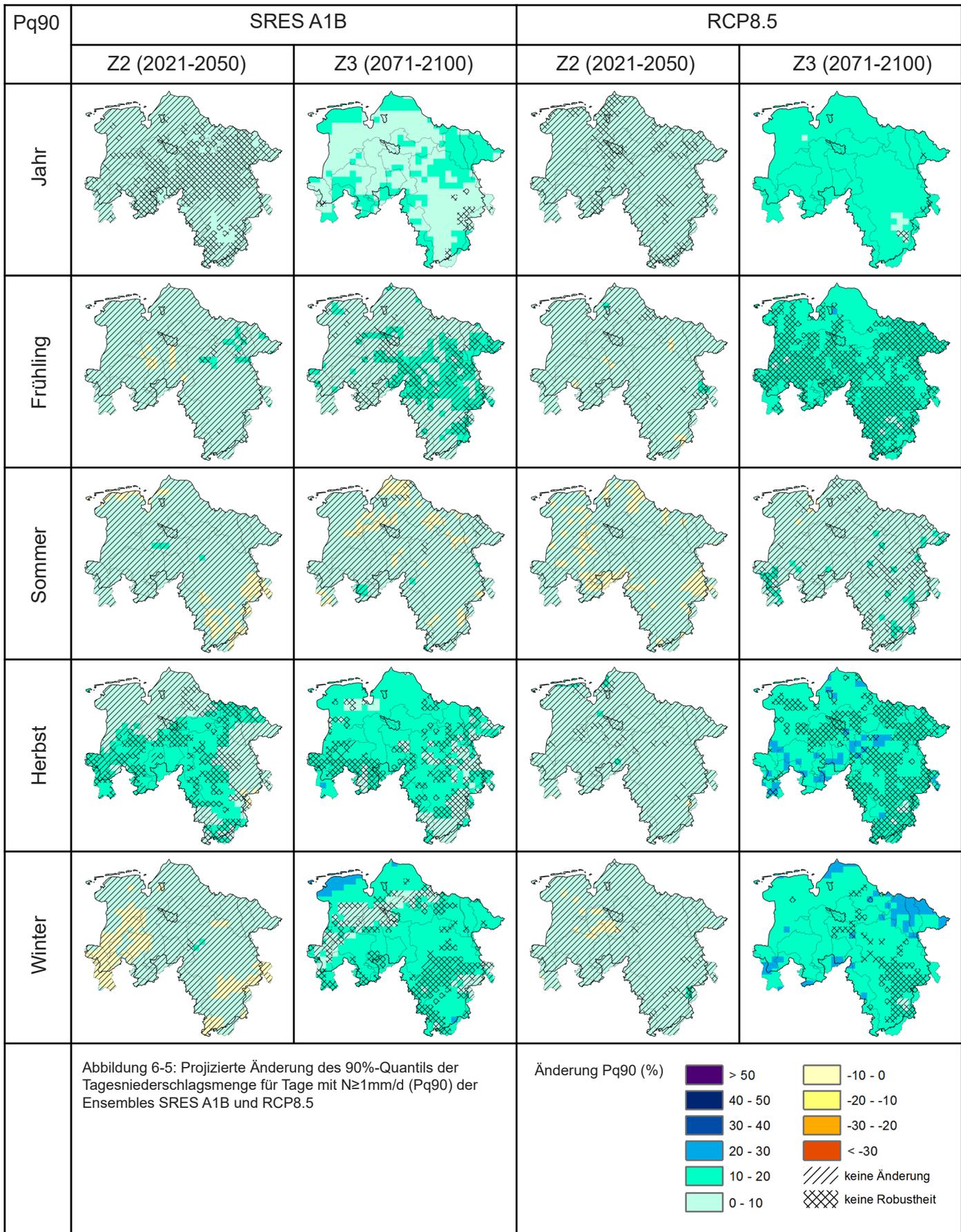
Die Karten in Abbildung 6-3 bis Abbildung 6-7 veranschaulichen die Ergebnisse der Klimasignalanalyse für ganz Niedersachsen. Farblich dargestellt ist der Median des jeweiligen Klimamodellensembles. Robuste Signale wurden entsprechend der Methode aus Kapitel 6.1 ermittelt und gekennzeichnet. Die Boxplots in Abbildung 6-8 bis Abbildung 6-10 zeigen die Veränderungen der Klimaindizes getrennt für die sieben betrachteten Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Hase, Hunte, Vechte, Ilmenau, Große Aue und Wümme. Die Darstellungen geben Auskunft über die Bandbreite der Änderungssignale, basierend auf den einzelnen Klimaprojektionen innerhalb des jeweiligen Ensembles. Der als schwarze Linie gekennzeichnete Median entspricht der in den Klimasignalkarten dargestellten mittleren Änderung. Die Interpretation von Boxplots ist im Glossar erläutert. Da für die nahe Zukunft kaum signifikante Änderungen festgestellt wurden (einseitige Schraffur), sind die Boxplots lediglich für den Zeitraum der fernen Zukunft (2071-2100) abgebildet. Gezeigt sind die Veränderungen der mittleren Temperatur (T_{av}), des mittleren Niederschlags (P_{sum}) sowie des 90%-Quantils des Niederschlags (P_{q90}), stellvertretend als Index für größere Niederschlagsereignisse. Die Änderungssignale des P_{x3d} weisen ähnliche Tendenzen wie die des P_{q90} auf und sind deshalb nicht zusätzlich aufgeführt. Sie können in Anhang 2 eingesehen werden. In Anhang 3 sind auch die Gebietsboxplots des P_{xcdd} zu finden.

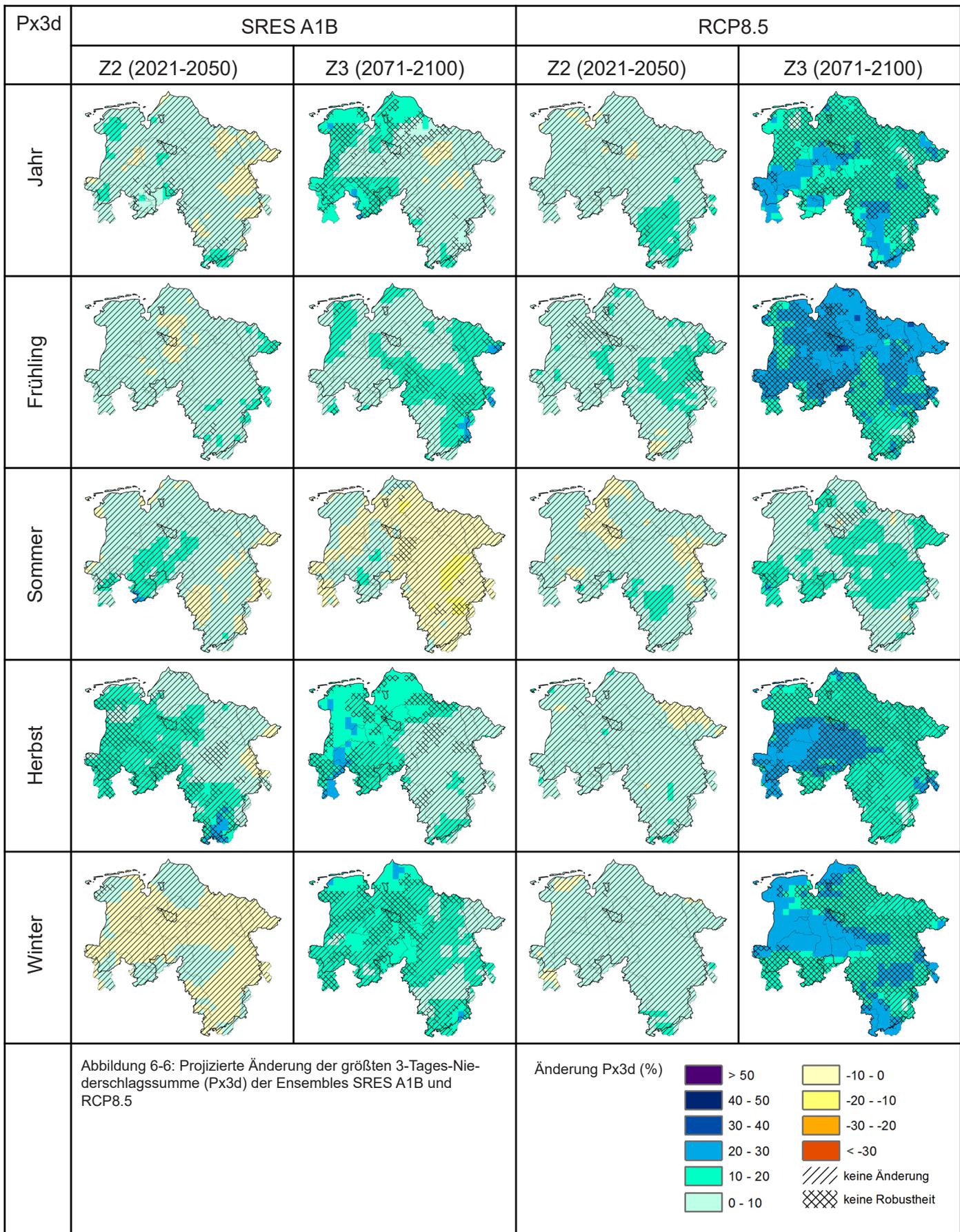
Tabelle 6-1: Ausgewählte Kenngrößen für die Analyse der klimatischen Änderungssignale

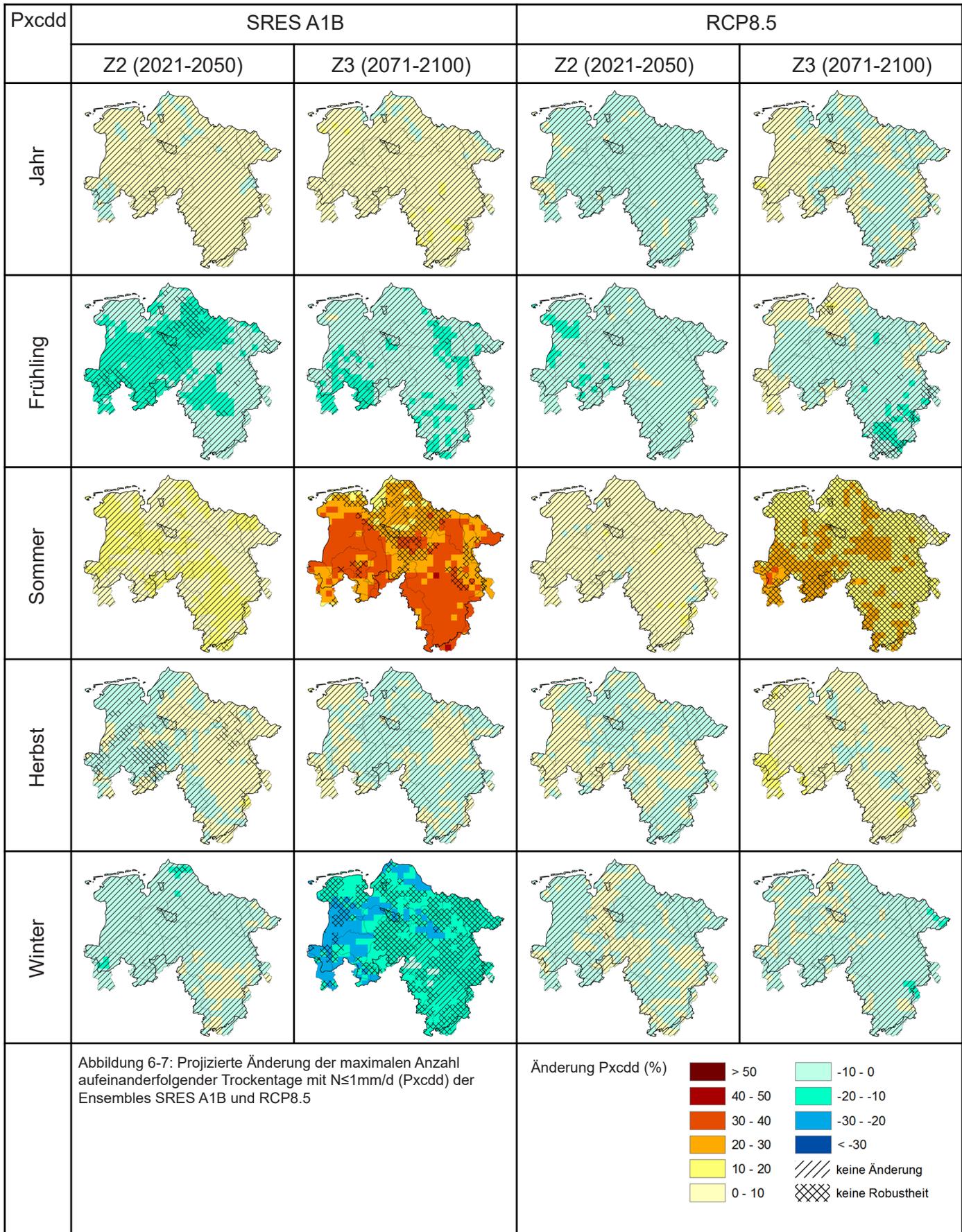
Klimakenngröße	Beschreibung	Einheit
T_{av}	Tagesmitteltemperatur	°C
P_{sum}	Summe der Niederschläge für Tage mit $N \geq 1 \text{ mm/d}$	mm
P_{q90}	90%-Quantil der Tagesniederschläge (für Tage mit $N \geq 1 \text{ mm/d}$)	mm/d
P_{x3d}	Größte 3-Tages-Niederschlagssumme	mm/3d
P_{xcdd}	Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Tage mit $N < 1 \text{ mm/d}$)	d









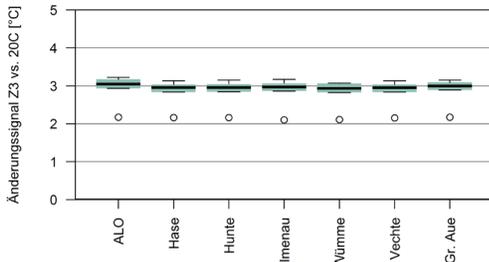




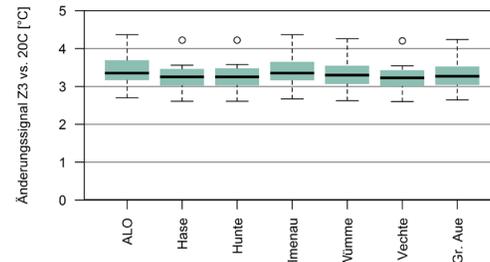
Mittlere Temperatur (Tav)

SRES A1B

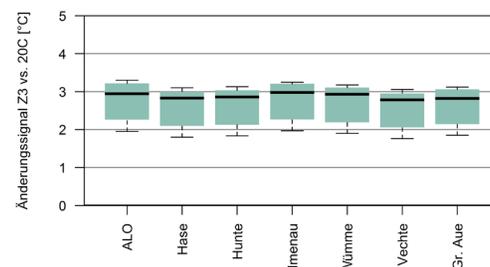
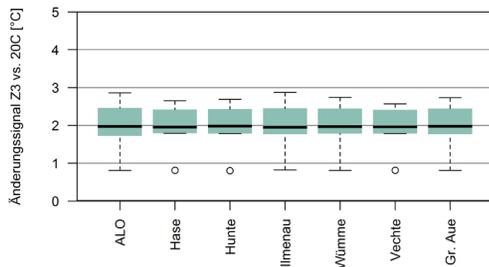
Gesamtjahr



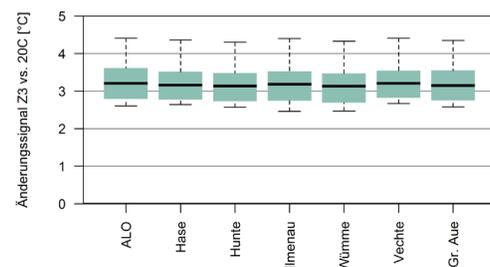
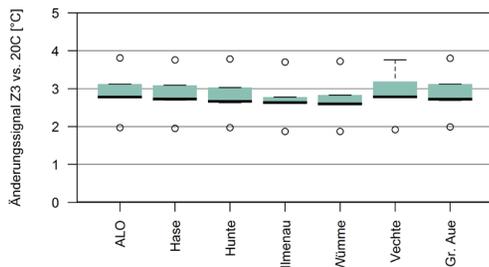
RCP8.5



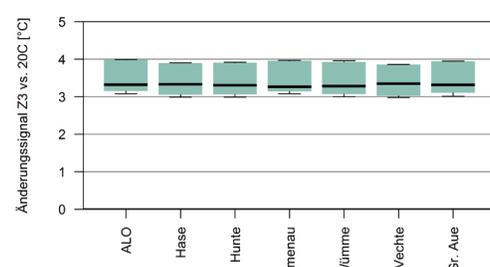
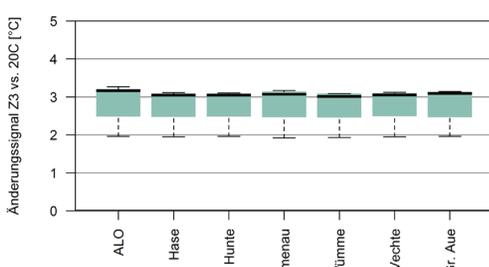
Frühling



Sommer



Herbst



Winter

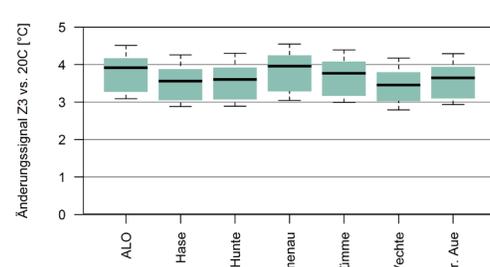
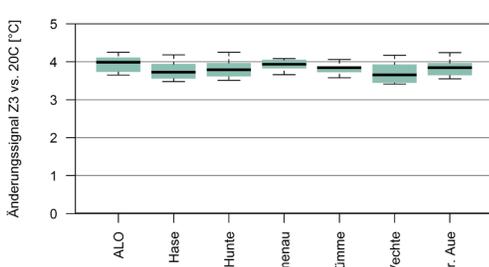


Abbildung 6-8: Projizierte Änderung der mittleren Temperatur (Tav) in der fernen Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum (1971-2000) für die Ensembles SRES A1B (linke Spalte) sowie RCP8.5 (rechte Spalte), getrennt nach Jahreszeit. Die Boxplots zeigen die Änderungssignale für die betrachteten Einzugsgebiete.

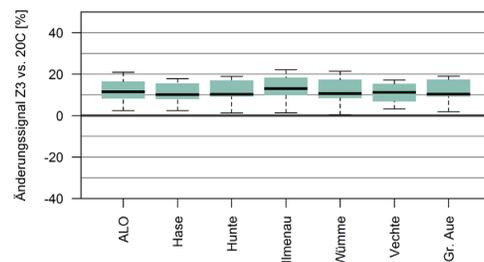
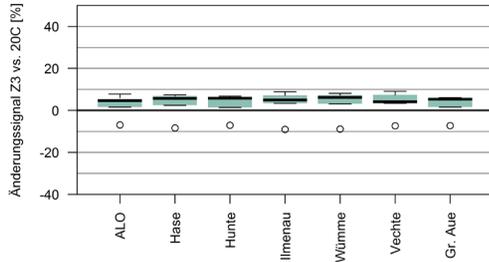


Niederschlagssumme (Psum)

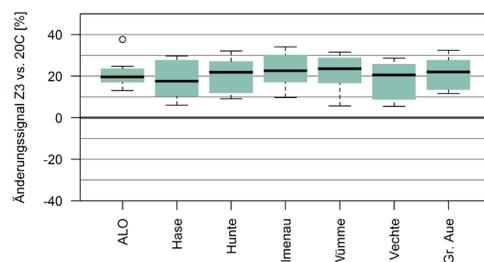
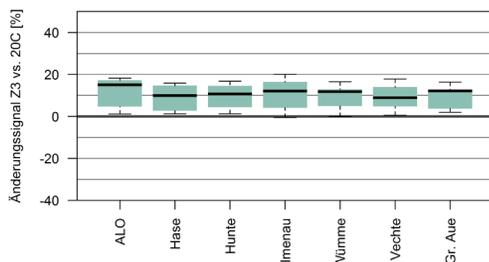
SRES A1B

RCP8.5

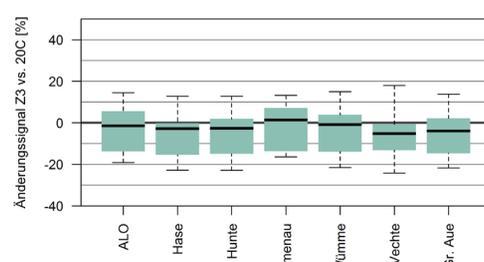
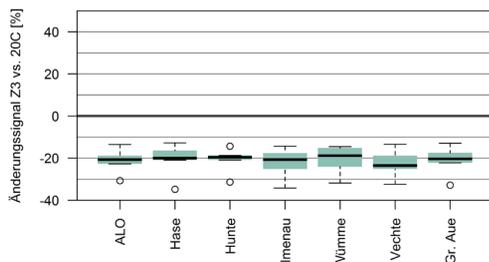
Gesamtjahr



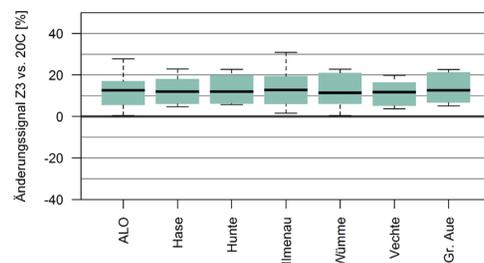
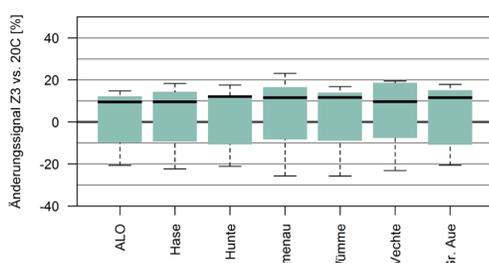
Frühling



Sommer



Herbst



Winter

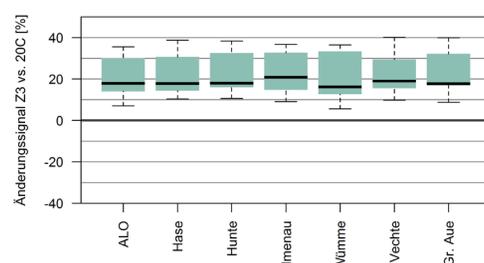
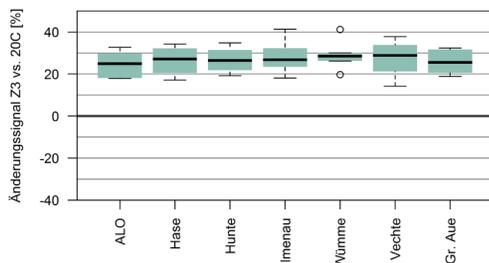


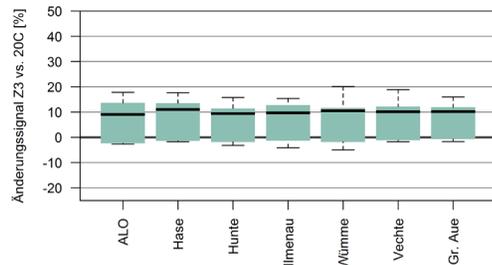
Abbildung 6-9: Projizierte Änderung der Niederschlagssumme (Psum) in der fernen Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum (1971-2000) für die Ensembles SRES A1B (linke Spalte) sowie RCP8.5 (rechte Spalte), getrennt nach Jahreszeit. Die Boxplots zeigen die Änderungssignale für die betrachteten Einzugsgebiete.



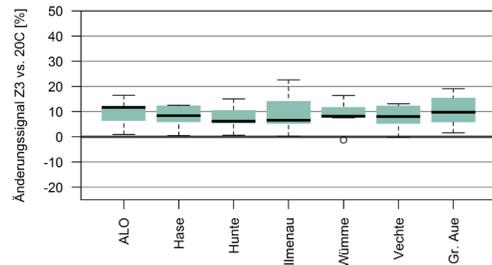
90 %-Quantil der Tagesniederschläge (Pq90)

SRES A1B

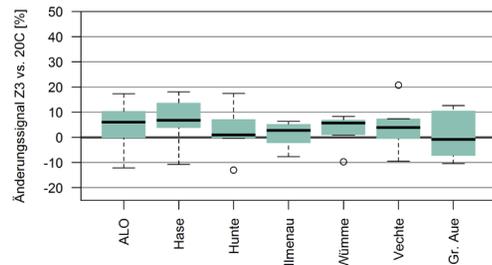
Gesamtjahr



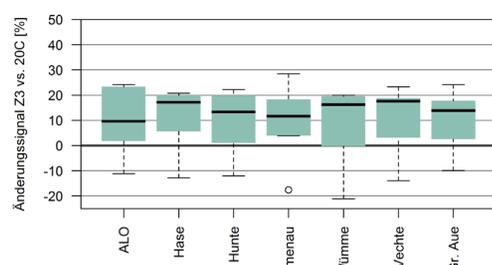
Frühling



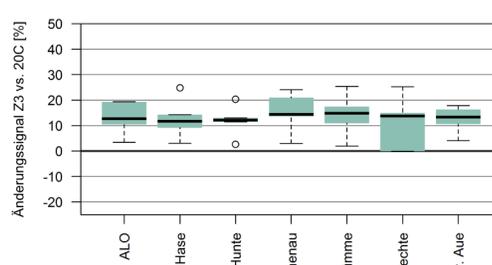
Sommer



Herbst



Winter



RCP8.5

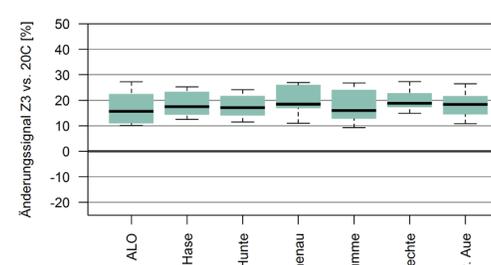
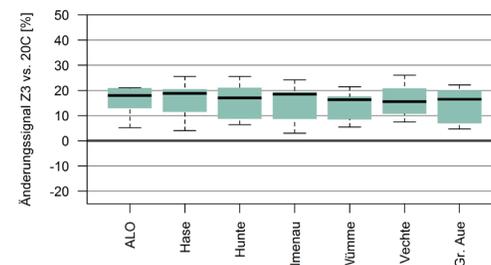
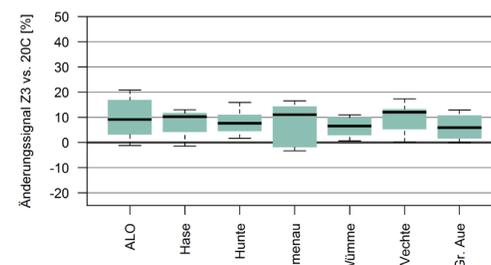
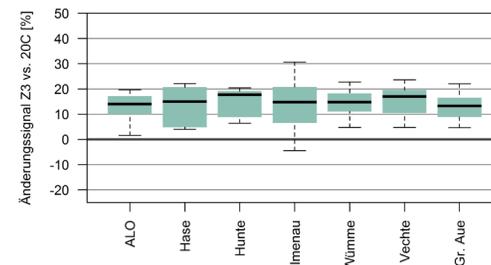
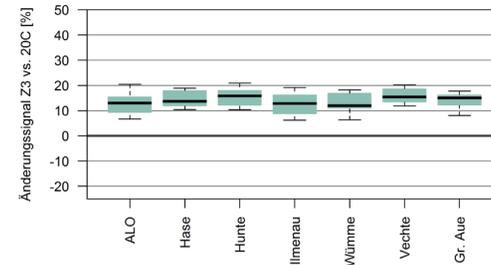


Abbildung 6-10: Projizierte Änderung des 90 %-Quantils des Niederschlags (Pq90) in der fernen Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum (1971-2000) für die Ensembles SRES A1B (linke Spalte) sowie RCP8.5 (rechte Spalte), getrennt nach Jahreszeit. Die Boxplots zeigen die Änderungssignale für die betrachteten Einzugsgebiete.



Tagesmitteltemperatur (Tav):

Für die Tagesmitteltemperatur können deutliche Tendenzen in beiden Zukunftszeiträumen festgestellt werden. Mit Ausnahme der Ergebnisse des SRES A1B-Ensembles im Frühling der nahen Zukunft (Z2) sind alle Änderungssignale robust (Abbildung 6-3).

In der nahen Zukunft können, je nach Saison, Temperaturzunahmen von +0,5 bis +2°C verzeichnet werden, wobei die geringsten Änderungen in Frühling und Sommer, die stärksten in Herbst (RCP8.5) und Winter (SRES A1B) auftreten (Abbildung 6-3).

In der fernen Zukunft (Z3) zeigen beide Ensembles deutliche Temperaturzunahmen, je nach Saison von +2 bis +4,5°C, wobei tendenziell der Südosten Niedersachsens von den stärksten Änderungen betroffen ist. Grundsätzlich ist bei RCP8.5 eine um ca. 0,5°C höhere Temperaturzunahme als bei SRES A1B zu verzeichnen. Dies ist mit dem zugrundeliegenden Emissionsszenario zu begründen (Abbildung 6-3).

Die Boxplots in Abbildung 6-8 verdeutlichen die in den Klimasignalkarten gezeigten deutlichen Temperatursignale bei beiden betrachteten Klimamodellensembles. Tendenziell weist SRES A1B eine etwas geringere Bandbreite auf, als RCP8.5

Niederschlagssumme für Tage mit $N \geq 1\text{mm/d}$ (Psum):

In der nahen Zukunft weist keines der beiden Klimamodellensembles robuste Veränderungen der Niederschlagssumme auf. Bzgl. des mittlere Signals sind sich die Klimaprojektionen weitestgehend einig, dass es in allen vier Jahreszeiten sowohl bei RCP8.5 als auch bei SRES A1B zu keinen statistisch signifikanten Änderungen kommt. Zu den Tendenzen des SRES A1B-Ensembles im Gesamtjahr können dagegen keine sicheren Aussagen gemacht werden (Abbildung 6-4).

Für die ferne Zukunft können sowohl beim SRES A1B-Ensemble als auch beim RCP8.5-Ensemble robuste Niederschlagszunahmen von +10% bis +30% im Winter verzeichnet werden. Bei SRES A1B ist ein Nord-Süd-Gefälle erkennbar. Hier liegt die mittlere Niederschlagszunahme an der Nordseeküste sogar bei +30 bis +40%, im zentralen Niedersachsen bei +20 bis +30% und im Weser- und Leine-Bergland sowie den Niedersächsischen Börden bei +10 bis +20%. Bei RCP8.5 können mit +20 bis +30% die höchsten Zunahmen im südlichen und östlichen Niedersachsen verzeichnet werden, wobei die Harzregion keine robusten Signale zeigt. Im Sommer ist das mittlere Änderungssignal bei RCP8.5 fast gänzlich nicht robust. Das SRES A1B-Ensemble hingegen weist für den Sommer durchweg robuste Niederschlagsabnahmen von -10 bis

-30% auf. Im Frühling können im Z3-Zeitraum Niederschlagszunahmen von größtenteils +20 bis +30% für RCP8.5 festgestellt werden. Ausnahmen bilden Marsch und Geest sowie der Harz. Im Herbst weist lediglich SRES A1B robuste Niederschlagszunahmen von +10 bis +20% im Bereich Stader Geest und Elbmündung auf. Im Ensemble RCP8.5 ist das mittlere Signal unsicher. In der Gesamtjahresbetrachtung ist das mittlere Signal bei SRESA1B nur im Harz und an der Nordseeküste robust und liegt bei 0 bis +20%. RCP8.5 hingegen projiziert fast flächendeckend deutlich ausgeprägte robuste Niederschlagszunahmen von +10 bis +20% (Abbildung 6-4).

Die Boxplots für den Z3-Zeitraum in Abbildung 6-8 verdeutlichen die bereits in den Karten sichtbaren Tendenzen. Sowohl im Sommer als auch im Winter sind die Bandbreiten der Änderungen beim SRES A1B-Modellensemble relativ gering, während die Mediane deutlich über null (Winter) bzw. deutlich unter null (Sommer) liegen. Dies spiegelt sich in den robusten Änderungen in den Klimasignalkarten wieder. Die große Bandbreite im Herbst zeigt, dass die einzelnen Ensemblemitglieder sehr unterschiedliche Änderungen projizieren, die zum Teil positiv, zum Teil negativ ausfallen und im Mittel bei ca. +10% liegen. Wie die Klimasignalkarte in Abbildung 6-4 zeigt, sind die Aussagen jedoch überwiegend statistisch nicht signifikant.

Beim RCP8.5-Ensemble sind die Bandbreiten in allen Jahreszeiten sowie in der Gesamtjahresbetrachtung etwas größer als bei SRES A1B, was durch die größere Vielfalt an Global- und Regionalmodellen begründet werden kann. Die größte Bandbreite findet sich im Sommer und erstreckt sich von etwa -25% bis +15% mit einem Median von ca. +/- 0% in allen Gebieten. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in der Signalkarte (Abbildung 6-4) wieder, wo durchweg ein nicht robustes Signal abgebildet wird. Sowohl bei SRES A1B als auch bei RCP8.5 gibt es in allen Jahreszeiten nur marginale Unterschiede zwischen den mittleren Tendenzen der betrachteten Flusseinzugsgebiete.

90%-Quantil der Tagesniederschläge für Tage mit $N \geq 1\text{mm/d}$ (Pq90):

Das Pq90 ist ein Maß für die Veränderung von hohen Tagesniederschlägen. In der nahen Zukunft projizieren die beiden betrachteten Klimamodellensembles kaum signifikante Änderungen. Einzig im Herbst weist SRES A1B in manchen Regionen robuste Zunahmen von +10 bis +20% auf. Diese liegen vor allem im Weser- und Leinebergland sowie im zentralen Niedersachsen (Abbildung 6-5).

Für die ferne Zukunft können mit Ausnahme des Sommers tendenziell robuste Zunahmen des Pq90 in allen Jahreszeiten festgestellt werden. Im Gesamtjahr liegt



die mittlere Änderung bei 0 bis +10%, vereinzelt bei bis zu +20% (SRES A1B) bzw. bei +10 bis +20% (RCP8.5) und ist flächendeckend robust. Im Frühling weist lediglich das RCP8.5-Ensemble stellenweise eine robuste Änderung von +10 bis 20%, hauptsächlich im nördlichen Niedersachsen, auf. Im Herbst ergeben sich aus beiden Ensembles ausgeprägte Zunahmen des Pq90 von +10 bis +20%, vereinzelt von bis zu +30% (RCP8.5), wobei die Anteile der Regionen mit robusten Signalen nach Süden hin abnehmen. Im Winter zeichnet sich ein ähnliches Bild ab wie im Herbst. Die mittlere Änderung liegt in weiten Teilen Niedersachsens bei +10 bis +20% mit einigen nicht robusten Bereichen in Geest und Börden (SRES A1B) sowie Börden und Harz (RCP8.5) (Abbildung 6-5).

Die räumlich differenzierte Darstellung der Bandbreiten für die Änderung des Pq90 im Z3-Zeitraum (Abbildung 6-9) zeigt zumeist nur kleine Unterschiede zwischen den Betrachtungsgebieten. Im Gesamtjahr ist die Bandbreite des SRES A1B-Ensembles mit -5% bis +20% in allen Gebieten größer als die des RCP8.5-Ensembles mit +5% bis +20%. Im Frühjahr weist das Einzugsgebiet der Ilmenau die größte Spannweite an Änderungen auf, was sich auch in der doppelten Schraffur in der Kartendarstellung zeigt (Abbildung 6-5). Im Herbst ist die Gesamtbandbreite bei SRES A1B generell deutlich größer als bei RCP8.5, trotz ähnlicher Robustheit bei den mittleren Signalen. Im Winter weisen beide Ensembles geringe Spannweiten auf, was sich auch in der großflächigen Robustheit des mittleren Signals in den Karten niederschlägt (Abbildung 6-5). Praktisch alle Klimaprojektionen zeigen hier einheitlich eine Zunahme des Pq90 an. Bei RCP8.5 sind die mittleren 50% der Änderungssignale im Gebiet der Ilmenau mit +18% bis +26% am höchsten, was auch am Ensemblemedian (Abbildung 6-5) in der Kartendarstellung ersichtlich wird.

Größte 3-Tages-Niederschlagssumme (Px3d):

Der maximale 3-Tages-Niederschlag zeigt in den betrachteten Zukunftsperioden insgesamt schwächere Zunahmen als das Pq90. In der nahen Zukunft gibt es keine signifikanten Änderungen (Abbildung 6-6).

In der fernen Zukunft zeigen sich bereichsweise robuste Zunahmen. Im Gesamtjahr liegen diese beim SRES A1B-Ensemble vor allem an der Nordseeküste (+10 bis +20%) und beim RCP8.5-Ensemble im Leine-Bergland sowie im westlichen Niedersachsen (+20 bis +30%). Im Frühling beschränken sich die robusten Zunahmen fast ausschließlich auf das RCP8.5-Ensemble. Hier liegen sie mit +20 bis +30% vor allem im nordwestlichen Niedersachsen. Bei SRES A1B ist lediglich im Harz ein mittleres Signal von +20 bis +30% zu verzeichnen. Im Sommer werden von keinem der beiden Ensembles signifikante Änderungen projiziert. Im Herbst weist

das SRES A1B-Ensemble robuste Zunahmen von +10 bis +20% im nordwestlichen Niedersachsen auf. Das RCP8.5-Ensemble zeigt stärkere Zunahmen von +20 bis +30%, jedoch lediglich im nördlichen Hase- und Hunte-Einzugsgebiet. Im Winter liegen die Zunahmen des Px3d in der gleichen Größenordnung wie im Herbst. Bei SRES A1B gibt es weniger robuste Zunahmen, diese liegen vor allem im westlichen und nördlichen Niedersachsen. Bei RCP8.5 gibt es großflächige Zunahmen im westlichen Niedersachsen sowie im südlichen Leine-Bergland. Während beim SRES A1B Ensemble insgesamt in weiten Teilen Niedersachsens in der fernen Zukunft keine signifikanten Änderungen des Px3d zu verzeichnen sind, besteht beim Ensemble RCP8.5 häufig keine Robustheit bzgl. der mittleren Tendenzen (Abbildung 6-6).

Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Pxcdd):

Die maximale Anzahl aufeinander folgender Trockentage weist wenig robuste Änderungen auf. In der nahen Zukunft sind die mittleren Änderungssignale weder beim SRES A1B-Ensemble noch beim RCP8.5-Ensemble signifikant (Abbildung 6-7).

Auch in der fernen Zukunft gibt es im Gesamtjahr und in den Übergangsjahreszeiten flächendeckend keine signifikanten Änderungen. Im Sommer hingegen weist das SRES A1B -Ensemble für die ferne Zukunft eine deutliche Zunahme der Trockentage von größtenteils +30 bis +40% auf. Die Änderung ist bis auf den Bereich von Stader Geest und Nordseeküste robust. RCP8.5 projiziert hier keine robusten Signale. Im Winter weist das SRES A1B -Ensemble im Z3-Zeitraum stellenweise eine robuste Abnahme der Trockentage von -20 bis -30% auf. Diese Änderungen zeigen sich vor allem im westlichen und nördlichen Niedersachsen. Das RCP8.5-Ensemble weist durchweg keine signifikanten Änderungen auf (Abbildung 6-7).

6.3 Zusammenfassung

- Sowohl RCP8.5 als auch SRES A1B zeigen robuste Temperaturzunahmen von im Mittel +0,5°C bis +2°C bereits in der nahen Zukunft (2021-2050). In der fernen Zukunft (2071-2100) sind die Temperaturzunahmen größer und liegen bei +2°C bis +4,5°C. Mit Ausnahme des Winters sind die Änderungen bei RCP8.5 rund 0,5°C stärker ausgeprägt als bei SRES A1B.
- Für die nahe Zukunft sind die Veränderungen der Niederschlagsgrößen bei beiden Ensembles größtenteils nicht signifikant. Eine Ausnahme bildet das Pq90, für welches das SRES A1B-Ensemble im Herbst stellenweise Zunahmen von +10% bis +20% projiziert.
- In der fernen Zukunft sind bei beiden Modellen



sembles in vielen Regionen deutliche Zunahmen der winterlichen Niederschläge um bis zu 30%, vereinzelt sogar darüber, zu erwarten. Für das Gesamtjahr projiziert RCP8.5 außerdem eine flächendeckende Zunahme der Niederschlagssumme von +10% bis +20%.

- Die Regenmengen bei größeren Niederschlagsereignissen (Pq90, Px3d) können vor allem in der fernen Zukunft regional deutlich zunehmen. Dies betrifft alle Jahreszeiten bis auf den Sommer. Die Zunahmen des Pq90 liegen bei beiden Ensembles zwischen 0 und 20%, sind jedoch über das Gesamtjahr bei RCP8.5 stärker ausgeprägt. Für das Px3d weisen die Ensembles Änderungen von +10% bis +20% (SRES A1B) bzw. +20% bis +30% (RCP8.5), auf, wobei die Signale nur regional als robust bezeichnet werden können.

6.4 Gegenüberstellung von beobachteten Trends und modellierten Änderungssignalen des Klimas

Die Analysen in den Kapiteln 3 und 6 haben die beobachteten und zukünftigen möglichen Entwicklungen der klimatischen Verhältnisse in Niedersachsen aufgezeigt. Aus Sicht der wasserwirtschaftlichen Praxis ist eine wichtige Erkenntnis, ob sich die Entwicklungen der Vergangenheit zukünftig fortsetzen, vielleicht sogar verstärken, und somit bestehende Maßnahmen zum Schutz und zur Anpassung ggf. erweitert werden müssen, oder ob es unter dem Einfluss des Klimawandels zukünftig zu Entwicklungen kommen kann, die bis heute noch nicht beobachtet werden konnten, was ggf. neue Anpassungsstrategien erfordert.

Bzgl. der klimatischen Verhältnisse kann festgehalten werden, dass die mittleren Temperaturen in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich und flächendeckend in Niedersachsen zugenommen haben. Von 1951 bis 2015 beträgt diese Zunahme etwa +1,6°C. Diese Tendenzen setzen sich unter den beiden betrachteten Szenarien in der nahen wie fernen Zukunft unverändert fort und führen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, je nach Klimamodellensemble, im Mittel zu Erwärmungen um +3,0 (SRES A1B) bzw. +3,3°C (RCP8.5) gegenüber 1971 bis 2000.

Für die nahe Zukunft gibt es keine klaren Entwicklungstendenzen gegenüber 1971 bis 2000.

Die Niederschläge haben sich seit 1951 im Jahresmittel kaum verändert, deutliche Zunahmen gab es jedoch im Herbst (+17%) und Winter (+21%), mit Schwerpunkten vor allem im Norden von Niedersachsen. Für die nahe Zukunft gibt es keine klaren Entwicklungstendenzen. In der fernen Zukunft bleiben die mittleren Niederschläge im Gesamtjahr unverändert bzw. können tendenziell leicht zunehmen (im Mittel +6 bis +11%). Die beobachteten deutlicheren Zunahmen setzen sich vor allem im

Winter weiter fort (im Mittel +18 bis +25%) und werden sich zusätzlich im Frühling bemerkbar machen. Im Sommer kann es unter dem Szenario SRES A1B zu bisher nicht beobachteten Abnahmen der Niederschläge (im Mittel -19%) kommen.

Die beobachteten Trends bei hohen bzw. extremen Niederschlägen ähneln denen der mittleren Niederschläge seit 1951. Deutliche Zunahmen sind hierbei ebenfalls im Herbst (Süden) und Winter (Norden) zu erkennen. Auch hier sind die Tendenzen in der nahen Zukunft nicht eindeutig. In der fernen Zukunft setzen sich jedoch die beobachteten Zunahmen im Herbst und Winter sowie vereinzelt im Frühling regional (mit im Mittel +10 bis +20%) fort.

Zusammengefasst zeigt sich im Wesentlichen eine Fortführung der Entwicklungstendenzen der betrachteten klimatischen Kenngrößen seit Mitte des 20. Jahrhunderts bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Diese Konsistenz der Entwicklungen stützt die Plausibilität der Aussagen über das zukünftige Klima unter dem kontinuierlichen Einfluss zunehmender anthropogener Treibhausgase seit der Industrialisierung und kann als ein möglicher Hinweis dafür gesehen werden, dass sich der Klimawandel bereits heute im beobachteten Klimageschehen bemerkbar macht.



7 Analyse der möglichen hydrologischen Verhältnisse der Zukunft

Die Analyse der hydrologischen Verhältnisse wurde mit zwei verschiedenen hydrologischen Modellen durchgeführt. Zum einen wurde das Modell PANTA RHEI benutzt (Kapitel 7.1), zum anderen das Modell HBV-IWW (Kapitel 7.3). Der Fokus der Modellierung mit PANTA RHEI lag auf der Simulation von mittleren und großen Pegelgebieten der Risikogewässer in Niedersachsen nach HWRM-RL. HBV-IWW wurde eingesetzt, um im Hinblick auf eine niedersachsenweite Interpolation von hydrologischen Änderungssignalen für die Zukunft zusätzliche Informationen bereitzustellen. Der Fokus lag hierbei auf der Simulation von kleineren Pegelgebieten (Kopfgebiete), die über ganz Niedersachsen verteilt sind. Zur Ableitung von zukünftigen Abflussveränderungen in Niedersachsen wurde ein Gesamtpool aus den Ergebnissen beider hydrologischen Modelle herangezogen.

7.1 Das hydrologische Modellsystem PANTA RHEI

Für die Analyse möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und insbesondere auf das Hochwasserrisiko wurden in KliBiW Phase 4 kontinuierliche hydrologische Simulationen für sieben Einzugsgebiete in Niedersachsen mit dem hydrologischen Modellsystem PANTA RHEI durchgeführt. Die-

ses 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. Es 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).

7.1.1 Modellbeschreibung

PANTA RHEI ist ein deterministisches, semi-distributives Modell mit einer räumlichen Disaggregation in 3 Ebenen: Gesamteinzugsgebiet, Teileinzugsgebiete und Hydrotope. Hydrotope stellen die kleinsten Berechnungseinheiten 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 geschah auf Basis von Tagesmittelwerten.

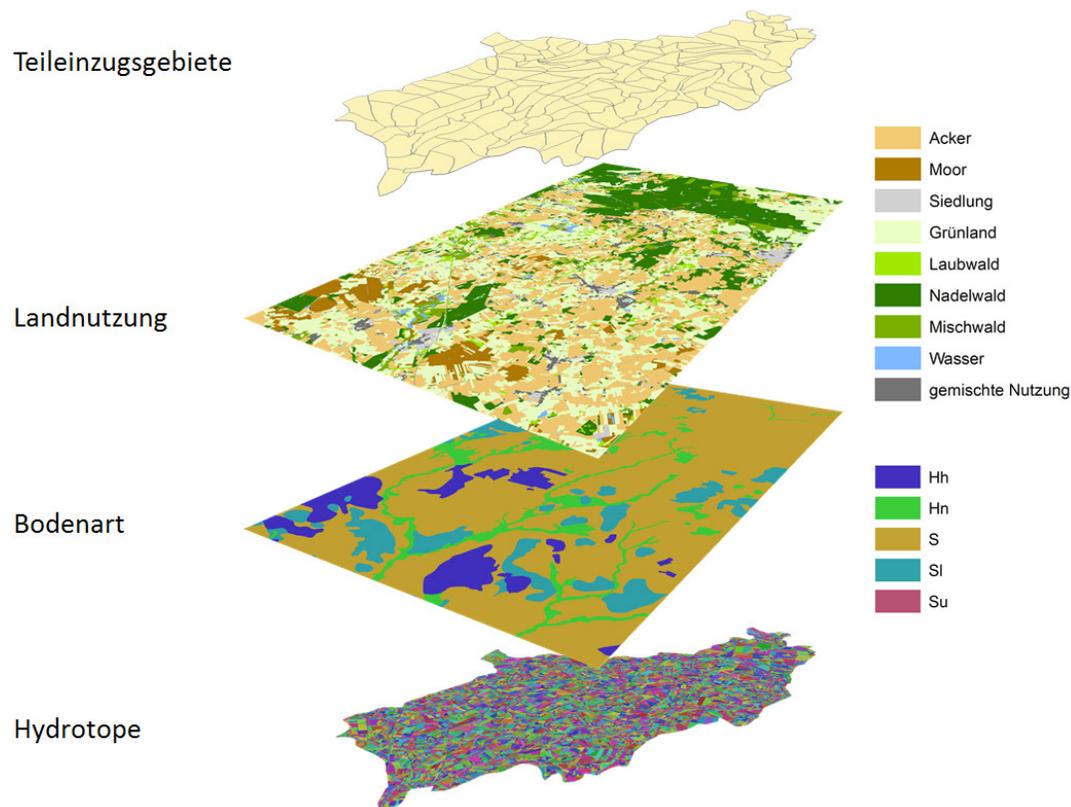


Abbildung 7-1: Schematische Darstellung der Überlagerung von Teileinzugsgebiets-, Landnutzungs- und Bodenkarte zur Erstellung einer Hydrotopokarte am Beispiel des Pegelgebiets Lauenbrück B75 innerhalb des Einzugsgebiets der Wümme.



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. Die folgenden meteorologischen Parameter werden für die Berechnung des Wasserhaushaltes 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 müssen die Betriebsregeln im Modell hinterlegt werden.

7.1.2 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 4 die Simulation des Wasserhaushaltes mit Fokus auf Hochwasserereignissen. Im Folgenden werden diejenigen Modellansätze beschrieben, welche im Rahmen dieser Projektphase verwendet wurden.

Auf der Ebene der Hydrotope 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.

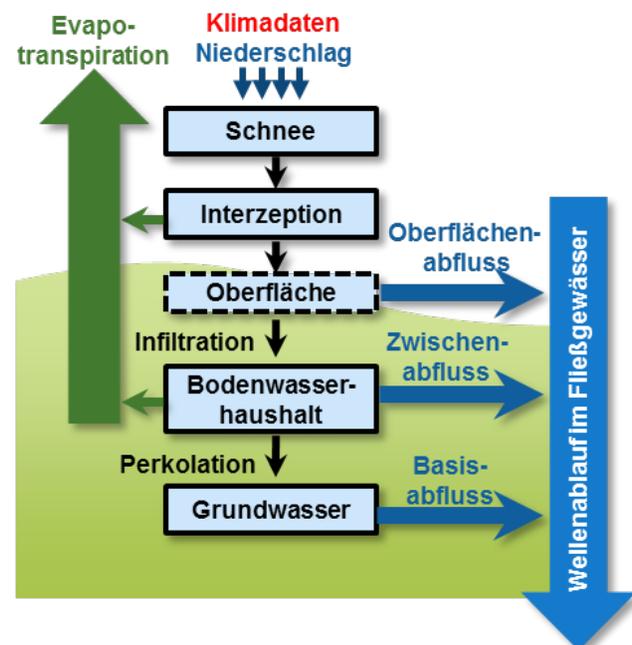


Abbildung 7-2: Schematische Darstellung der hydrologischen Prozesse in PANTA RHEI. Es wird zwischen vertikalen Teilprozessen (Abflussbildung) und lateralen Abflussprozessen (Abflusskonzentration und Wellenablauf) unterschieden.

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



gs 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.

7.1.3 Modellaufbau der untersuchten Einzugsgebiete

Für die sieben betrachteten Einzugsgebiete wurde jeweils ein eigenes Modell aufgebaut. Für das Einzugsgebiet von Aller-Leine-Oker wurde der grundlegende Modellaufbau aus den vorherigen Projektphasen 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.

Tabelle 7-1: Für den Modellaufbau verwendete räumliche Eingangsdaten der Gebietsanteile in Niedersachsen.

Datensatz	Beschreibung
ATKIS	Amtliches Topografisch-Kartographisches Informationssystem (Landnutzungsdaten)
BÜK 50 Niedersachsen	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:50.000
DGM 10	Digitales Geländemodell mit 10m Gitterweite
Hydrographische Karte von Niedersachsen	Gewässernetz und Abgrenzung von (Teil-)Einzugsgebieten

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 Hydrotopen beträgt 0,3 km².

7.1.4 Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher baulicher Anlagen

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 KIIbIW Phase 2 mit dem damaligen Projektpartner Harzwasserwerke GmbH abgestimmt. Sechs Talsperren sind im Modell implementiert: Innerste-, Grane-, Oker-, Ecker-, Söse-, und Odertalsperre.

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 Else 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 41 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.



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



7.1.5 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 beginnend am 1. November und endend 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 (siehe Kapitel 3.2). Im Rahmen der Kalibrierung und Validierung wurden die Kenngrößen der simulierten und beobachteten Abflüsse auf der Basis von Tagesmittelwerten miteinander verglichen.

Da der Fokus dieses Teilprojektes auf der Ermittlung von zukünftigen Änderungen von Hochwasserkenngößen lag, wurde auf die Nachbildung von Hochwasserereignissen bei der Kalibrierung und Validierung besonderen Wert gelegt. Hierfür wurden die simulierten und beobachteten Jahreshöchstwerte aus den Tagesmittelwerten des Abflusses (im Folgenden auch Jahres-HQ genannt) über die Berechnung des Root Mean Square Error (RMSE) verglichen. Als weitere Gütekriterien für die Kalibrierung wurden die prozentuale Abweichung des gesamten Abflussvolumens, die mittlere Abweichung der langjährigen Monatsmittelwerte sowie die Modelleffizienz nach Nash & Sutcliffe (1970) verwendet. 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.

Die Kalibrierung wurde teil-automatisiert mithilfe von Optimierungsalgorithmen in drei Schritten durchgeführt (siehe hierzu auch Gelleszun et al, 2015 sowie Kreye, 2015). Die einzelnen Schritte unterscheiden sich hinsichtlich der zu optimierenden Parameter, der Zielfunktionen und der angewandten Algorithmen. Im ersten Schritt wurde das Abflussvolumen angepasst (Zielfunktion: Minimierung des Volumenfehlers), in Schritt zwei die langjährigen Monatsmittelwerte (Zielfunktion: Minimierung der gemittelten Beträge aus den langjährigen monatlichen Abweichungen) und im dritten Schritt sowohl die Abflussganglinie (Zielfunktion: Maximierung der Modelleffizienz) als auch die Jahreshöchstwerte des Abflusses (Zielfunktion: Minimierung des RMSE

der Jahres-HQ). Für den ersten Schritt wurde das Brent-Verfahren (Brent, 2002) verwendet. Dieser Algorithmus eignet sich für die Anpassung eines einzelnen Parameters. Für die Schritte zwei und drei, in denen jeweils mehrere Parameter gleichzeitig angepasst wurden, wurde der ableitungsfreie Downhill-Simplex-Algorithmus (Nelder & Mead, 1965) verwendet.

Eine Übersicht über die erzielten Modellgüten an den Referenzpegeln für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum gibt Tabelle 7-2. Die Modelleffizienzen für beide Zeiträume liegen für die meisten Referenzpegel im Bereich zwischen 0,7 bis 0,9 mit einem Mittelwert von 0,8 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 7-2: 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). *Flächengröße nach der Umleitung des Bornbachs.

Einzugsgebiet	Pegel	Fließgewässer	Fläche [km ²]	Kalibrierung			Validierung		
				E [-]	VF [%]	MMA [%]	E [-]	VF [%]	MMA [%]
Aller-Leine-Oker	Reckershausen	Leine	321	0,80	-4,61	3,87	0,57	12,90	16,29
	Göttingen	Leine	633	0,82	-8,82	9,13	0,63	10,55	12,20
	Northeim	Rhume	1176	0,87	-4,07	4,82	0,86	5,41	6,43
	Poppenburg	Leine	3463	0,85	-3,49	4,18	0,84	4,23	4,86
	Derneburg	Nette	309	0,82	-5,04	4,66	0,80	9,74	12,49
	Heinde	Innerste	897	0,87	-3,16	5,00	0,90	4,40	5,84
	Herrenhausen	Leine	5304	0,88	-3,22	3,58	0,88	3,99	5,21
	Wunstorf	Westaue	588	0,83	-3,91	6,20	0,79	8,60	16,14
	Ohrum	Oker	813	0,85	7,35	13,63	0,87	4,21	11,27
	Glentorf	Schunter	296	0,72	-0,40	4,35	0,75	6,87	11,34
	Groß Schwülper	Oker	1734	0,86	-2,43	7,64	0,86	2,19	7,54
	Brenneckenbrück	Aller	1638	0,79	-8,52	9,99	0,79	10,80	15,40
	Celle	Aller	4374	0,85	-7,13	9,30	0,88	2,05	7,53
	Marklendorf	Aller	7209	0,86	-10,30	11,16	0,84	12,99	15,85
	Brock	Böhme	285	0,71	-5,63	6,20	0,71	5,85	7,33
Rethem	Aller	14730	0,89	-6,42	6,75	0,87	6,50	8,47	
Wümme	Lauenbrück B75	Wümme	248	0,76	-5,83	7,71	0,77	4,33	9,99
	Hellwege	Wümme	908	0,81	-5,23	7,32	0,80	3,82	8,61
Ilmenau	Niendorf II S	Stederau	285	0,40	-14,60	14,80	0,46	15,12	18,10
	Bienenbüttel	Ilmenau	1434	0,46	-9,14	10,03	0,30	9,69	10,60
Gr. Aue	Heide OP	Große Aue	1016	0,81	-7,30	10,96	0,87	3,62	11,94
Hunte	Bohmte	Hunte	168	0,80	-3,84	6,21	0,86	4,56	13,71
	Schäferhof	Hunte	388*	0,84	-2,33	11,63	0,86	1,88	7,41
	Düste	Wagenfelder Aue	199	0,77	-0,41	8,37	0,81	2,51	8,64
	Hoopen	Hunte	756	0,83	-2,41	16,50	0,86	5,71	16,94
	Colnrade OP	Hunte	1302	0,81	-2,73	6,03	0,89	3,73	8,25
	Huntlosen II	Hunte	1698	0,78	-4,92	7,10	0,85	6,72	8,89
Hase	Wissingen	Wierau	63	0,80	-4,20	8,36	0,79	8,01	10,24
	Lüstringen	Hase	209	0,85	-2,78	6,10	0,89	4,07	6,77
	Wersen	Düte	222	0,85	-1,53	3,82	0,83	3,96	5,59
	Bramsche	Hase	674	0,83	-1,78	3,31	0,85	3,51	5,03
	Addrup	Fladderkanal	228	0,78	-6,74	6,37	0,82	8,47	11,44
	Lodbergen	Löninger Mühlenbach	70	0,74	3,05	3,93	0,79	-1,90	4,30
	Bunnen	Große Hase	1771	0,80	-1,31	6,28	0,82	8,64	11,44
	Herzlake	Hase	2236	0,84	-3,22	6,88	0,86	3,74	5,66
	Haselünne	Hase	2542	0,85	-5,37	7,30	0,85	4,49	5,91
Vechte	Ohne	Vechte	393	0,85	-2,87	10,06	0,86	3,98	15,39
	Wehr Neuhaus	Vechte	702	0,83	-2,56	10,24	0,87	0,14	16,63
	Lage 1	Dinkel Umflut	484	0,80	-7,22	8,65	0,87	-1,09	8,64
	Lage Gesamt	Alte Dinkel	611	0,80	-5,25	12,86	0,89	-0,52	14,18
	Emlichheim	Vechte	1731	0,89	-1,23	8,63	0,91	3,05	12,64



Aufgrund der Vielzahl von Referenzpegeln werden die Ergebnisse der Kalibrierung exemplarisch für den Pegel Emlichheim, den Gebietsauslasspegel des Einzugsgebietes der Vechte, dargestellt.

Die Abflusszeitreihen aus der Simulation und der Beobachtung für diesen Pegel sind für den gesamten Kalibrierungszeitraum in Abbildung 7-4 und für einen kürzeren Zeitraum innerhalb der Validierungsperiode (hydrologische Jahre 2005-2008) in Abbildung 7-5 dargestellt. Der Vergleich von beobachteter und simulierter Ganglinie ermöglicht die visuelle Beurteilung der Simulationsgüte, welche für den Pegel Emlichheim als sehr gut eingestuft werden kann.

Für die Erstellung der Hochwasserstatistik aus Tagesmittelwerten des Abflusses wurde die Gumbel-Verteilung verwendet. Die Parameter der Verteilungsfunktion wurden mit Hilfe der L-Momente (Greenwood et al., 1979; Hosking, 1990) geschätzt. Für eine ausreichend große Stichprobe zur Erstellung der Extremwertstatistik wurde für alle Pegel jeweils der Gesamtzeitraum,

welcher sowohl den Kalibrierungs- als auch den Validierungszeitraum umfasst, verwendet. In der Regel ist dies der Zeitraum 1971-2011 (40 Jahre). Bei eingeschränkter Datenverfügbarkeit ist der Zeitraum kürzer, umfasst jedoch mindestens 25 Jahre. Ein Vergleich der Hochwasserstatistik aus Simulation und Beobachtung ist in Abbildung 7-6 für den Pegel Emlichheim dargestellt. Die zugrunde liegenden Jahreshöchstwerte des Abflusses zeigt Abbildung 7-7. Die Anpassung der Jahres-HQ wie auch die der Verteilungsfunktion ist als sehr gut einzustufen, da die Übereinstimmung der Kennwerte für Wiederkehrintervalle zwischen 2 und 100 Jahren sehr hoch ist. Dieses hohe Maß an Übereinstimmung wird nicht für alle Referenzpegel erreicht. Jedoch zeigen auch die Hochwasserkennwerte HQ5 und HQ100 für alle Referenzpegel gute Ergebnisse hinsichtlich der Anpassung der Simulation an die Beobachtung. Die Kennwerte wurden jeweils aus der Anpassung von Gumbel-Verteilungsfunktionen ermittelt. Die Abflussspenden für diese Kennwerte sind in Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9 dargestellt.

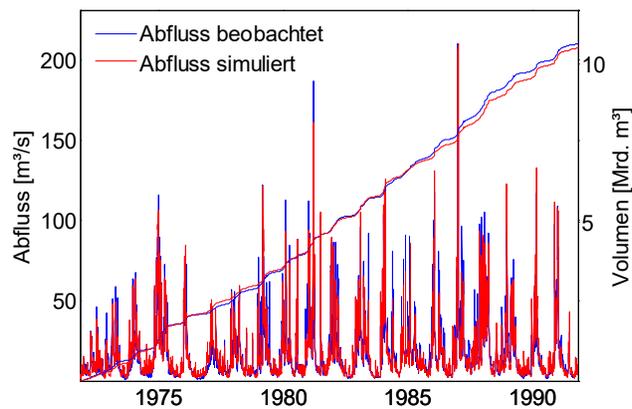


Abbildung 7-4: Ganglinien und Summenlinien der simulierten und beobachteten Abflüsse (Tagesmittelwerte) für den Pegel Emlichheim (Vechte) für die Kalibrierungsperiode 1971-1991.

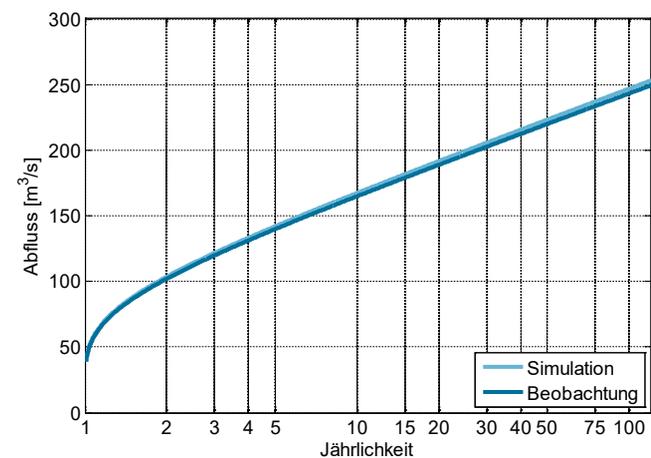


Abbildung 7-6: Hochwasserstatistik für den Pegel Emlichheim für den Zeitraum 1971-2011. Zugrunde gelegt wurde die Gumbel-Verteilungsfunktion.

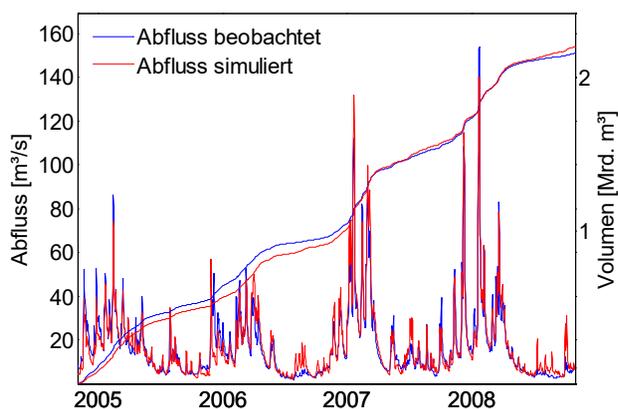


Abbildung 7-5: Ganglinien und Summenlinien der simulierten und beobachteten Abflüsse (Tagesmittelwerte) für den Pegel Emlichheim (Vechte) für den Zeitraum 11/2004 - 10/2008.

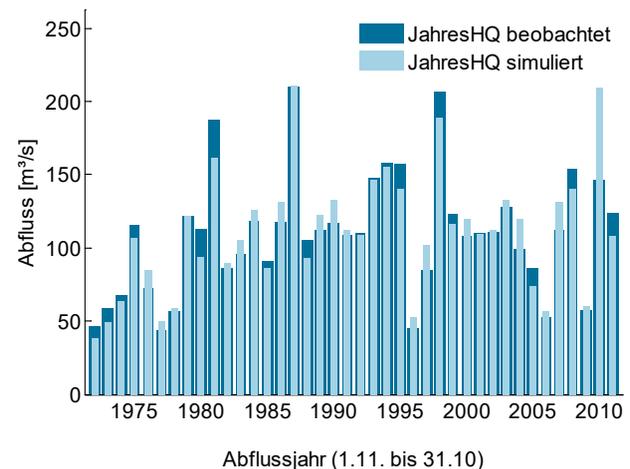


Abbildung 7-7: Simulierte und beobachtete Jahreshöchstwerte des Abflusses (JahresHQ) aus Tagesmittelwerten für den Pegel Emlichheim für den Zeitraum 1971-2011.

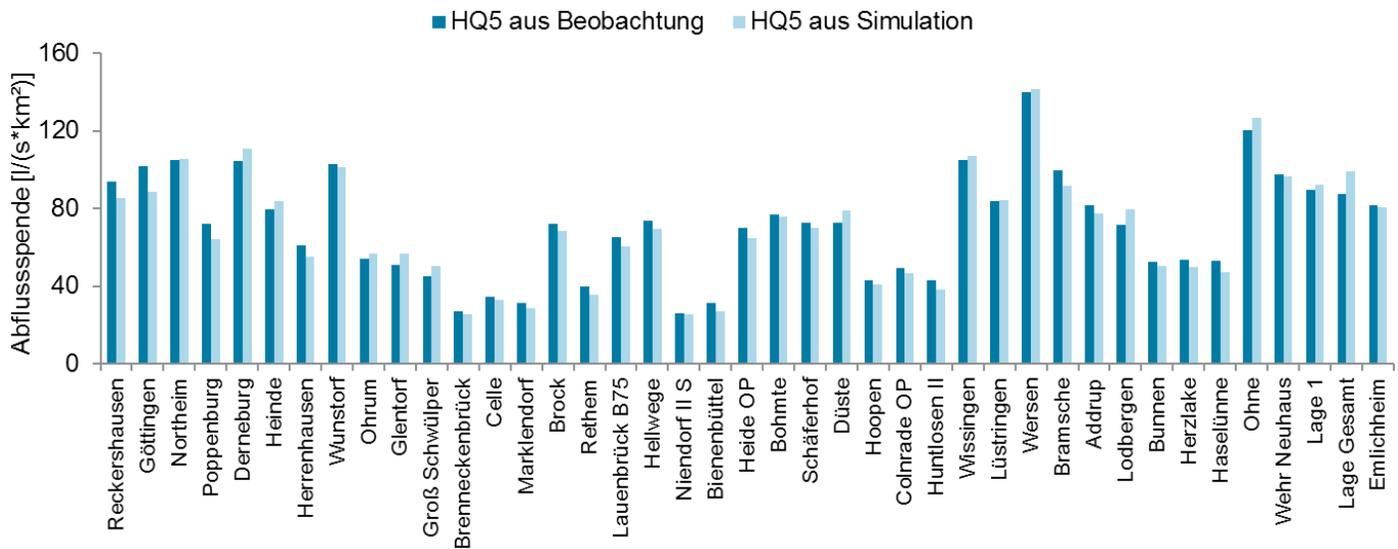


Abbildung 7-8: HQ5-Kennwerte als Abflussspenden für Simulation und Beobachtung für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum für die Referenzpegel. Zugrunde gelegt wurde die Gumbel-Verteilungsfunktion.

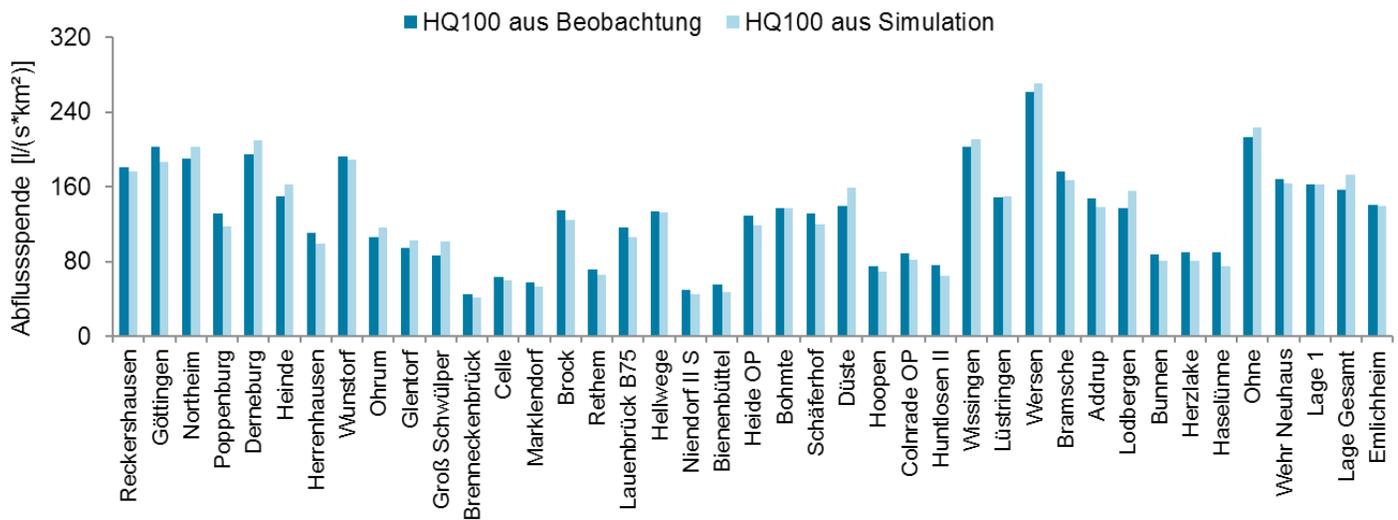


Abbildung 7-9: HQ100-Kennwerte als Abflussspenden für Simulation und Beobachtung für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum für die Referenzpegel. Zugrunde gelegt wurde die Gumbel-Verteilungsfunktion.

7.2 Simulation ausgewählter Abflusskenngrößen mit PANTA RHEI

Für die Ermittlung der möglichen zukünftigen Veränderungen des Abflussverhaltens und insbesondere der Hochwasserkenngrößen 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 Zeitreihen der zuvor interpolierten und Bias-adjustierten Klimamodelldaten (siehe Kapitel 5.3 und 5.6) verwendet. Analog zu dem Vorgehen bei der Kalibrierung wurden auch für die Simulationen mit Klimamodelldaten meteorologische Eingangsdaten mit täglicher Auflösung verwendet. Es wurden Simulationen mit meteorologischen Zeitreihen von insgesamt 18 Klimamodellläufen durchgeführt, wobei die jeweils drei Realisa-

tionen von WETTREG2006 bzw. WETTREG2010 für die Auswertungen durch Bildung des Mittelwertes aggregiert wurden. Somit wurden auf diese Weise 14 Klimamodellketten unterschieden. Hiervon sind 6 Läufe dem SRES A1B-Ensemble und 8 Läufe dem RCP8.5-Ensemble zuzuordnen (vgl. Kapitel 5.2). Bei der statistischen Auswertung wurden die beiden Ensembles getrennt behandelt.

Für das Einzugsgebiet der Hunte wurde für die Simulationen mit den Klimamodelldaten für den gesamten Zeitraum 1971-2100 die Modellversion verwendet, welche nach der Bornbachumleitung gültig ist (siehe Kapitel 7.1.4). Somit basieren die berechneten Änderungssignale lediglich auf sich ändernden klimatischen Randbedingungen. Wasserwirtschaftliche Eingriffe, die in der Vergangenheit stattfanden, haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse.



7.2.1 Auswertung der Modellläufe der Referenzperiode

Die aus den Simulationsläufen mit den Klimamodell-daten für die Referenzperiode 1971-2000 ermittelten Abflusskenngrößen wurden mit denjenigen der Beobachtung verglichen. Der Zeitraum bezieht sich auf die hydrologischen Jahre, d.h. er beginnt am 01.11.1970 und endet am 31.10.2000. Die Auswertungen werden exemplarisch für die beiden Referenzpegel Rethem (Aller) und Haselünne (Hase) gezeigt, da diese die Ge-

bietsauslasspegel der beiden größten Einzugsgebiete sind.

In Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11 sind die lang-jährigen Monatsmittelwerte des Abflusses für den Zeitraum 1971-2000 aus den beobachteten Zeitreihen und den Modellläufen getrennt nach SRES A1B- und RCP8.5-Ensemble dargestellt. Es zeigt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung der jahreszeitlichen Dynamik des Abflusses aus den Modellläufen und der Beobachtung für beide Ensembles.

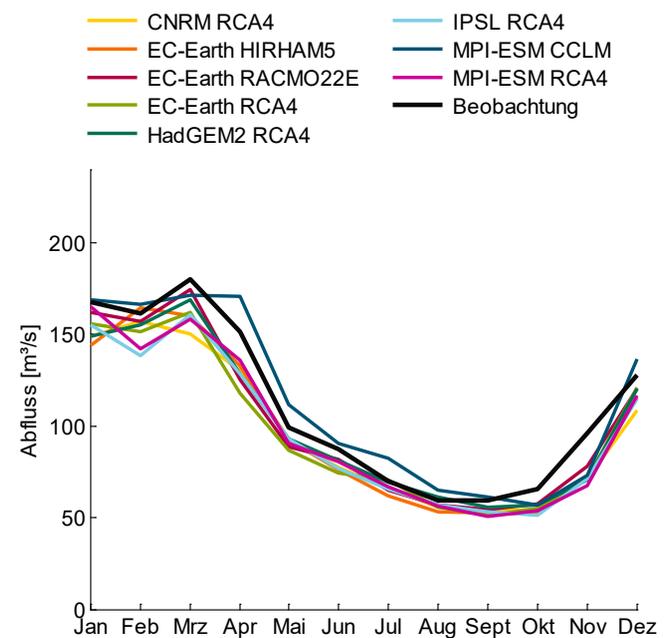
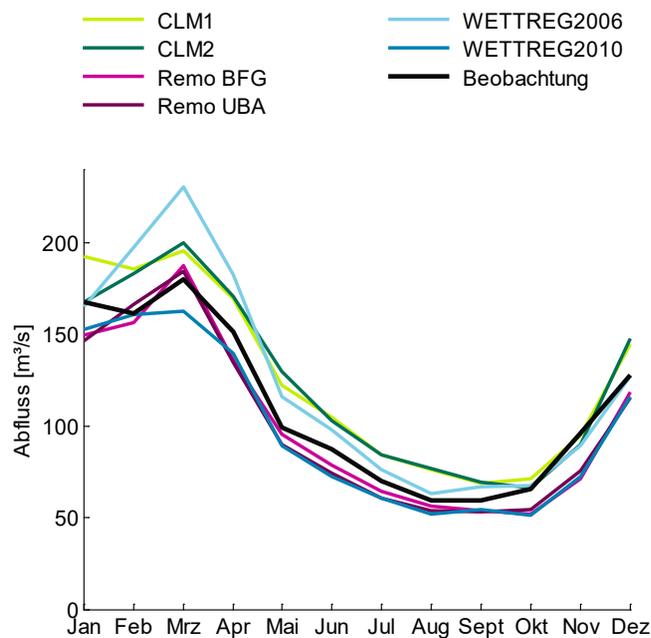


Abbildung 7-10: Vergleich der langjährigen Monatsmittelwerte des Abflusses aus den Modellläufen und der Beobachtung für den Zeitraum 1971-2000 für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) für den Pegel Rethem. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5.

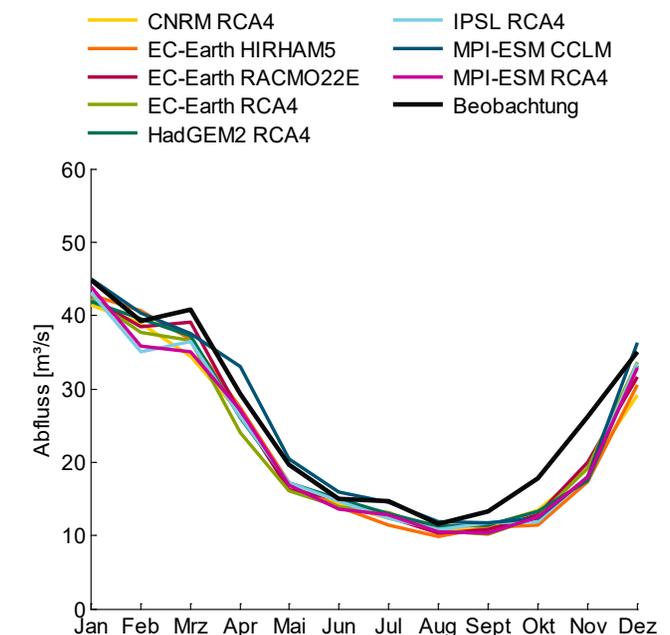
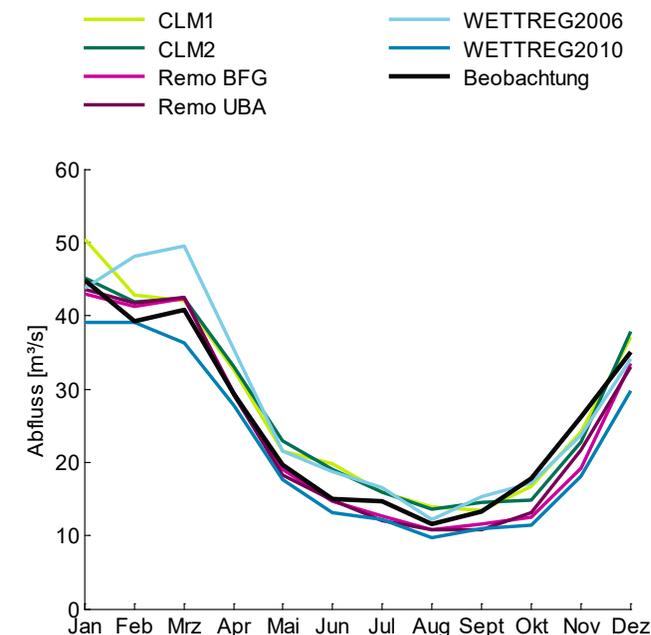


Abbildung 7-11: Vergleich der langjährigen Monatsmittelwerte des Abflusses aus den Modellläufen und der Beobachtung für den Zeitraum 1971-2000 für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) für den Pegel Haselünne. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5.



Die Auswertung der Modellläufe hinsichtlich der Hochwasserkenngößen zeigt, dass die Simulationen mit einigen Klimamodellketten eine sehr gute Anpassung an die Beobachtung aufweisen. Andere Modelle zeigen aber teilweise auch deutliche Abweichungen. Häufig werden die HQ-Kennwerte unterschätzt. Eine Ursache hierfür ist die leichte Unterschätzung der extremen

Niederschläge durch die (meisten) Klimamodellketten nach der Bias-Adjustierung (vgl. Kapitel 5.6). Die Übereinstimmung einzelner Ensemble-Mitglieder mit der Beobachtung unterscheidet sich an den betrachteten Referenzpegeln sehr stark (siehe Abbildung 7-12 und Abbildung 7-13).

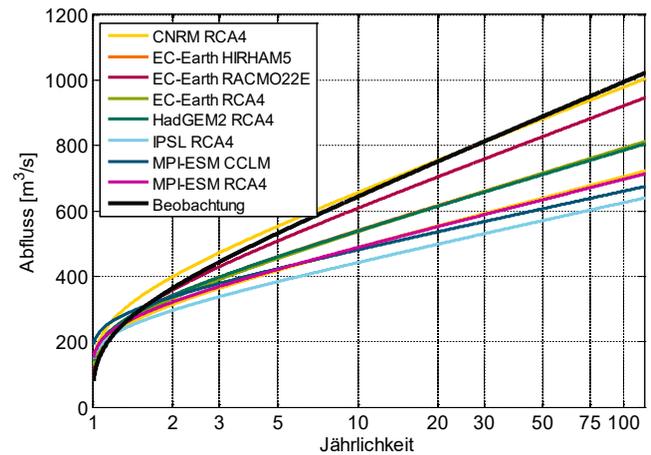
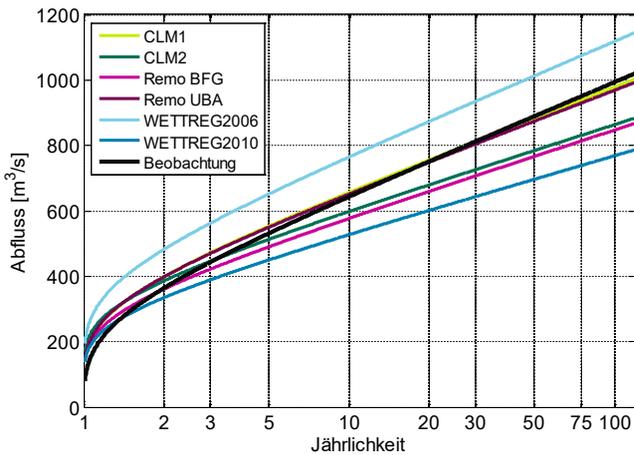


Abbildung 7-12: Hochwasserstatistik für den Pegel Rethem für den Zeitraum 1971-2000 basierend auf Tagesmittelwerten des SRES A1B-Ensembles (links) und des RCP8.5-Ensembles (rechts) sowie der Beobachtung. Zugrunde gelegt wurde die Gumbel-Verteilungsfunktion. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5.

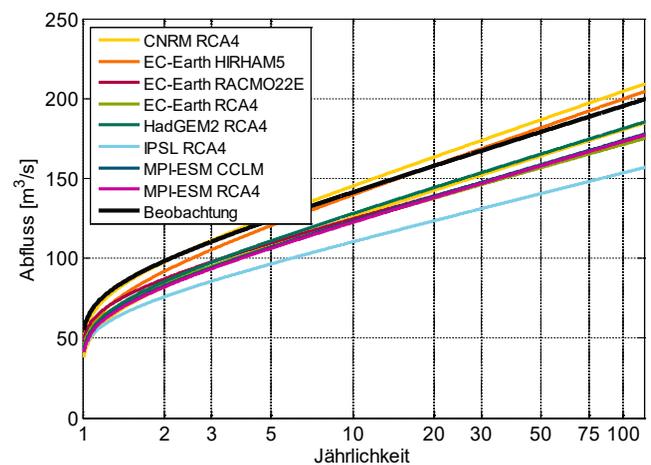
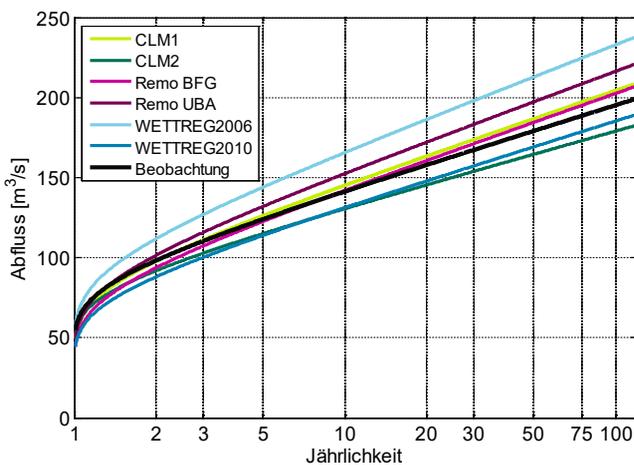


Abbildung 7-13: Hochwasserstatistik für den Pegel Haselünne für den Zeitraum 1971-2000 basierend auf Tagesmittelwerten des SRES A1B-Ensembles (links) und des RCP8.5-Ensembles (rechts) sowie der Beobachtung. Zugrunde gelegt wurde die Gumbel-Verteilungsfunktion. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5.



7.2.2 Auswertung der Änderungssignale für Abflusskenngrößen

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 im Referenzzeitraum (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 Hochwasserkenngrößen 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. Die Änderungssignale der einzelnen WETTREG-Realisationen wurden gemittelt. Aus den Einzelwerten bzw. den zuvor aggregierten WETTREG-Ergebnissen wurde dann, getrennt für das SRES A1B- und das RCP8.5-Ensemble, der Median der Änderungssignale ermittelt.

Um Aussagen zu saisonalen Änderungen von Hochwasserkenngrößen 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 je Ensemble ergibt, erfolgt überwiegend in Boxplots. Diese zeigen neben dem Median des jeweiligen Ensembles (SRES A1B bzw. RCP8.5) auch das 25%- und 75%-Perzentil („box“) sowie die gesamte Spannweite der Änderungen der einzelnen Modellketten (Länge der Whisker).

Im Folgenden werden die mittleren Änderungsfaktoren zusammen mit den Bandbreiten an allen Referenzpegeln für die Kenngrößen MQ, HQ₅ und HQ₁₀₀ für beide Ensembles und Zukunftszeiträume dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine detaillierte Darstellung der Änderungsfaktoren bezogen auf die Monats- und Quartalsmittelwerte sowie die Entwicklung des gleitenden 30-Jahres-Mittelwertes für MQ und MHQ exemplarisch für den Pegel Rethem (Aller), da dieser Pegel der Gebietsauslasspegel des größten betrachteten Einzugsgebiets ist. Die entsprechenden Abbildungen für die anderen Gebietsauslasspegel sind im Anhang gezeigt.

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 7.1.5). Die Ergebnisse hinsichtlich der Änderungssignale für diese beiden Pegel sind daher mit höheren Unsicherheiten behaftet.

7.2.2.1 Entwicklung für Jahresmittelwerte

Die simulierten Änderungssignale für die Jahresmittelwerte des Abflusses (MQ) sind für das SRES A1B-Ensemble in Abbildung 7-14 und Abbildung 7-15 und für das RCP8.5-Ensemble in Abbildung 7-16 und Abbildung 7-17 dargestellt.

Der Median des SRES A1B-Ensembles zeigt eine deutliche Zunahme des mittleren Abflusses MQ für alle Referenzpegel und beide zukünftigen Zeiträume um bis zu ca. 20%. Die Spannweite innerhalb des Ensembles ist jedoch groß und mit einzelnen Modellketten wird auch eine Abnahme simuliert. In Abbildung 7-18 sind die Änderungssignale für die einzelnen Ensemble-Mitglieder exemplarisch für den Pegel Rethem dargestellt. Hier zeigt sich, dass insbesondere mit ECHAM5-Lauf1_WETTREG2010 deutlich trockenere Bedingungen simuliert werden als mit den übrigen Modellketten. Ein ähnliches Bild zeigen auch die Ergebnisse für die anderen Referenzpegel.

Der Median des RCP8.5-Ensembles deutet auf eine leichte Zunahme des mittleren Abflusses für die nahe Zukunft und eine deutliche Zunahme für die ferne Zukunft hin, wobei die Spannweite für die ferne Zukunft deutlich größer ist. Mit Ausnahme des Pegels Ohrum wird für alle Pegel mit allen Ensemble-Mitgliedern eine Zunahme für die ferne Zukunft simuliert.

Die in Abbildung 7-19 dargestellten gleitenden Mittelwerte des Abflusses über 30 Jahre für den Pegel Rethem zeigen, dass dieser Wert im Laufe der simulierten Zeitspanne von 1971-2100 deutliche Schwankungen aufweist und die errechneten Änderungssignale für die Jahresmittelwerte auch stark beeinflusst sind von der Auswahl der Zeiträume, die miteinander verglichen werden.

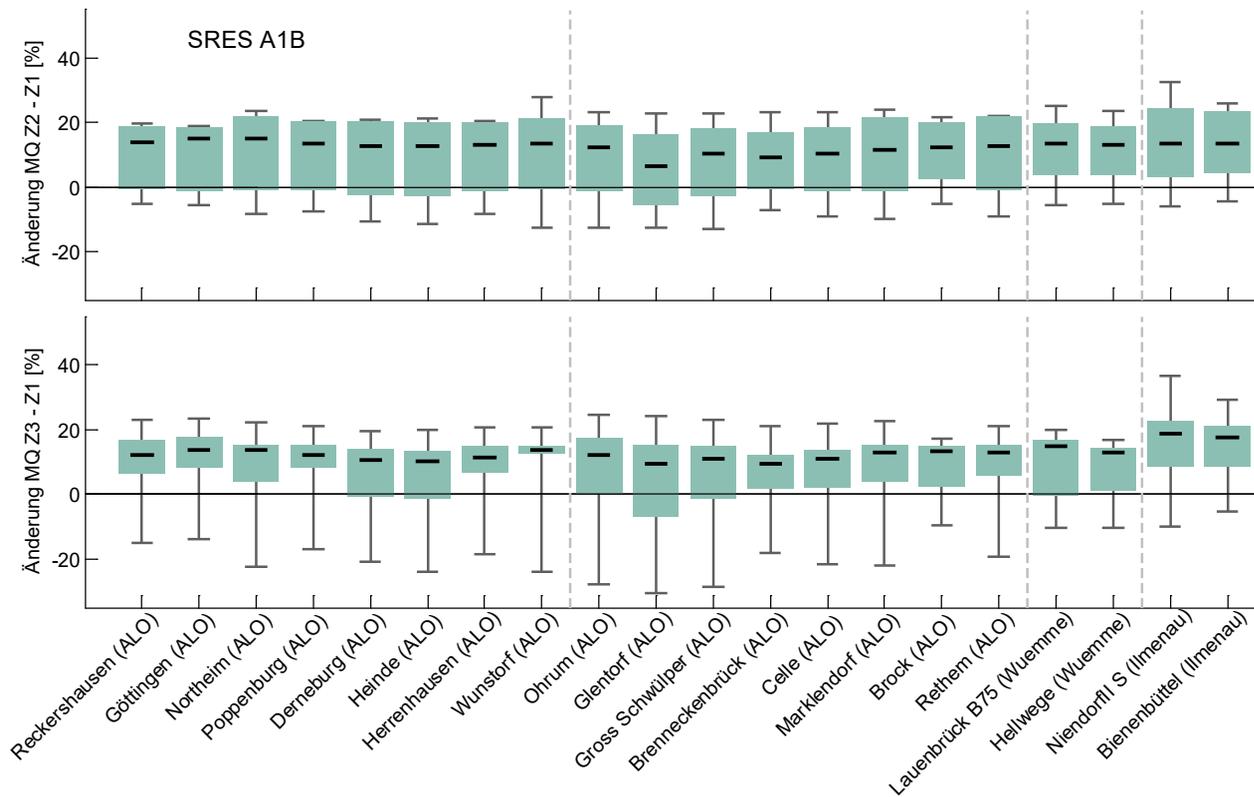


Abbildung 7-14: Änderungssignale für die Jahresmittelwerte des Abflusses (MQ) für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles.

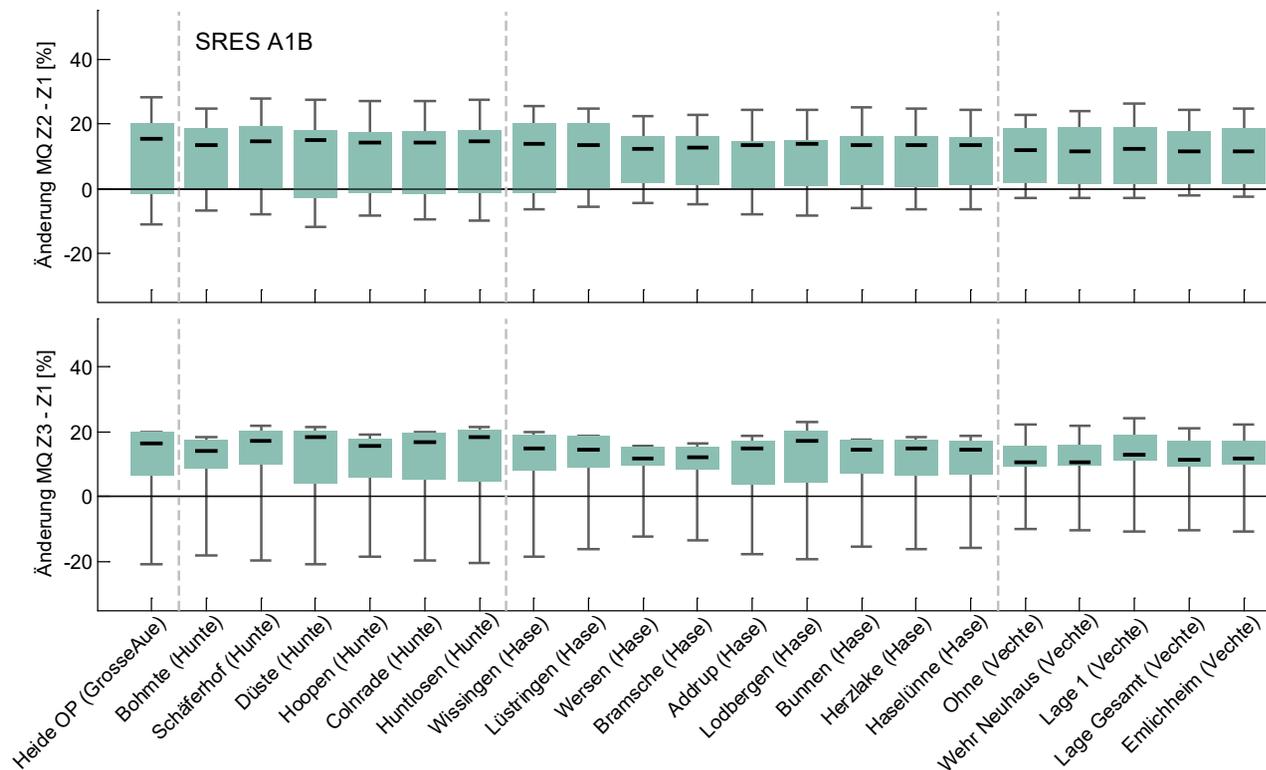


Abbildung 7-15: Änderungssignale für Jahresmittelwerte des Abflusses (MQ) für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Große Aue, Hunte, Hase und Vechte für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles.

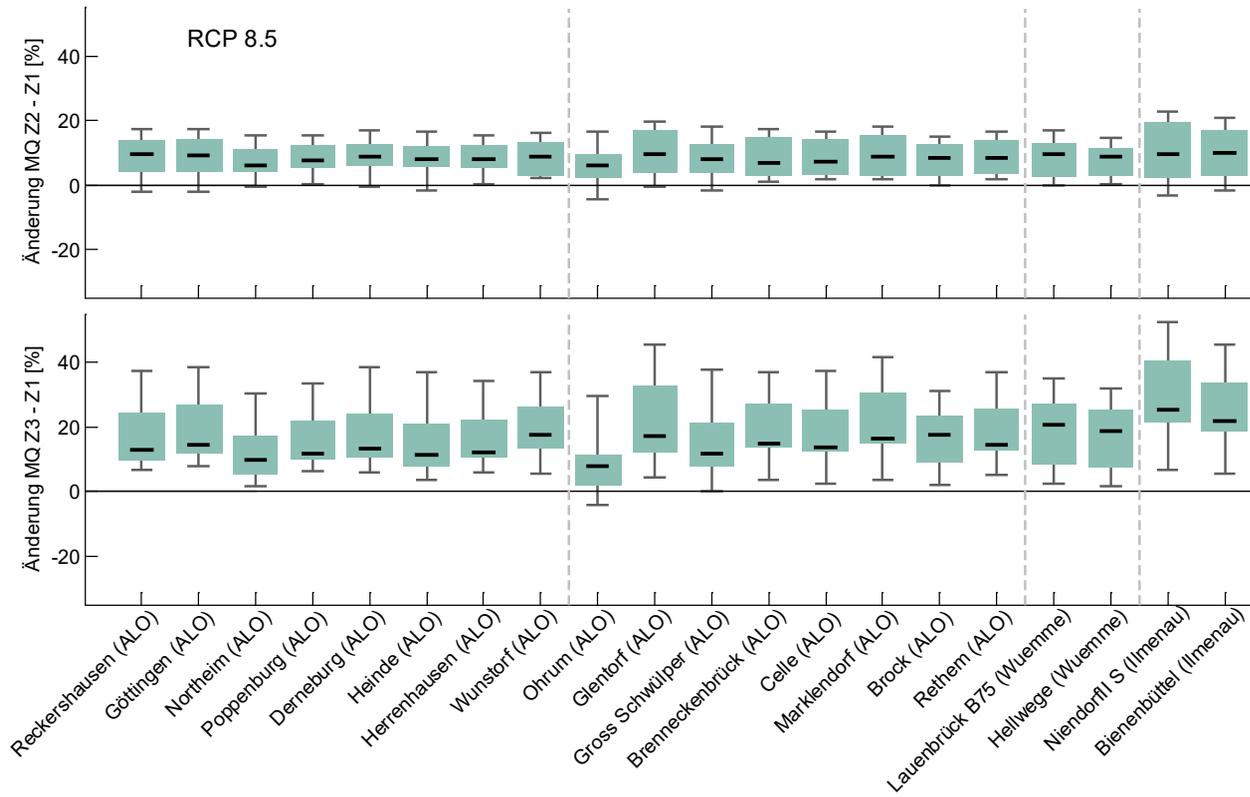


Abbildung 7-16: Änderungssignale für Jahresmittelwerte des Abflusses (MQ) für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles.

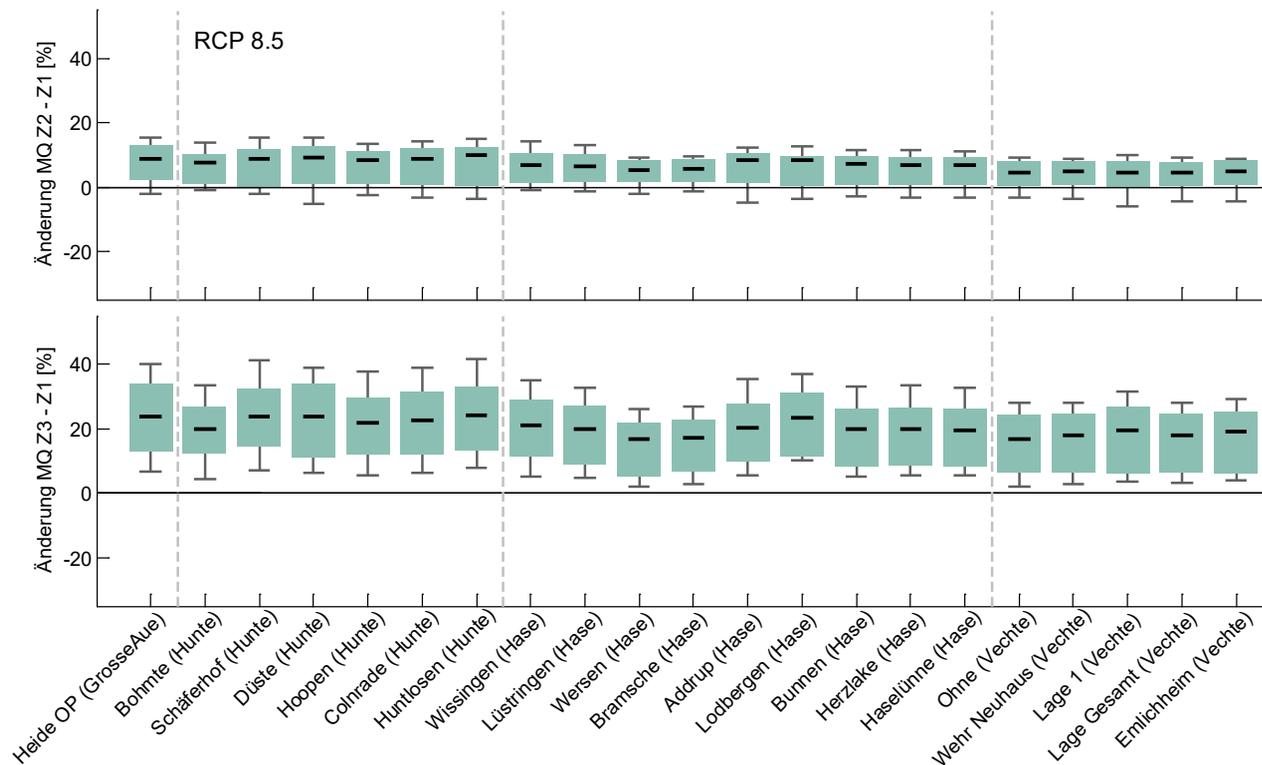


Abbildung 7-17: Änderungssignale für Jahresmittelwerte des Abflusses (MQ) für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Große Aue, Hunte, Hase und Vechte für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles.

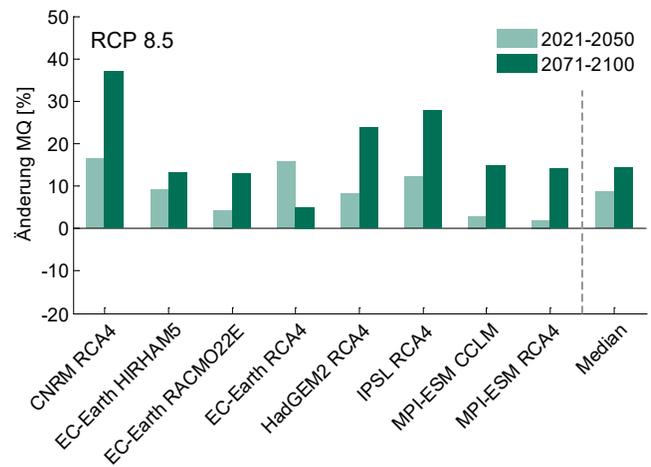
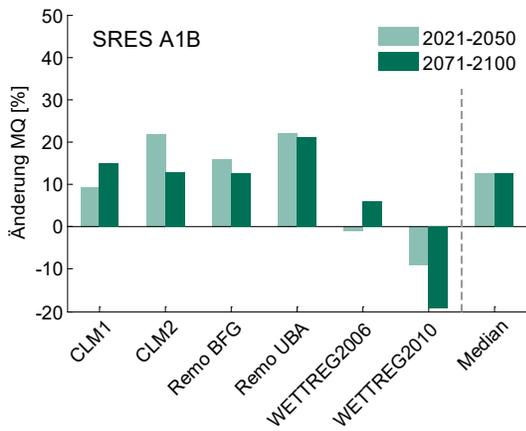


Abbildung 7-18: Änderungssignale für die Jahresmittelwerte des Abflusses (MQ) für den Pegel Rethem für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) mit dem jeweiligen Ensemble-Median für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5.

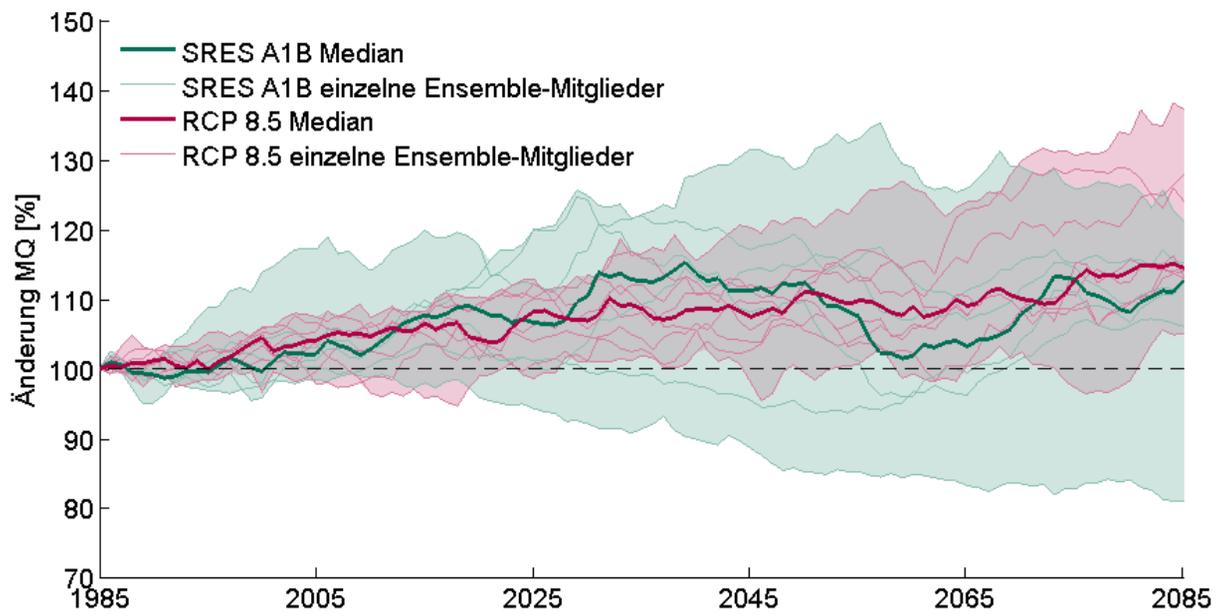


Abbildung 7-19: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwertes des Abflusses (MQ) für die einzelnen Mitglieder des SRES A1B- und des RCP8.5-Ensembles sowie für die Ensemble-Mediane für den Zeitraum 1971-2100 (Mittelwert 1971-2000 entspricht 100%) für den Pegel Rethem. Die transparenten Flächen geben die Spannweiten des jeweiligen Ensembles an.



7.2.2.2 Entwicklung der Quartals- und Monatsmittelwerte

Bezüglich der Quartalsmittelwerte für den Pegel Rethem (Abbildung 7-20) zeigen die Mediane beider Ensembles für beide zukünftigen Zeiträume eine deutliche Zunahme der Abflüsse im Winter (Dezember bis Februar). Für die anderen Jahreszeiten wird mit dem RCP8.5-Ensemble eine leichte Zunahme für beide Zeiträume simuliert. Für den Frühling zeigt auch das SRES A1B-Ensemble eine Zunahme für beide Zeiträume. Für den Sommer und Herbst wird für die nahe Zukunft eine leichte Zunahme, für die ferne Zukunft eine leichte Abnahme simuliert.

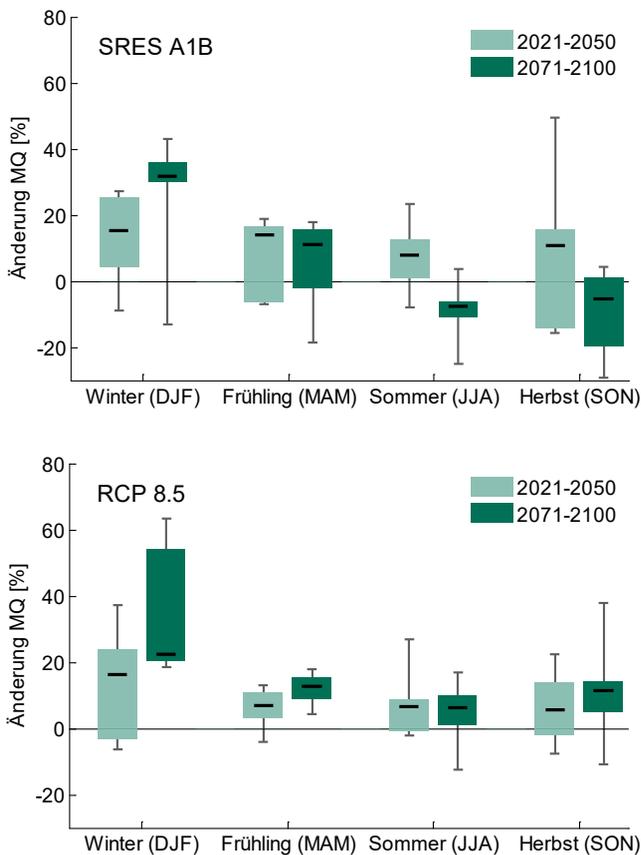


Abbildung 7-20: Änderungssignale für die mittleren Quartalsabflüsse (MQ) für den Pegel Rethem für das SRES A1B-Ensemble (oben) und das RCP8.5-Ensemble (unten) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000.

Abbildung 7-21 zeigt die Absolutwerte der langjährigen monatlichen Mittelwerte für den Pegel Rethem für alle drei betrachteten Zeiträume. In den Wintermonaten werden für das SRES A1B-Ensemble und für das RCP8.5-Ensemble ähnliche Entwicklungen hin zu feuchteren Bedingungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts simuliert. Unterschiede ergeben sich hauptsächlich in den Monaten Juni bis November. Hier zeigt der Median des SRES A1B-Ensembles eine Abnahme der Abflüsse für Z3, der Median des RCP8.5-

sembles weist kaum Unterschiede zwischen den drei Zeiträumen auf. Die Veränderungen der langjährigen Monatsmittelwerte sind im Winter für beide Ensembles deutlich größer als im Sommer.

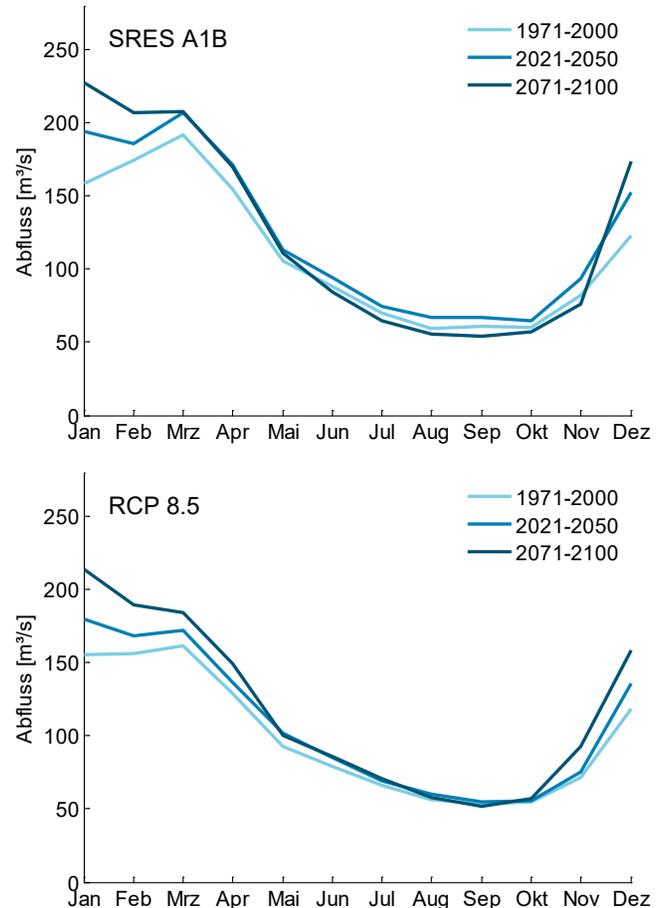


Abbildung 7-21: Median der langjährigen Monatsmittelwerte für den Pegel Rethem für das SRES A1B-Ensemble (oben) und das RCP8.5-Ensemble (unten).

7.2.2.3 Entwicklung der Hochwasserkenngrößen

Die Auswertung der mittleren Jahreshöchstwerte des Abflusses (MHQ) aus Tagesmittelwerten zeigt für den Pegel Rethem für die Mediane aus beiden Ensembles eine Zunahme für Z2 und Z3, wobei die Änderungen für das RCP8.5-Ensemble etwas größer sind (siehe Abbildung 7-22). Die Betrachtung der Änderungssignale der einzelnen Ensemble-Mitglieder ergibt ein differenzierteres Bild. Die überwiegende Mehrheit der Modellketten zeigt eine Zunahme der Hochwasserabflüsse, welche bis zu ca. 40% beträgt, beide mit ECHAM5 angetriebenen WETTREG-Modelle zeigen für beide Zeiträume hingegen eine Abnahme des MHQ-Wertes.

Die Darstellung des gleitenden Mittelwertes der Jahreshöchstwerte über 30 Jahre (Abbildung 7-23) zeigt, dass dieser sowohl bei den einzelnen Ensemble-Mitgliedern aber auch im Median (hier vor allem bei dem SRES A1B-Ensemble) im Laufe des gesamten simulierten Zeitraumes 1971-2100 stark schwankt.

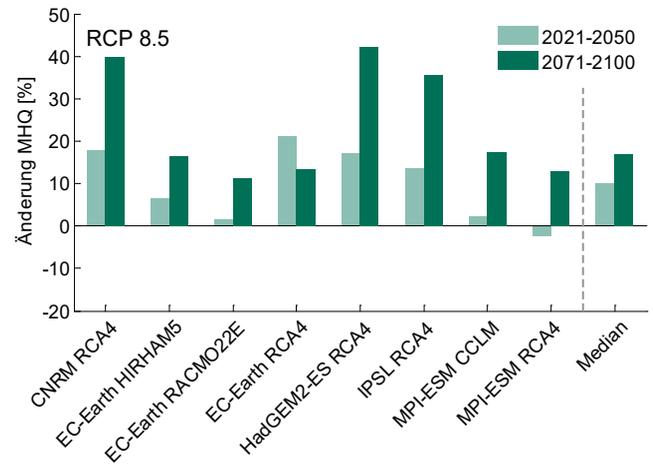
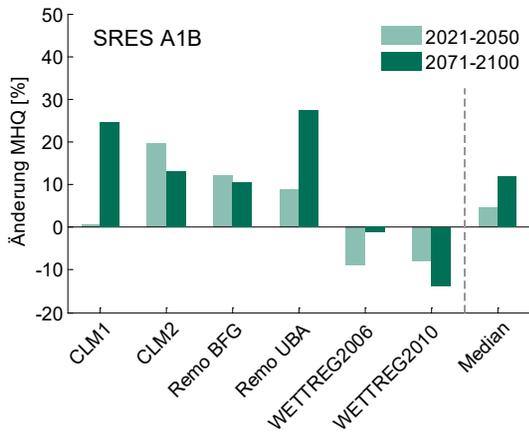


Abbildung 7-22: Änderungssignale für die gemittelten Jahreshöchstwerte des Abflusses (MHQ) für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) mit dem jeweiligen Ensemble-Median für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 für den Pegel Rethem. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5.

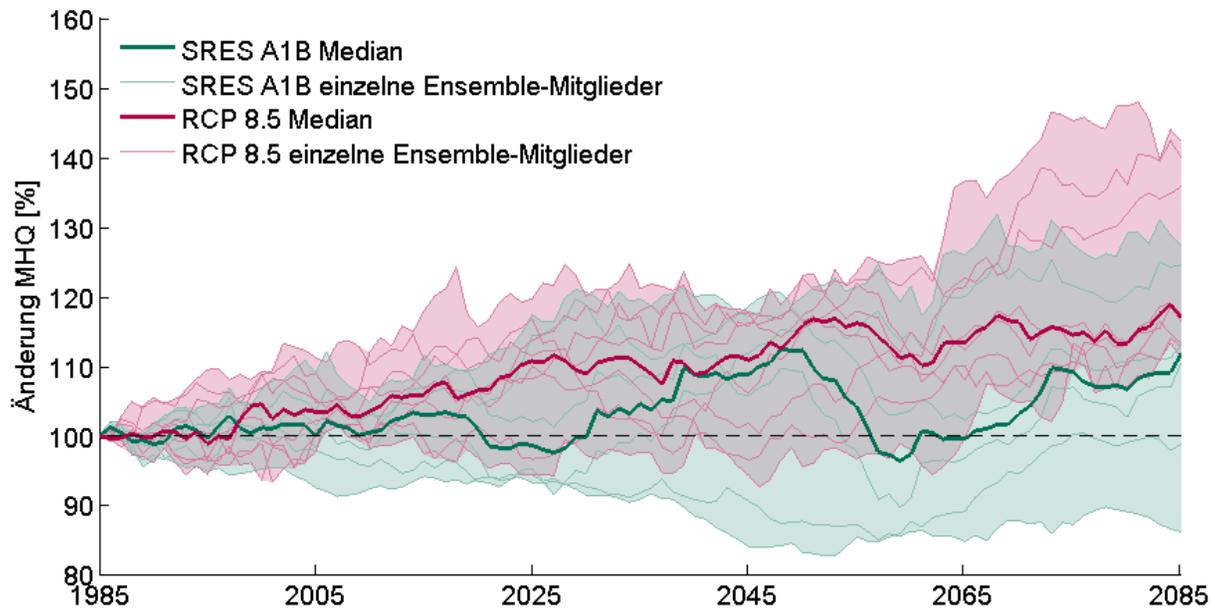


Abbildung 7-23: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwertes aus den Jahreshöchstwerten des Abflusses (MHQ) für die einzelnen Mitglieder des SRES A1B- und des RCP8.5-Ensembles sowie die Ensemble-Mediane für den Zeitraum 1971-2100 (Mittelwert 1971-2000 entspricht 100%) für den Pegel Rethem. Die transparenten Flächen geben die Spannweite des jeweiligen Ensembles an.



Für die Ermittlung der Hochwasserkennwerte HQ_5 und HQ_{100} aus der simulierten Ganglinie des Referenzzeitraumes sowie der nahen und fernen Zukunft wurden jeweils Gumbel-Verteilungsfunktionen angepasst (Parameterschätzung durch L-Momente).

Die Änderungssignale für ein Hochwasserereignis mit 5-jährigem Wiederkehrintervall (HQ_5) sind für das SRES A1B-Ensemble in Abbildung 7-24 und Abbildung 7-25 für das RCP8.5-Ensemble in Abbildung 7-26 und Abbildung 7-27 dargestellt. Im Gegensatz zu den Änderungsfaktoren der Jahresmittelwerte des Abflusses (MQ) zeigt sich hier ein differenzierteres Bild für die einzelnen Referenzpegel.

Aus den Medianen des SRES A1B-Ensembles ergeben sich für die nahe Zukunft nur geringe Änderungen (-8% bis +7%), wobei mit den einzelnen Modellketten deutliche positive wie auch negative Signale simuliert wurden. Für die ferne Zukunft wurde für den HQ_5 -Wert im Median für fast alle Pegel eine Zunahme berechnet, welche bis zu 25% beträgt (Pegel Düste).

Insgesamt deuten die Änderungssignale für die ferne Zukunft deutlich mehr in Richtung einer Zunahme als für die nahe Zukunft.

Die Mediane des RCP8.5-Ensembles zeigen für die nahe Zukunft im Mittel höhere Änderungen als das SRES A1B-Ensemble. Sie liegen zwischen -1% (für den Pegel Lage 1) und +19% (Derneburg). Für einige Pegel im Aller-Leine-Oker-Gebiet wurden mit einzelnen Modellketten aber auch deutliche negative Änderungsfaktoren simuliert. Die Auswertungen für die ferne Zukunft zeigen für die Mediane des RCP8.5-Ensembles eine deutliche Zunahme des HQ_5 -wertes. Dieser beträgt zwischen +15% (Bunnen) und +49% (Niendorf II S). Für diesen Zeitraum wurde nur noch für wenige Pegel mit einzelnen Modellketten eine Abnahme simuliert.

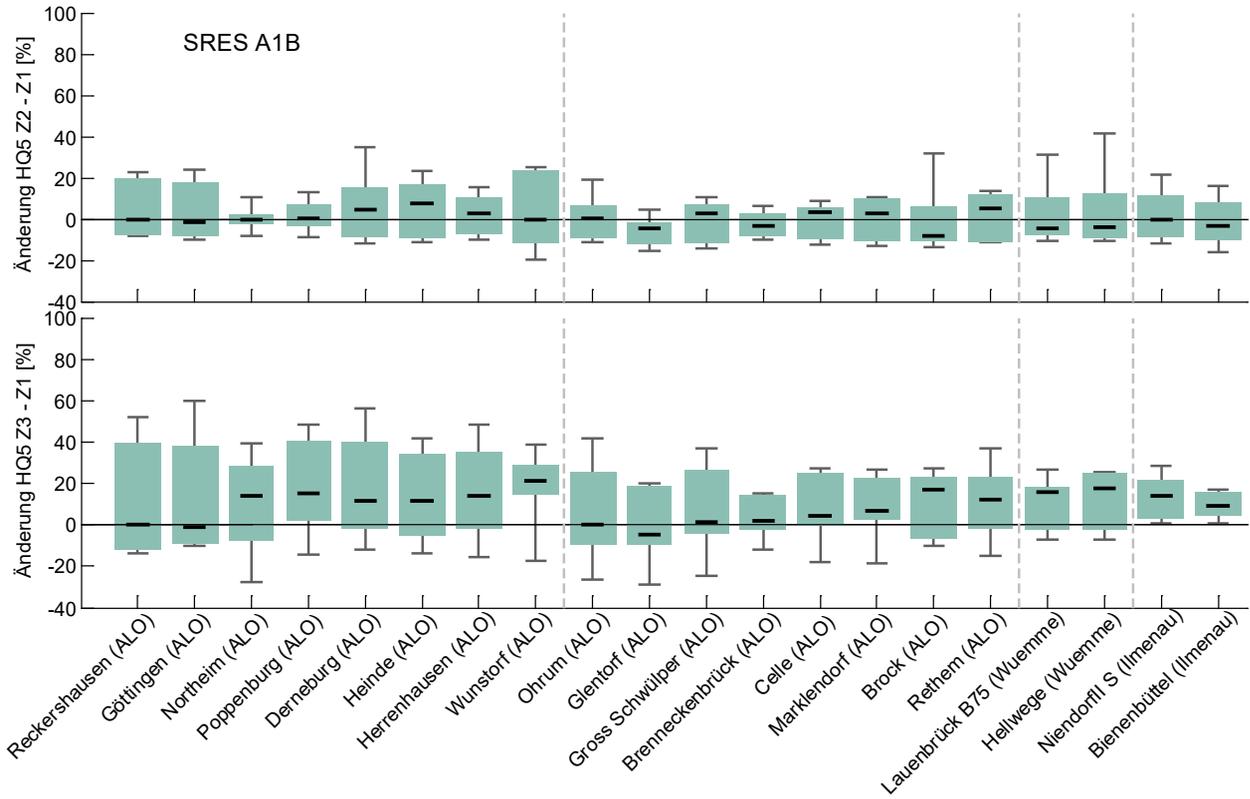


Abbildung 7-24: Änderungssignale für HQ5 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wüemme und Ilmenau für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles.

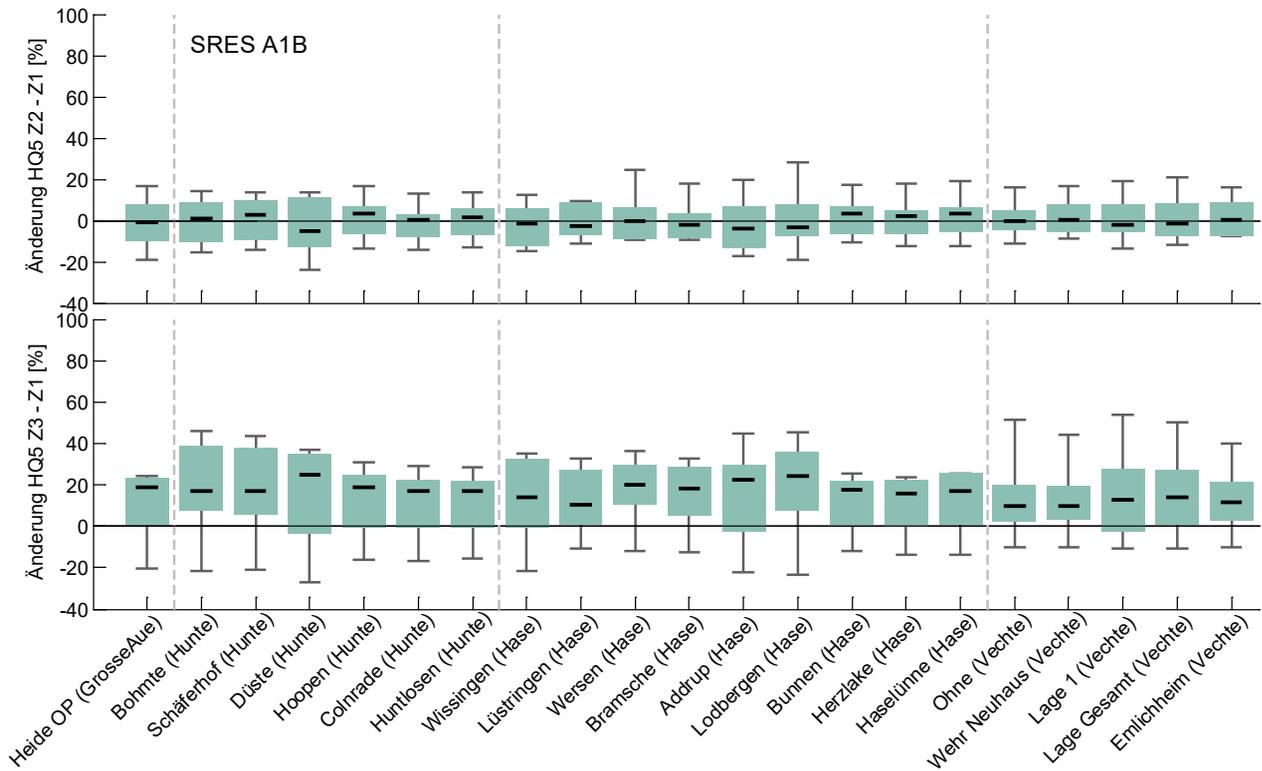


Abbildung 7-25: Änderungssignale für HQ5 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Große Aue, Hunte, Hase und Ilmenau für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles

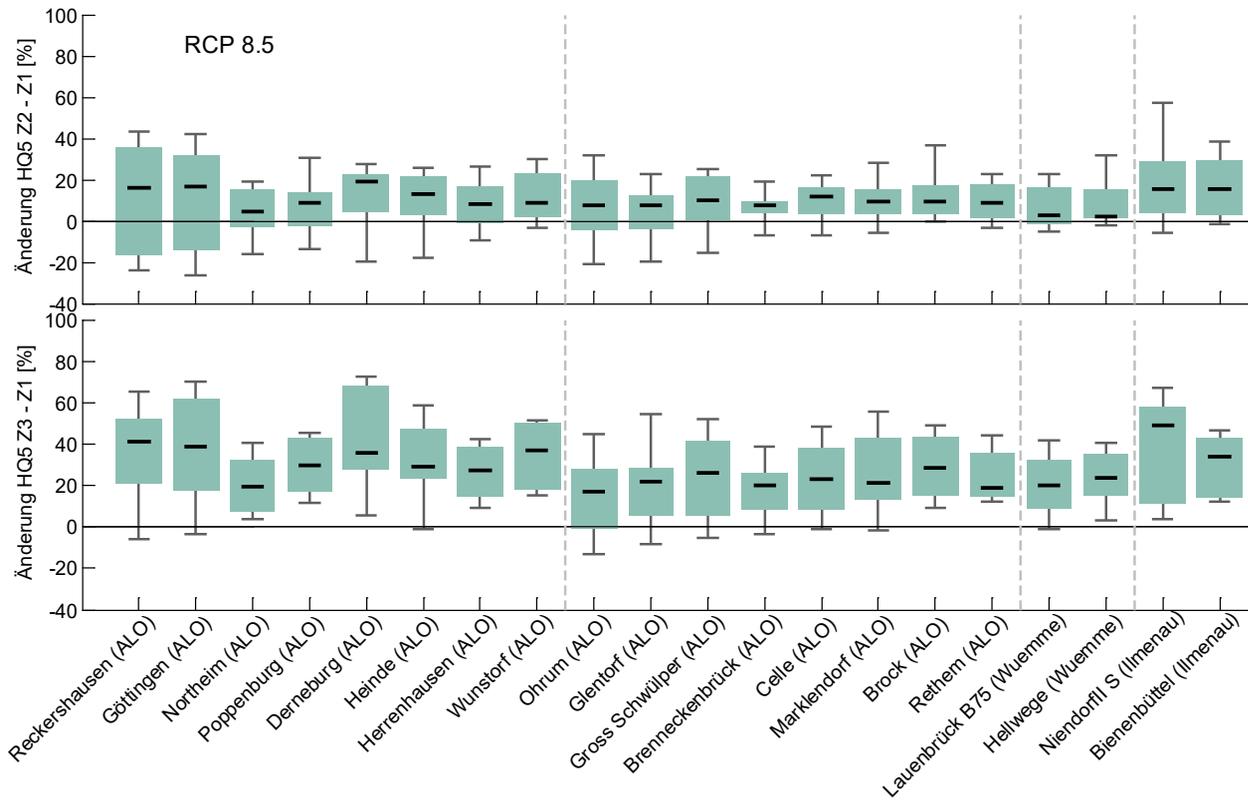


Abbildung 7-26: Änderungssignale für HQ5 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles.

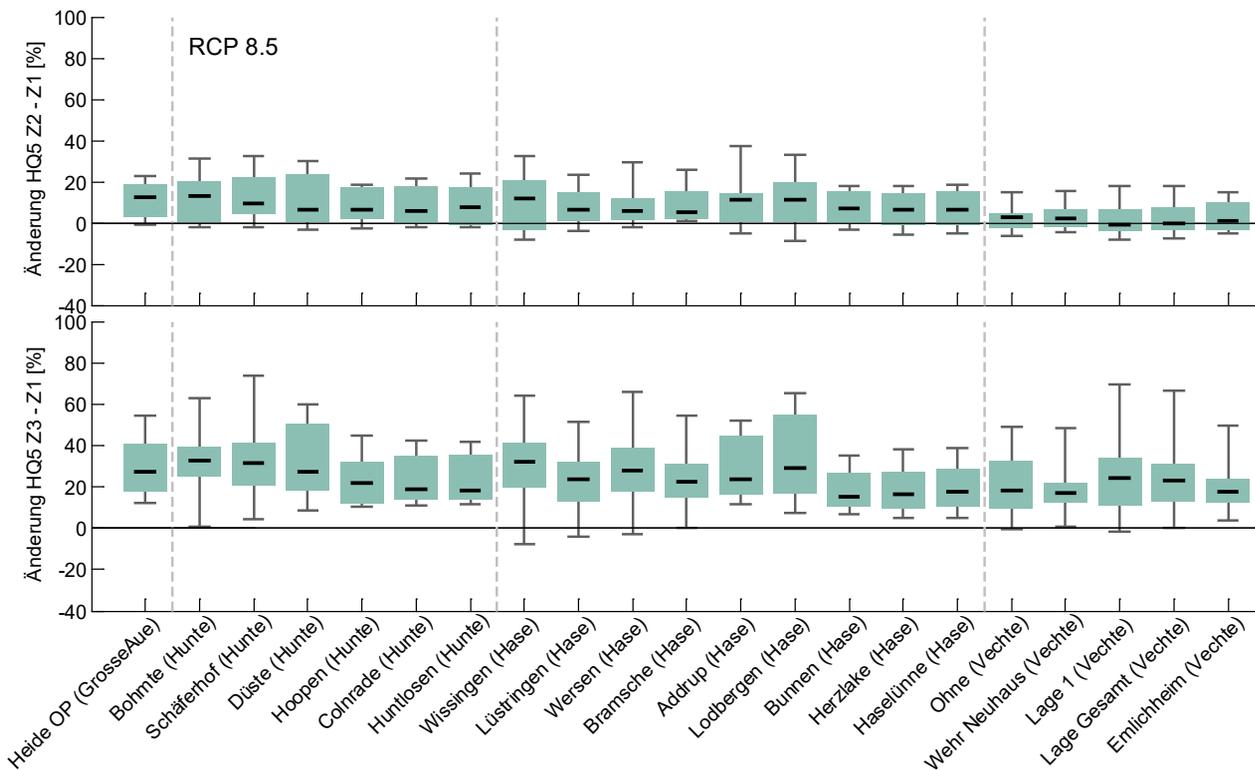


Abbildung 7-27: Änderungssignale für HQ5 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Grosse Aue, Hunte, Hase und Ilmenau für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles.



In Abbildung 7-28 sind die Mediane der Änderungsfaktoren für die Referenzpegel für HQ₅ für das SRES A1B-Ensemble und in Abbildung 7-29 für das RCP8.5-Ensemble in einer Karte dargestellt. Neben den Werten für das Gesamtjahr, wird hier zusätzlich zwischen Winter- und Sommerhalbjahr unterschieden. Da in Mitteleuropa die größten Hochwasserereignisse im Winter stattfinden, sind die Änderungsfaktoren für die HQ-Kennwerte, welche für das Gesamtjahr berech-

net werden, meist sehr ähnlich zu den Werten aus dem Winterhalbjahr. Dieses Bild zeigt sich auch in den Karten der Änderungsfaktoren für die Referenzpegel. Das SRES A1B-Ensemble zeigt für Z2 im Median im Sommerhalbjahr deutlich stärkere Änderungssignale als im Winter. In Z3 ist dieser Effekt weniger sichtbar. Mit dem RCP8.5-Ensemble wird im Median für beide Zeiträume eine stärkere Zunahme im Sommer simuliert.

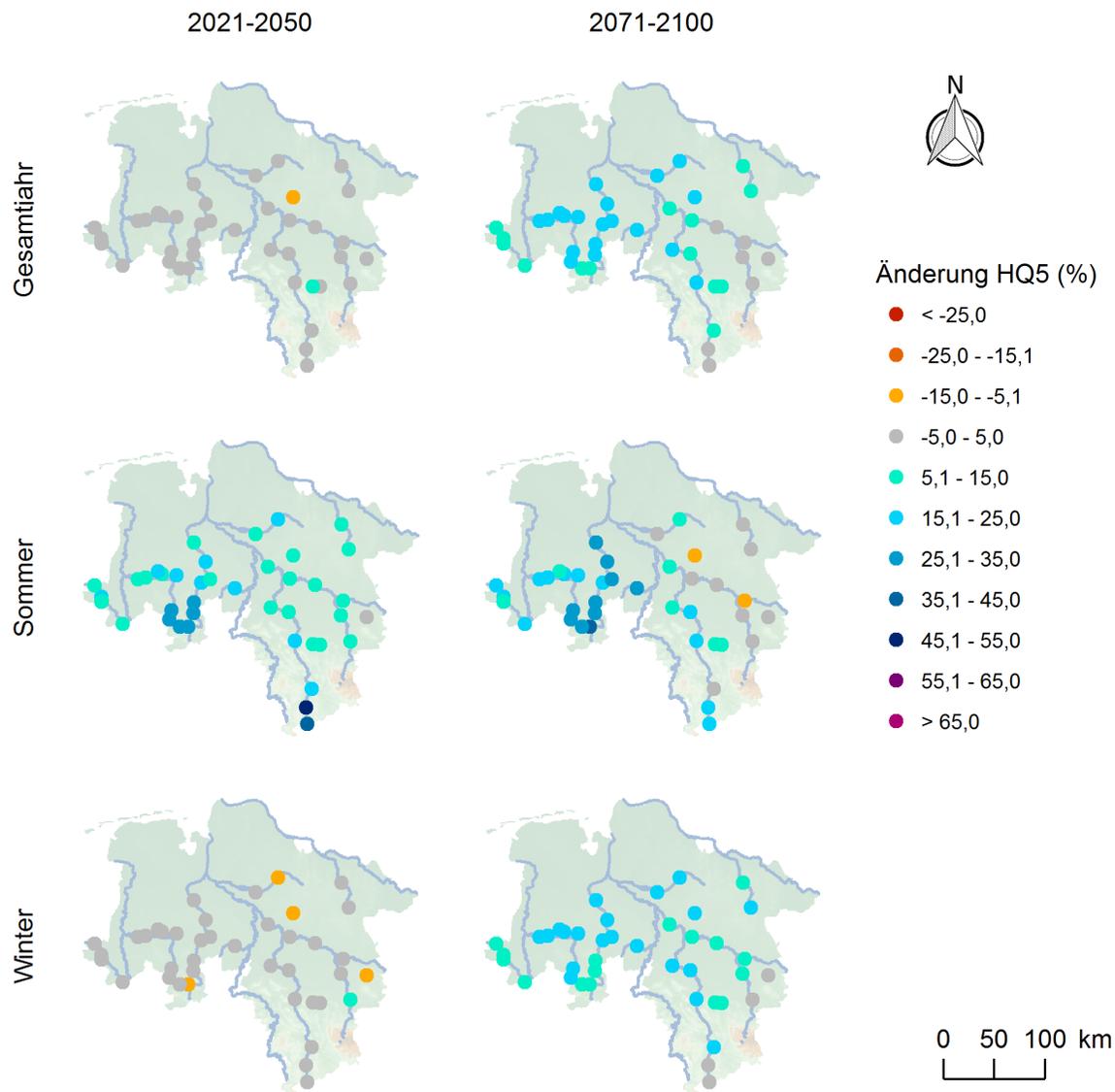


Abbildung 7-28: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für HQ₅ aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-Ensembles für das Gesamtjahr sowie das Sommerhalbjahr (01.05.-31.10.) und das Winterhalbjahr (01.11.-30.04.) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.

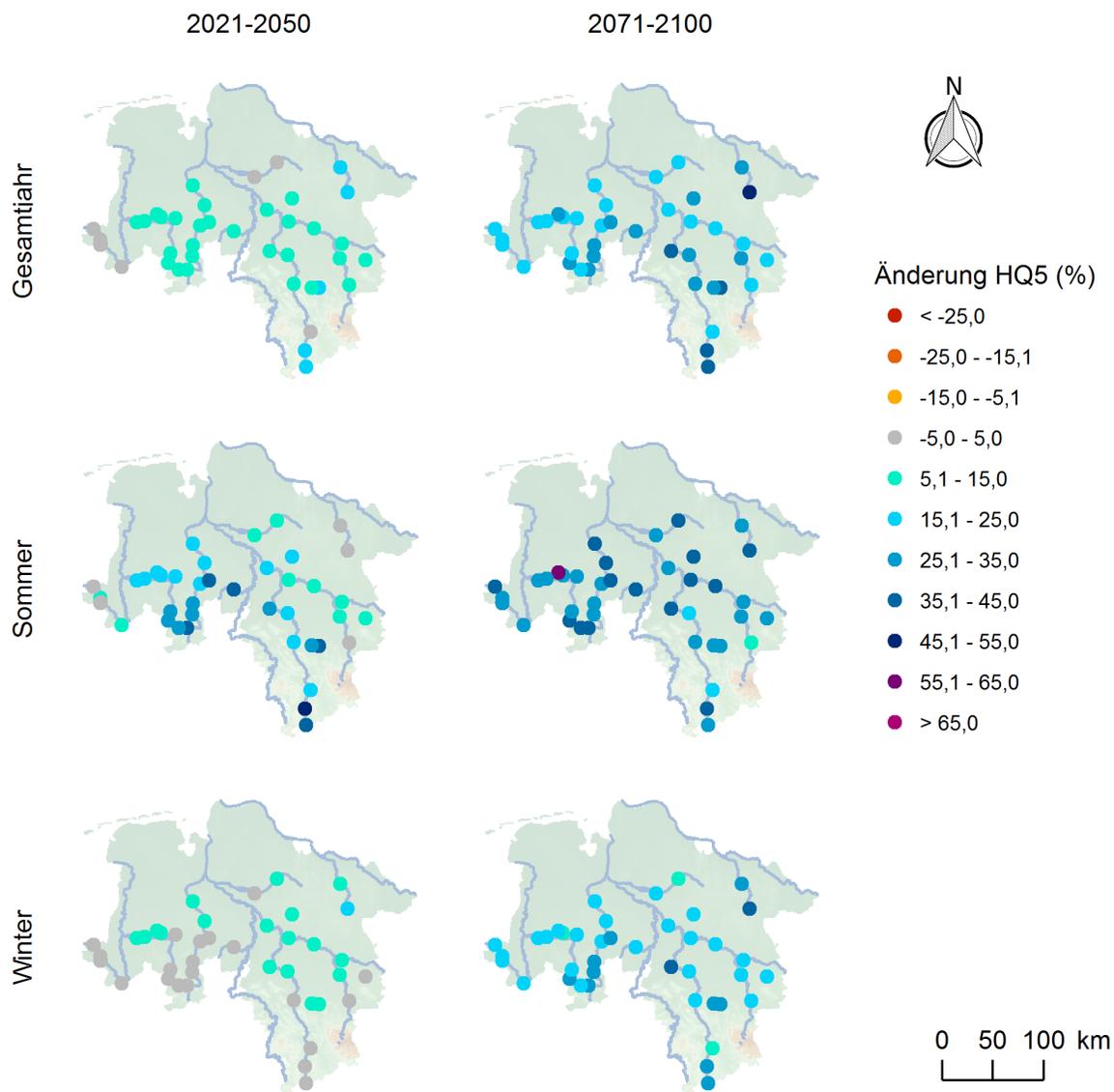


Abbildung 7-29: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für HQ₅ aus den 8 Mitgliedern des RCP8.5-Ensembles für das Gesamtjahr sowie das Sommerhalbjahr (01.05.-31.10.) und das Winterhalbjahr (01.11.-30.04.) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.

Für Z3 zeigt dieses Ensemble anhand der Mediane eine Bandbreite von +23% (Pegel Düste) bis -7% (Pegel Göttingen), wobei für 36 Pegel eine Zunahme des HQ₁₀₀ simuliert wird. Für das RCP8.5-Ensemble werden für Z2 anhand der Mediane Änderungen zwischen

0 und +17% für die Referenzpegel berechnet. Für Z3 ergeben sich mit dem RCP8.5-Ensemble im Median für alle Pegel Zunahmen im Bereich zwischen 13% (Wehr Neuhaus) und 50% (Reckershausen).

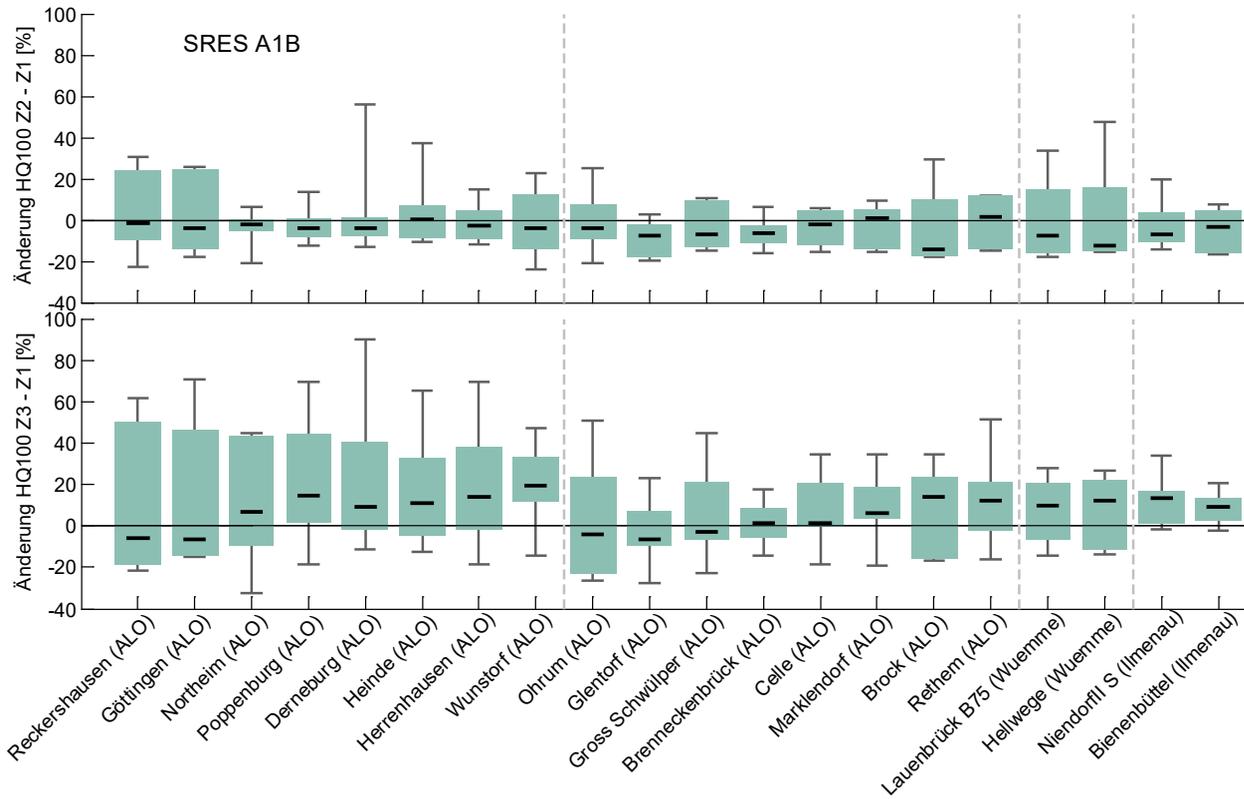


Abbildung 7-30: Änderungssignale für HQ₁₀₀ für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles.

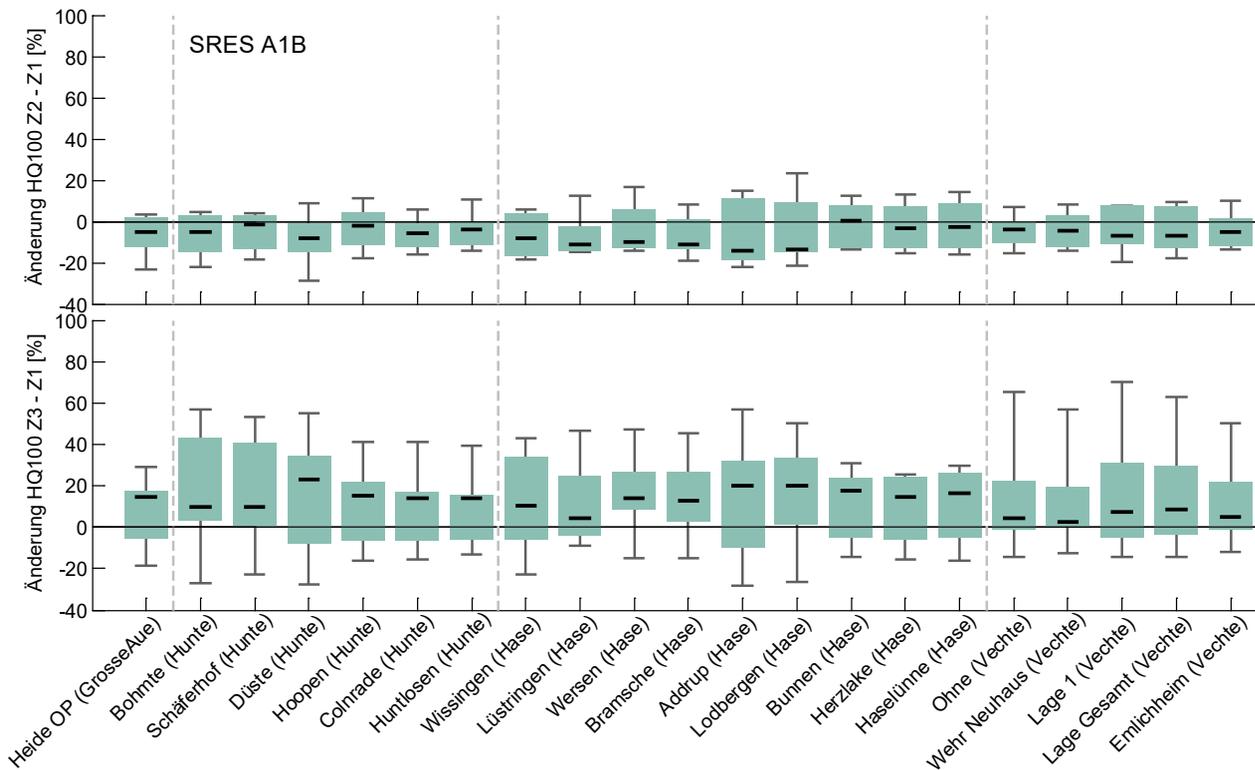


Abbildung 7-31: Änderungssignale für HQ₁₀₀ für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Große Aue, Hunte, Hase und Ilmenau für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles.

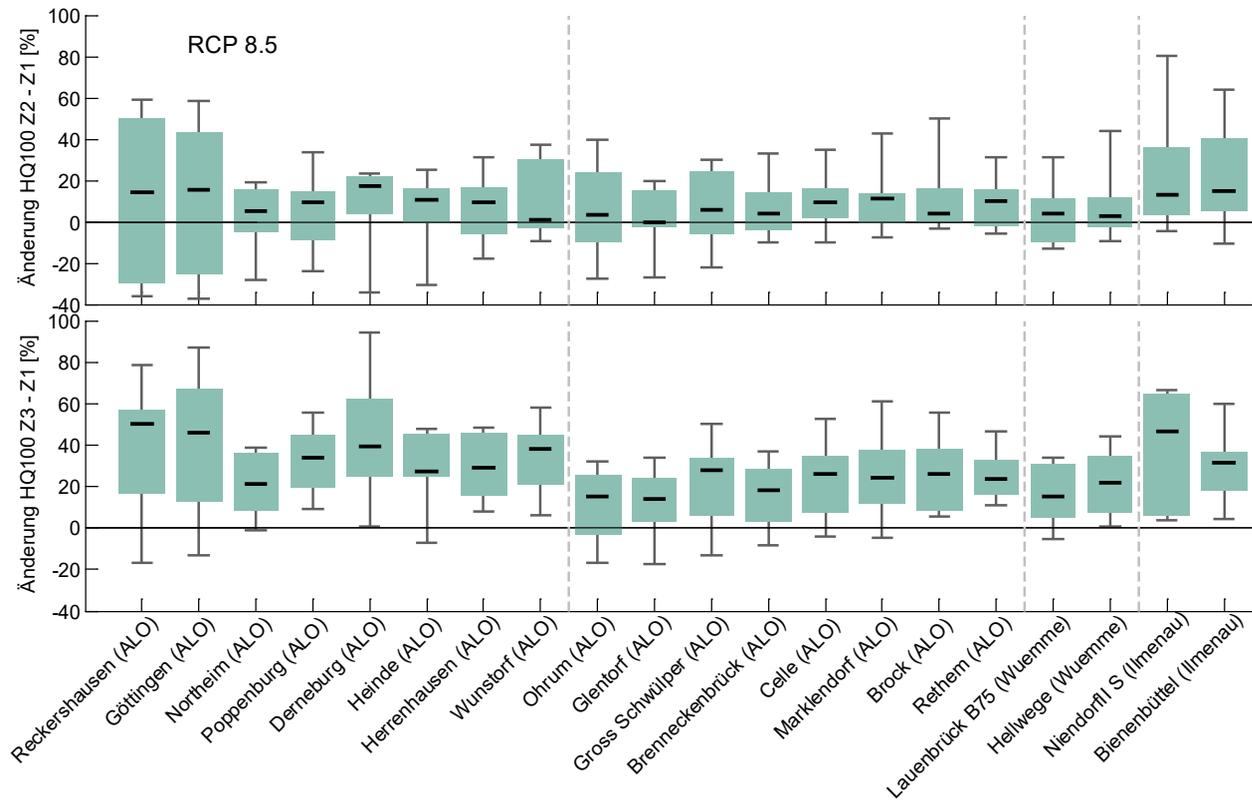


Abbildung 7-32: Änderungssignale für HQ₁₀₀ für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles.

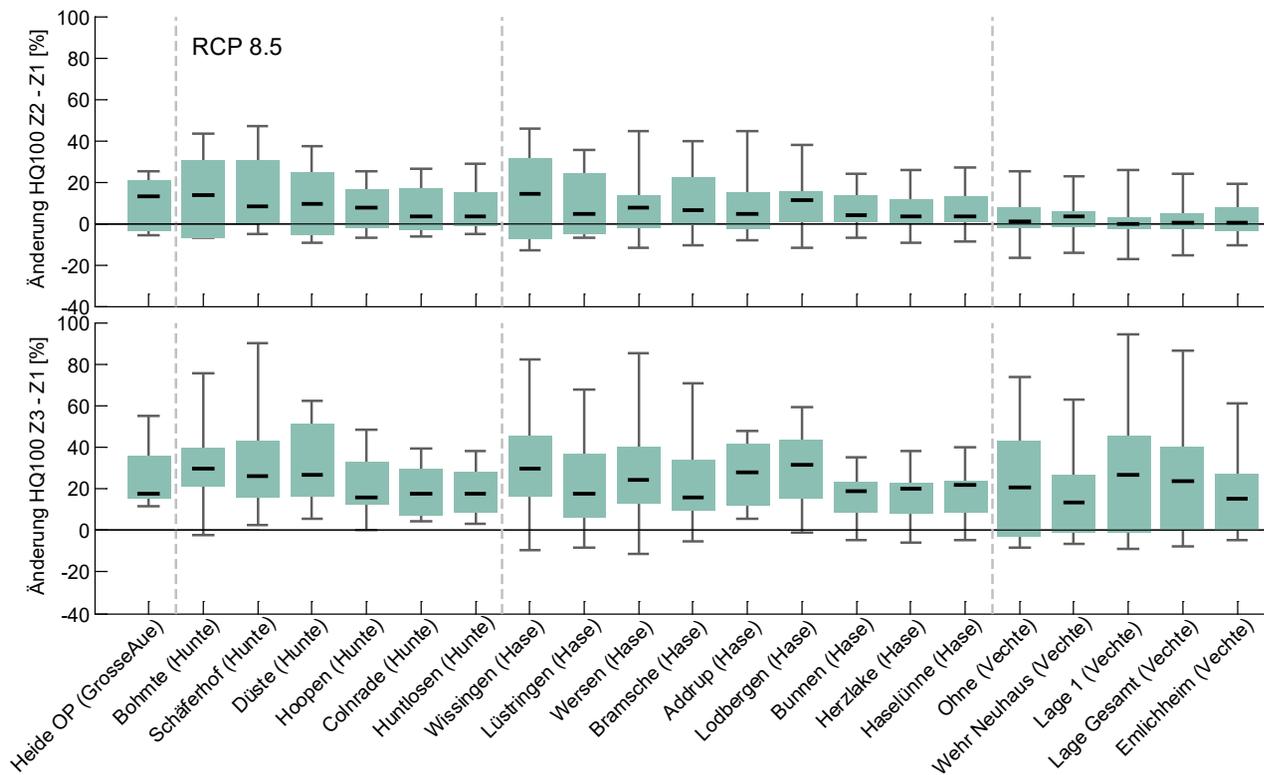


Abbildung 7-33: Änderungssignale für HQ₁₀₀ für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Grosse Aue, Hunte, Hase und Vechte für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles.



Die Mediane der HQ₁₀₀-Änderungssignale für das Gesamtjahr wie auch für das Sommer- und Winterhalbjahr sind für das SRES A1B-Ensemble in Abbildung 7-34 und für das RCP8.5-Ensemble in Abbildung 7-35 dargestellt. Während mit dem SRES A1B-Ensemble für das Winterhalbjahr im Z2-Zeitraum für die meisten Pegel eine Abnahme simuliert wird, zeigt sich im Sommerhalbjahr bei fast allen Pegeln eine Zunahme.

Im Z3-Zeitraum wird mehrheitlich für den Sommer ein stärkeres Änderungssignal berechnet als für den Winter. Eine Ausnahme bildet hier die Region im östlichen Bereich Niedersachsens mit den Einzugsgebieten von Oker, Aller und Ilmenau. Hier sind die Änderungssignale im Winter gering oder leicht positiv, im Sommer dagegen eher leicht negativ.

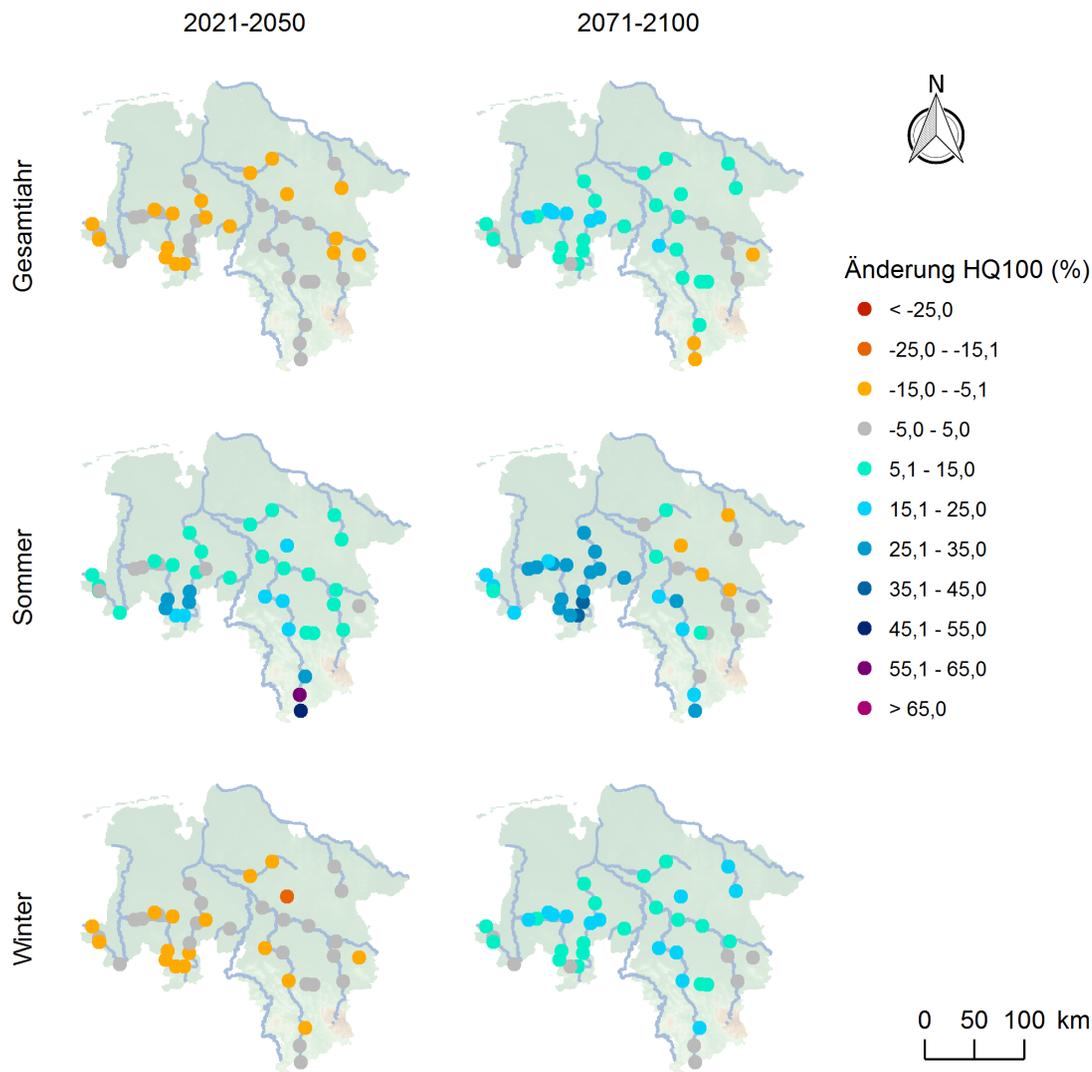


Abbildung 7-34: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für HQ₁₀₀ für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles für das Gesamtjahr sowie das Sommerhalbjahr (01.05.-31.10.) und das Winterhalbjahr (01.11.-30.04.) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.



Die Mediane der HQ₁₀₀-Änderungssignale sind für das RCP8.5-Ensemble im Sommerhalbjahr sowohl für Z2 als auch für Z3 teilweise deutlich höher als im Winterhalbjahr. Generell ist im Sommerhalbjahr in der fernen Zukunft mit den größten Änderungen zu rechnen. Dies zeigt sich bei beiden Ensembles.

Die Mediane der Änderungsfaktoren für das Gesamtjahr, wie auch für das Sommer- und Winterhalbjahr sind als Kartendarstellung für MHQ in Anhang 11 (SRES A1B) und Anhang 12 (RCP8.5) und für HQ20 in Anhang 13 (SRES A1B) und Anhang 14 (RCP8.5) zu finden.

Die Ergebnisse für die einzelnen Modellketten unterscheiden sich teilweise sehr stark. Vor allem für kleine Einzugsgebiete werden teilweise sehr hohe Änderungssignale simuliert. Dies kann dadurch begründet werden, dass sich kleinräumig hohe Änderungssignale der meteorologischen Größen (vor allem Niederschlag) im Abflussgeschehen kleinerer Einzugsgebiete sehr deutlich widerspiegeln, während diese lokalen Besonderheiten bei größeren Einzugsgebieten eine wesentlich geringere Rolle spielen.

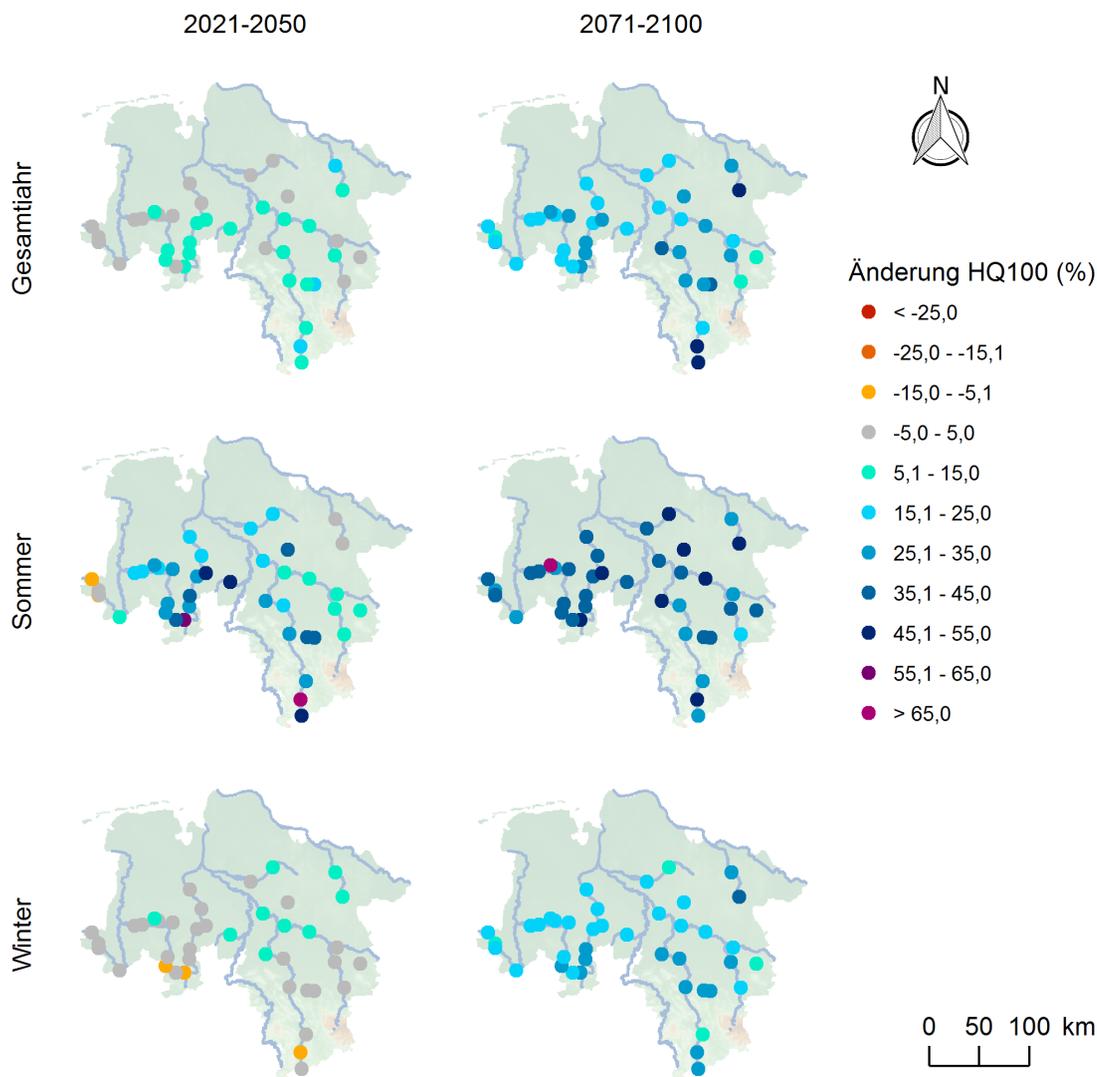


Abbildung 7-35: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für HQ₁₀₀ für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles für das Gesamtjahr sowie das Sommerhalbjahr (01.05.-31.10.) und das Winterhalbjahr (01.11.-30.04.) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.



7.2.3 Zusammenfassung

Die ermittelten Änderungsfaktoren für die einzelnen Klimaszenarien und die einzelnen Referenzpegel unterscheiden sich teilweise stark. Dennoch zeigen sich für einige Kenngrößen und Zeiträume eindeutige Tendenzen. Die Auswertung der Jahresmittelwerte des Abflusses ergibt anhand der Mediane an allen Referenzpegeln sowohl für das SRES A1B-Ensemble wie auch für das RCP8.5-Ensemble eine Zunahme für die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100), wobei letztere unter RCP8.5 noch etwas deutlicher ausfällt.

Bei der jahreszeitlichen Betrachtung der mittleren Abflüsse ergibt sich für beide Ensembles im Winter eine Zunahme. Für das Sommerhalbjahr wird mit dem SRES A1B-Ensemble für die nahe Zukunft eine leichte Zunahme, für die ferne Zukunft eine Abnahme simuliert, wohingegen mit dem RCP8.5-Ensemble für beide Zeiträume im Sommer kaum Änderungen simuliert werden.

Für die analysierten Hochwasserkenngrößen HQ_5 und HQ_{100} zeigen die Mediane der Änderungen an den Pegeln für beide Ensembles insgesamt eine deutliche Zunahme in der fernen Zukunft. Die Änderungssignale des RCP8.5-Ensembles sind größer als die des SRES A1B-Ensembles. Für die nahe Zukunft unterscheiden sich die Ergebnisse für die beiden Ensembles. Während nach dem RCP8.5-Ensemble mit einer Zunahme von HQ_5 und HQ_{100} zu rechnen ist, zeigt das SRES A1B-Ensemble für HQ_5 nur sehr geringe Änderungen und für HQ_{100} insgesamt eine leichte Abnahme.

Die jahreszeitlichen Auswertungen der Änderungssignale für die Hochwasserkennwerte ergaben in der Regel für beide Zukunftszeiträume und beide Ensembles höhere Änderungssignale für das Sommerhalbjahr als für das Winterhalbjahr. Im Sommerhalbjahr ist gemäß beider Ensembles für die nahe und ferne Zukunft mit Zunahmen zu rechnen. Für das SRES A1B-Ensemble zeigt sich in der nahen Zukunft im Sommer eine deutliche Zunahme der Hochwasserkennwerte, wobei im Winter mit nur geringen Änderungen (HQ_5) bzw. eher Abnahmen (HQ_{100}) zu rechnen ist.

7.3 Das Modell HBV-IWW

7.3.1 Modellbeschreibung

Das Modell HBV-IWW ist eine modifizierte Version des weit verbreiteten, konzeptionellen Niederschlag-Abfluss-Modells HBV (Lindström et al., 1997 und SMHI, 2008). Es kann sowohl als Blockmodell (lumped) oder als halb-verteilt Modell (semi-distributed) unter Verwendung von Teileinzugsgebieten aufgebaut werden. Mit den Eingangsdaten der Gebietsmittelzeitreihen des Niederschlags, der Temperatur, der Grasreferenzverdunstung und des Bestandskoeffizienten kann für einen Gebietsauslass der Abfluss berechnet werden.

Die drei Hauptphasen der Niederschlags-Abfluss-Transformation nach Dyck & Peschke (1995) werden wie folgt beschrieben. Die Abflussbildung der jeweiligen Teileinzugsgebiete wird mit Hilfe einer vertikalen Kopplung von vier Speichern realisiert. Dabei beschreibt jeweils ein Speicher den Schneespeicher, den Bodenspeicher, den Grundwasserspeicher in der oberen, meist ungesättigten Zone und den Grundwasserspeicher in der unteren, meist gesättigten Zone. So wohl der obere als auch der untere Grundwasserspeicher sind Einzellinearspeicher, welche die einzelnen Abflusskomponenten in Bezug zum Speicherinhalt setzen. Eine zeitliche Verteilung der Abflusskomponenten ist damit bereits enthalten und stellt somit den Übergang zur Abflusskonzentration dar. Im Anschluss werden die einzelnen Abflusskomponenten überlagert und mittels der Einheitganglinie transformiert. Auf diese Weise wird die Abflusskonzentration an den jeweiligen Gebietsauslässen der Teileinzugsgebiete realisiert.

Der Wellenablauf zwischen den Gebietsauslässen der Teileinzugsgebiete wird mittels des Muskingum-Verfahrens bestimmt. Eine Beschreibung des Muskingum-Verfahrens kann DYCK et al. (1978) entnommen werden. Bei einem Blockmodell entfällt der Wellenablauf aufgrund der fehlenden Teileinzugsgebiete.

Ein Struktogramm des Modells HBV-IWW kann Abbildung 7-36 entnommen werden. Zudem kann eine detaillierte Beschreibung der Teilmodule in Wallner (2015) gefunden werden.

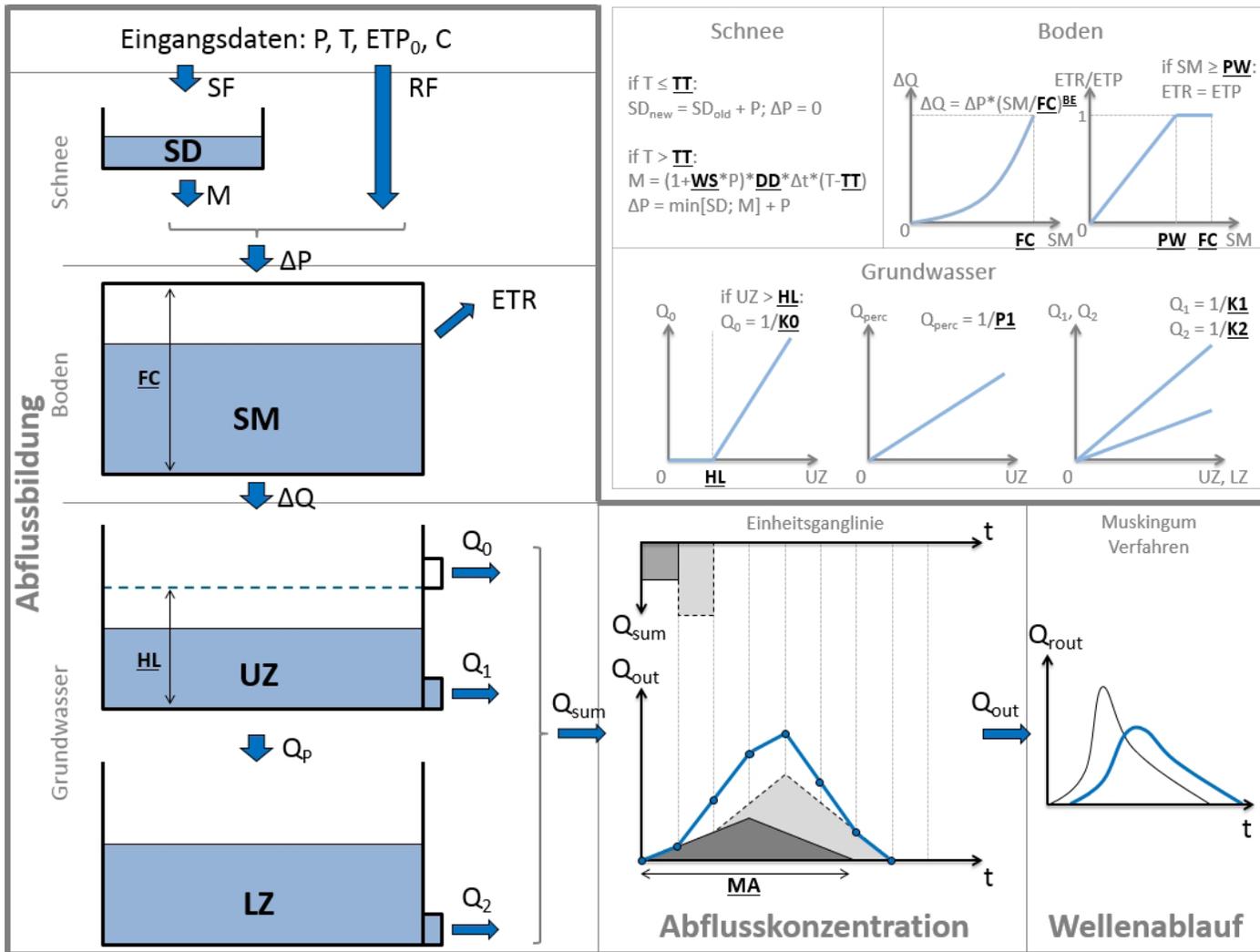


Abbildung 7-36: Struktogramm des konzeptionellen Niederschlag-Abfluss-Modells HBV-IWW modifiziert nach Wallner (2015)

7.3.2 Datenbasis

Innerhalb des Projekts wurden für 178 Einzugsgebiete unabhängige Niederschlags-Abfluss-Modelle für den Modellzeitraum von 1950 bis 2013 aufgebaut. Die Einzugsgebietsflächen liegen in einem Bereich von etwa 10 bis 1400 km². Dabei liegen etwa 98% im Bereich von 10 bis 1000 km² und 68% im Bereich von 50 bis 500 km².

Die meteorologischen Eingangsdaten liegen als Gebietsmittel der interpolierten Tageswerte vor. Als Niederschlagsseingang wurden die unkorrigierten Niederschlagsdaten verwendet. Für die Temperatur kamen die Temperaturmittel zum Einsatz. Die Grasreferenzverdunstung wurde entsprechend DVWK M-504 (2002) auf Basis der Globalstrahlung, der mittleren Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchte berechnet. Der Bestandeskoeffizient wurde auf Basis der Landnutzung von Corine Land Cover 2006 (Umweltbundesamt, 2011) ebenfalls entsprechend DVWK M-504 (2002) bestimmt.

7.3.3 Methodik

Die Modellgebiete wurden als Blockmodelle aufgebaut, d.h. ohne Ausweisung von Teileinzugsgebieten. Demzufolge wird der Prozess des Wellenablaufs nicht berücksichtigt. Dies beruht auf der Annahme, dass bei meso-skaligen Einzugsgebieten die Abflussbildungs- sowie Abflusskonzentrationsprozesse dominieren.

Um Hochwasserabflussscheitel für meso-skalige Einzugsgebiete zu simulieren, ist eine stündliche Auflösung nötig. Die Datenbasis bei einer Verwendung von Stundenwerten ist jedoch deutlich kleiner als bei Tageswerten. Zudem müssten Teileinzugsgebiete ausgewiesen werden und der Modellaufbau sowie die Parametrisierung wäre somit deutlich komplexer. Ziel von KliBiW 4 ist die Bestimmung von Änderungsfaktoren der Hochwasserquantile. Es wird vermutet, dass die Änderungssignale der Hochwasserquantile robuster gegenüber der zeitlichen Auflösung sind als die Absolutwerte der Hochwasserabflüsse selbst. Durch die Verwendung von Tageswerten konnten einerseits längere Zeitreihen für die Kalibrierung der Modelle verwendet und zudem die Rechenzeit stark verkürzt werden.



Die Anpassung der Modelle an die jeweiligen standortbedingten Verhältnisse beschreibt den Prozess der Kalibrierung. Diese erfolgte mit Hilfe des multi-kriteriellen Optimierungsalgorithmus AMALGAM (Vrugt & Robinson, 1997). Dieser variiert die Modellparametrisierung mit dem Ziel ausgewählte Zielfunktionen zu optimieren. Diese wurden mit den Projektpartnern abgestimmt. Es wurden folgende Zielfunktionen verwendet: Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) und mittlerer relativer Fehler (MRE) der Ganglinie, MRE des mittleren Jahresgangs, root mean squared error (RMSE) der Jahres-, Sommer- und Winterhochwasser. Die Gleichungen der Gütekriterien sind in Kapitel 4.2 zu finden.

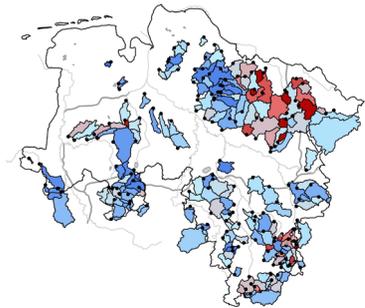
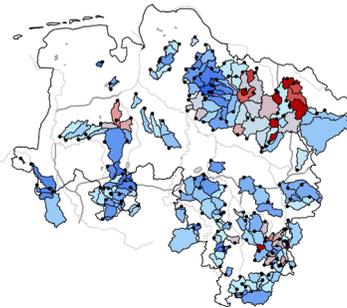
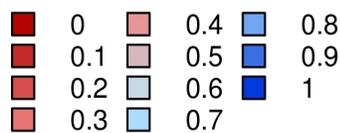
Die Ausweisung der Kalibrierungs- und Validierungsperiode erfolgt auf Basis der verfügbaren Abflusszeitreihen. Diese werden in sechs Zeitperioden unterteilt, wobei Kalibrierung und Validierung jeweils dreimal alternierend vertreten sind. Dies hat den Vorteil, dass vergangene und aktuelle Abflussbedingungen sowohl kalibriert als auch validiert werden. Dabei wurde auf eine ausreichende Länge der einzelnen Zeiträume geachtet um eine Unabhängigkeit der Validierung von der

Kalibrierung zu gewährleisten. Da die Ausweisung der Kalibrierungs- und Validierungsperioden nicht an feste Datumsgrenzen gebunden ist, sind diese einzugsgebietsspezifisch entsprechend der Verfügbarkeit der Abflussdaten an den jeweiligen Gebietsauslässen. Es wird keine einheitliche Kalibrierungs- und Validierungsperiode verwendet. Im Ergebnis dessen konnte für jedes Gebiet der bestangepasste Modellparametersatz bestimmt werden.

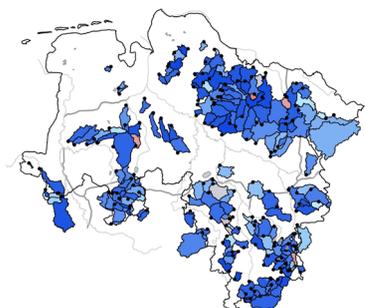
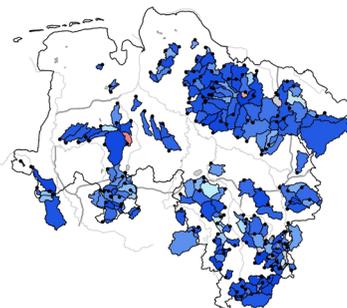
7.3.4 Ergebnisse von Kalibrierung und Validierung

Für die Anwendung in der Klimaszenariomodellierung wurden in einem Folgeschritt aus den kalibrierten Modellgebieten jene ausgewählt, welche eine vertretbare Modellgüte aufweisen. Die Schwellenwerte für die Auswahl der Gebiete wurden mit den Projektpartnern abgestimmt und wie folgt festgelegt: NSE (Ganglinie) $\geq 0,55$, MRE (mittlerer Jahresgang) $\leq 0,30$ und MRE (Jahreshochwasser) $\leq 0,35$. Die erzielten Modellgüten aller Modellgebiete können in ihrer räumlichen Verteilung in Abbildung 7-37 eingesehen werden.

NSE (Ganglinie):



MRE (mittl. Jahresgang):



MRE (Jahreshochwasser):

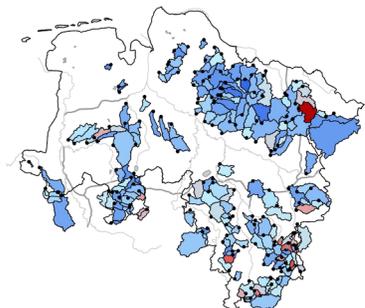
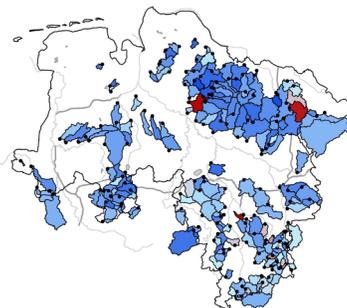


Abbildung 7-37: Räumliche Verteilung der Modellgüte für die Kalibrierung (links) und Validierung (rechts); eine stärkere Ausprägung des Farbtons signalisiert jeweils eine höhere Modellgüte



Auf Basis dieser Schwellenwerte konnten 108 der 178 Modellgebiete ausgewählt werden. Diese liegen räumlich gut verteilt in Niedersachsen vor (vgl. Abbildung 7-38). Die Einzugsgebietsgrößen der ausgewählten Modellgebiete haben Größen von etwa 20 bis 1400 km², wobei 80% der Gebiete im Bereich von etwa 30

bis 440 km² und 50% der Gebiete im Bereich von etwa 60 bis 190 km² liegen. Die mittlere Einzugsgebietsgröße beträgt etwa 180 km². Damit bleibt der ursprüngliche Wertebereich nahezu erhalten. Die Häufigkeitsverteilung der erzielten Gütekriterien der ausgewählten Modellgebiete kann Abbildung 7-39 entnommen werden.

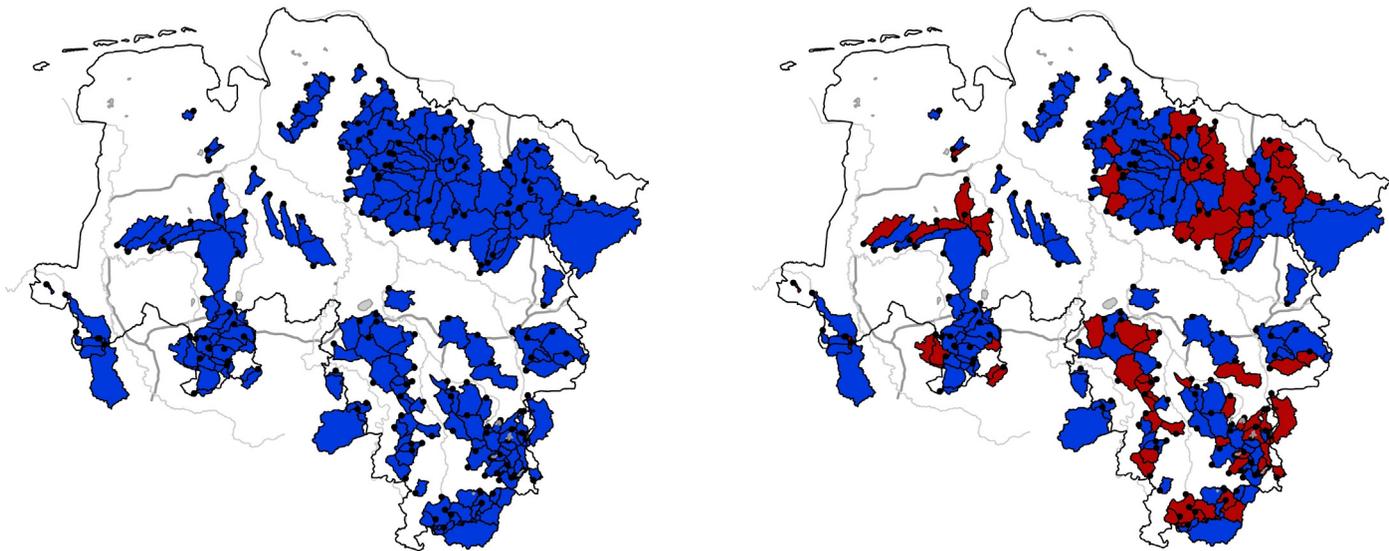


Abbildung 7-38: Räumliche Verteilung der 178 aufgebauten Modellgebiete (links) und der entsprechend der Modellgüte ausgewählten 108 Modellgebiete (rechts). Grau eingefärbte Gebiete wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

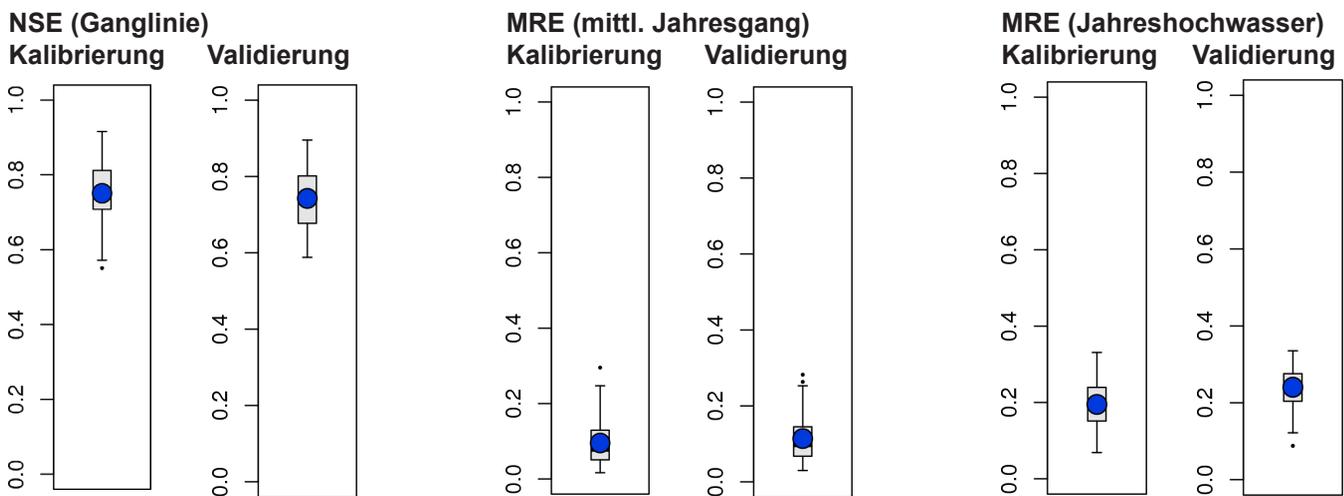


Abbildung 7-39: Häufigkeitsverteilung der erzielten Modellgüte der ausgewählten 108 Modellgebiete für die verwendeten Auswahlkriterien. Die Box wird durch die 25% und 75%-Quantile begrenzt. Als schwarzer Querbalken ist der Median und als blauer Punkt der Mittelwert gekennzeichnet.



7.3.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Modell HBV-IWW war in der Lage, die Niederschlags-Abfluss-Prozesse innerhalb Niedersachsens wiederzugeben. Die Anwendung auf Basis eines Blockmodells war für meso-skalige Modellgebiete ausreichend. Für 108 Modellgebiete konnte mindestens eine vertretbare Modellgüte erzielt werden, so dass diese für die weiteren Simulationen der Klimaszenarien geeignet erschienen. Dabei wiesen die Modellgebiete in Niedersachsen eine gleichmäßige räumliche Verteilung auf, wodurch landesweiten Aussagen bezüglich der möglichen zukünftigen Änderungssignale machbar waren.

7.4 Simulation ausgewählter Abflusskenngrößen mit PANTA RHEI und HBV-IWW

Die Bestimmung von Änderungsfaktoren für Hochwasserdurchflüsse gegebener Jährlichkeiten erfolgte mit Hilfe der Niederschlags-Abfluss-Simulation unter Verwendung von verschiedenen Klimaszenarien.

7.4.1 Datengrundlagen

Es kamen zwei Klimaszenarien mit jeweils unterschiedlichen Klimamodell-Ensembles zum Einsatz. Insgesamt standen acht Klimamodellläufe für das „Weiter-wie-bisher“-Szenario RCP8.5 und sechs Klimamodellläufe für das gemäßigte Szenario SRES A1B zur Verfügung (s. Kapitel 5.2).

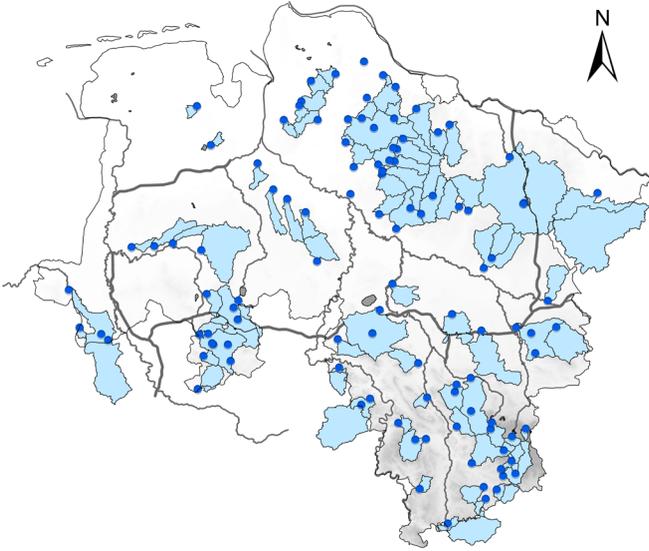
Die Daten dynamischer Klimamodelle weisen in der Regel eine systematische Abweichung gegenüber beobachteten Messdaten auf, bedingt durch die unvollständige bzw. vereinfachte Abbildung des klimatischen Prozessgeschehens in den Modellen. Um eine bestmögliche Übereinstimmung der Klimamodelldaten mit den beobachteten Daten für den rezenten Zeitraum (1971-2000) zu gewährleisten, wurden die Niederschlags- und Temperaturdaten der dynamischen Modelle entsprechend ihrer mittleren Abweichung korrigiert (Bias-adjustiert) (s. Kapitel 5.6).

Für eine möglichst robuste Aussage hinsichtlich der Änderungsfaktoren von Hochwasserabflüssen wurden die Ergebnisse der beiden Niederschlags-Abfluss-Modelle PANTA RHEI und HBV-IWW kombiniert. Für Modellgebiete, die mit beiden Modellen simuliert wurden, wurden die Ergebnisse arithmetisch gemittelt. Die gesamte Modellgebietskulisse bestand somit aus einer Verschneidung der 108 ausgewählten Modellgebiete mit HBV-IWW und den 78 ausgewählten Modellgebieten mit PANTA RHEI. Insgesamt standen somit 143 Modellgebiete zur Verfügung. Für 43 Modellgebiete lagen Ergebnisse sowohl von HBV-IWW als auch PANTA RHEI vor. Diese Gebiete wurden im weiteren Verlauf

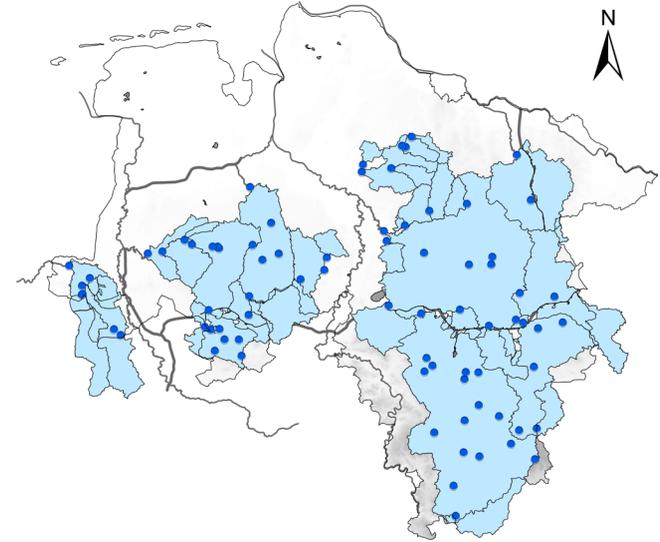
als Referenzgebiete betrachtet. Die räumliche Verteilung der Gebiete innerhalb Niedersachsens kann Abbildung 7-40 entnommen werden.



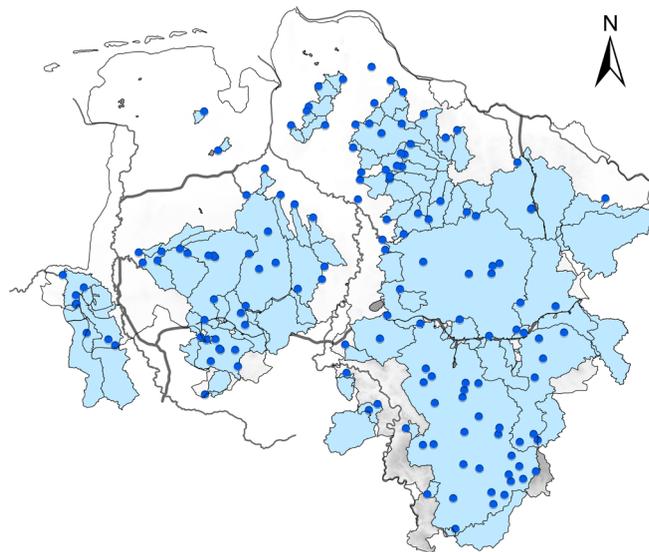
a) n=108



b) n=78



c) n=143



d) n=43

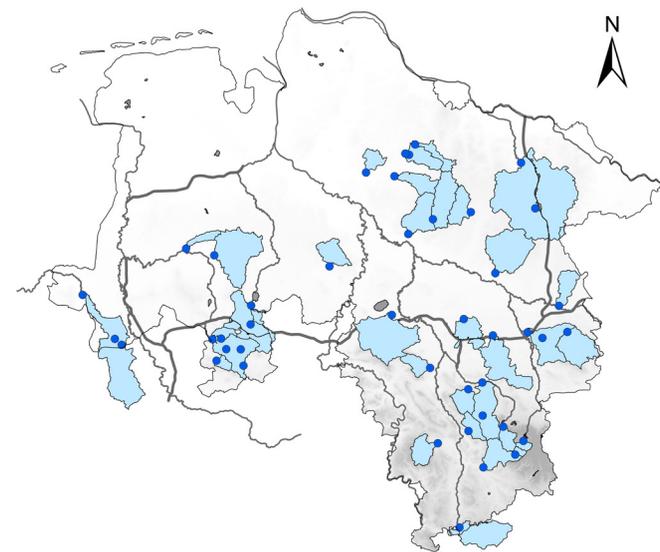


Abbildung 7-40: Entsprechend der Modellgüte ausgewählte Modelleinzugsgebiete für HBV-IWW (a) und PANTA RHEI (b) sowie die Verschneidung beider Niederschlag-Abfluss-Modelle (c) und die Referenzgebiete, für welche beide Modelle vorliegen (d); blaue Punkte symbolisieren die Pegel mit modellierten Abflussänderungssignalen



7.4.2 Methodik

Für die ausgewählten Modellgebiete wurden mit dem jeweils bestangepassten Modellparametersatz und den regionalisierten Klimamodelldaten Simulationen durchgeführt. Auf Basis der simulierten Abflüsse wurde eine abgeleitete Hochwasserstatistik bestimmt. Die ausgewählten Zeiträume dabei waren:

- 20C: Referenzzeitraum (1971-2000),
- Z2: Nahe Zukunft (2021-2050),
- Z3: Ferne Zukunft (2071-2100).

Für jeden dieser Zeiträume und jede Modellkette wurden die Jahreshochwasser extrahiert und auf Basis dessen eine Verteilungsfunktion angepasst. Hierbei wurde die Gumbelverteilung unter Verwendung von L-Momenten festgelegt, da der Stichprobenumfang von jeweils 30 Jahreshochwassern eine Verwendung von einer robusten zwei-parametrischen Verteilungsfunktion empfiehlt (DWA, 2012). Im Anschluss daran wurden mittels der jeweiligen Verteilungsfunktion die Hochwasserabflüsse für gegebene Jährlichkeiten geschätzt.

Die Änderungsfaktoren der Hochwasserabflüsse der jeweiligen Jährlichkeiten wurden in einem weiteren Schritt nach Formel 7-1 berechnet:

$$\Delta HQ(T)_{zi} = \frac{HQ(T)_{zi} - HQ(T)_{20C}}{HQ(T)_{20C}} \quad \text{Formel 7-1}$$

Hierbei stellt $\Delta HQ(T)_{zi}$ die Änderung des Hochwasserabflusses der Jährlichkeit T im Zukunftszeitraum Zi (i = 2, 3) in Prozent dar. $HQ(T)_{zi}$ bzw. $HQ(T)_{20C}$ beschreibt den Absolutwert des Hochwasserabflusses der Jährlichkeit T für den Zukunftszeitraum bzw. den Referenzzeitraum (20C).

Da jedes Modell innerhalb des Ensembles unterschiedliche Änderungen projiziert, ergibt sich für das Änderungssignal an jedem Pegel eine Bandbreite. Aus diesen Bandbreiten wurde je Pegel und Klimaszenario zusätzlich der Median aus dem zugehörigen Modell-Ensemble ermittelt. Der Median entspricht so dem mittleren Änderungssignal an dem Pegel bzw. für das Teilgebiet.

7.4.3 Ergebnisse der Szenariensimulationen

Die räumliche Verteilung der über das jeweilige Ensemble gemittelten Änderungsfaktoren für den 5-jährigen Hochwasserabfluss ist in Abbildung 7-41 dargestellt. Die Häufigkeitsverteilung ist Abbildung 7-42 zu entnehmen. Der Median über alle individuellen Mediane der Modellgebiete beträgt für die nahe Zukunft des RCP8.5 Szenarios +6%, bei einer Bandbreite von rund -1% bis +11% an 80% der Pegel. Das SRES A1B Szenario weist für den gleichen Zeitraum eine Änderung von $\pm 0\%$ auf, bei einer Bandbreite von -9% bis +7%. Die ferne Zukunft weist mit einem Median von +22% für das RCP8.5 Szenario und +9% für das SRES A1B Szenario eine deutlich stärkere Änderung auf. Die Bandbreiten betragen dabei für RCP8.5 +8 % bis +31% für 80% der Modellgebiete und für SRES A1B -5% bis +18%.

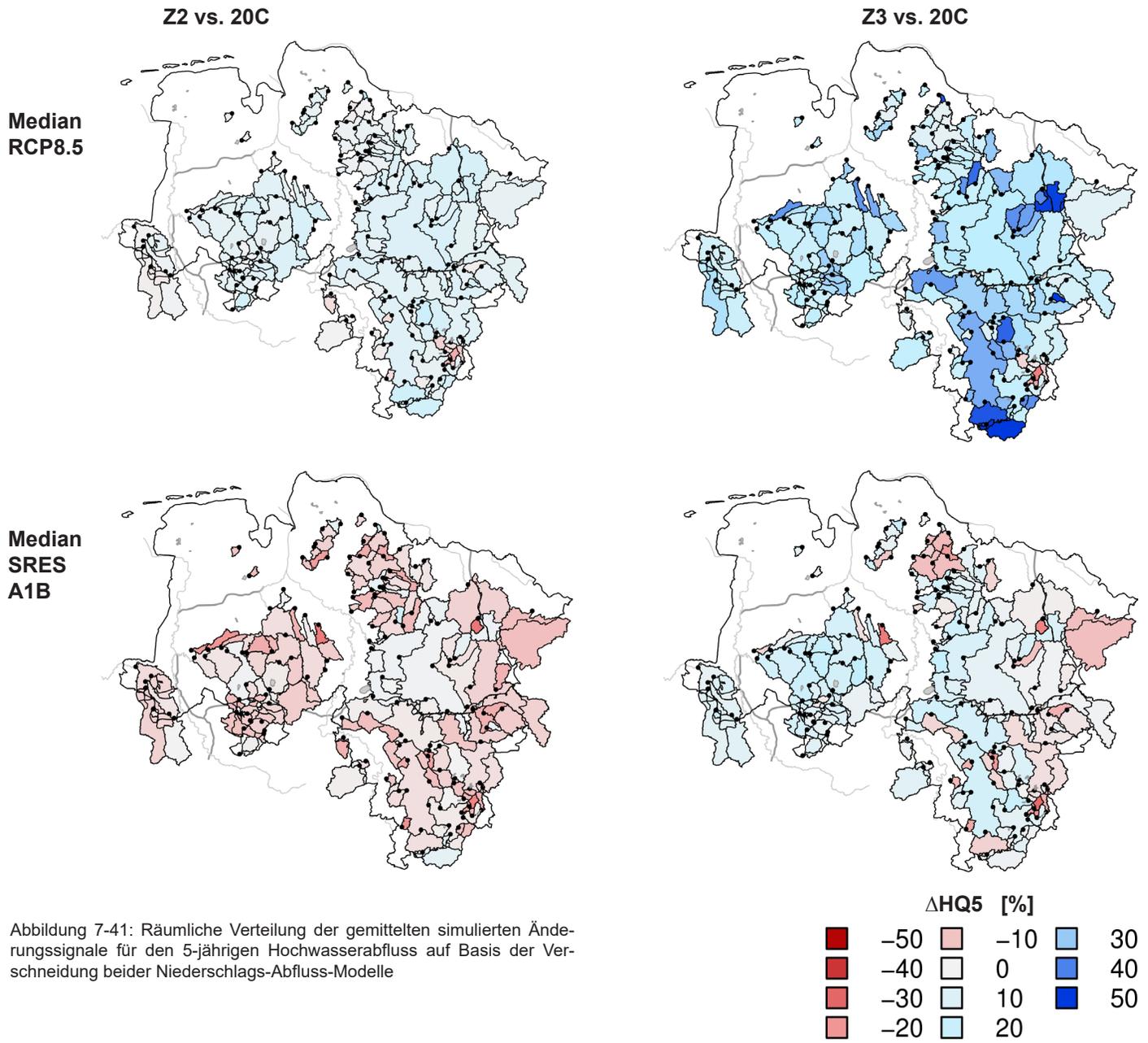


Abbildung 7-41: Räumliche Verteilung der gemittelten simulierten Änderungssignale für den 5-jährigen Hochwasserabfluss auf Basis der Verschneidung beider Niederschlags-Abfluss-Modelle

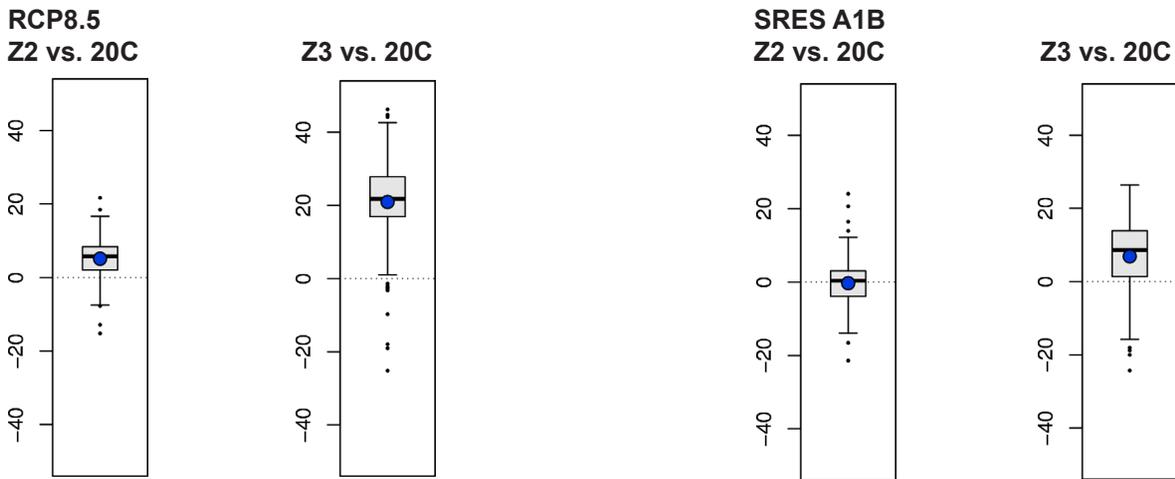


Abbildung 7-42: Boxplots basierend auf den Medianen aller ausgewählten Modellgebiete für den 5-jährigen Hochwasserabfluss. Die Box wird durch die 25% und 75%-Quantile begrenzt. Als schwarzer Querbalken ist der Median und als blauer Punkt der Mittelwert gekennzeichnet.

Die räumliche Verteilung der simulierten Änderungsfaktoren für den 20-jährigen Hochwasserabfluss ist der des 5- bzw. 100-jährigen Hochwasserabflusses ähnlich. Die Häufigkeitsverteilung ist Abbildung 7-43 zu entnehmen. Der Median über alle Modellgebiete beträgt für die nahe Zukunft beim RCP8.5 Szenario +5% und beim SRES A1B Szenario -4%. Die Bandbreiten liegen hierbei für RCP8.5 bei -4% bis +10% für 80% der

Modellgebiete und für SRES A1B bei -12% bis +3%. Die ferne Zukunft weist mit einem Median von +21% für das RCP8.5 Szenario und +7% für das SRES A1B Szenario ebenfalls eine stärkere Ausprägung insbesondere für RCP8.5 auf. Die Bandbreiten liegen für RCP8.5 bei +6% bis +35% für 80% der Modellgebiete und für SRES A1B bei -9% bis +16%.

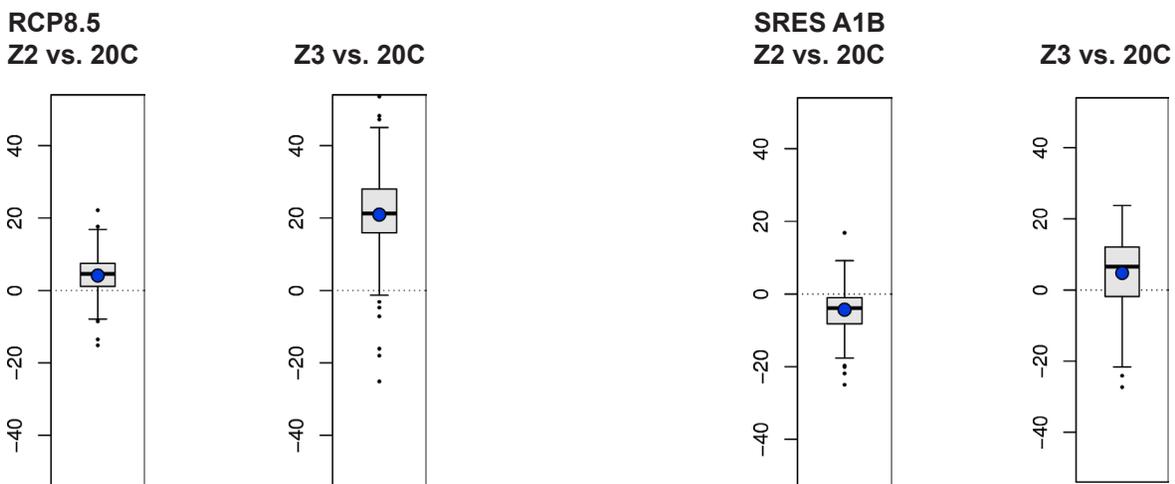


Abbildung 7-43: Boxplots basierend auf den Medianen aller ausgewählten Modellgebiete für den 20-jährigen Hochwasserabfluss. Die Box wird durch die 25% und 75%-Quantile begrenzt. Als schwarzer Querbalken ist der Median und als blauer Punkt der Mittelwert gekennzeichnet.



Die räumliche Verteilung der simulierten Änderungsfaktoren für den 100-jährigen Hochwasserabfluss ist in Abbildung 7-44 zu erkennen. Die Häufigkeitsverteilung ist Abbildung 7-45 zu entnehmen. Der Median beträgt für die nahe Zukunft des RCP8.5 Szenarios +4% und für das SRES A1B Szenario -7%. Die Bandbreiten liegen für RCP8.5 bei -4% bis +11% für 80% der Modellge-

biete und für SRES A1B bei -14% bis +1%. Die ferne Zukunft weist mit einem Median von +21% für das RCP8.5 Szenario und +6% im Mittel für das SRES A1B Szenario erneut eine stärkere Ausprägung insbesondere für RCP8.5 auf. Die Bandbreiten liegen für RCP8.5 bei +6% bis +36% für 80% der Modellgebiete und für SRES A1B bei -11% bis +15%.

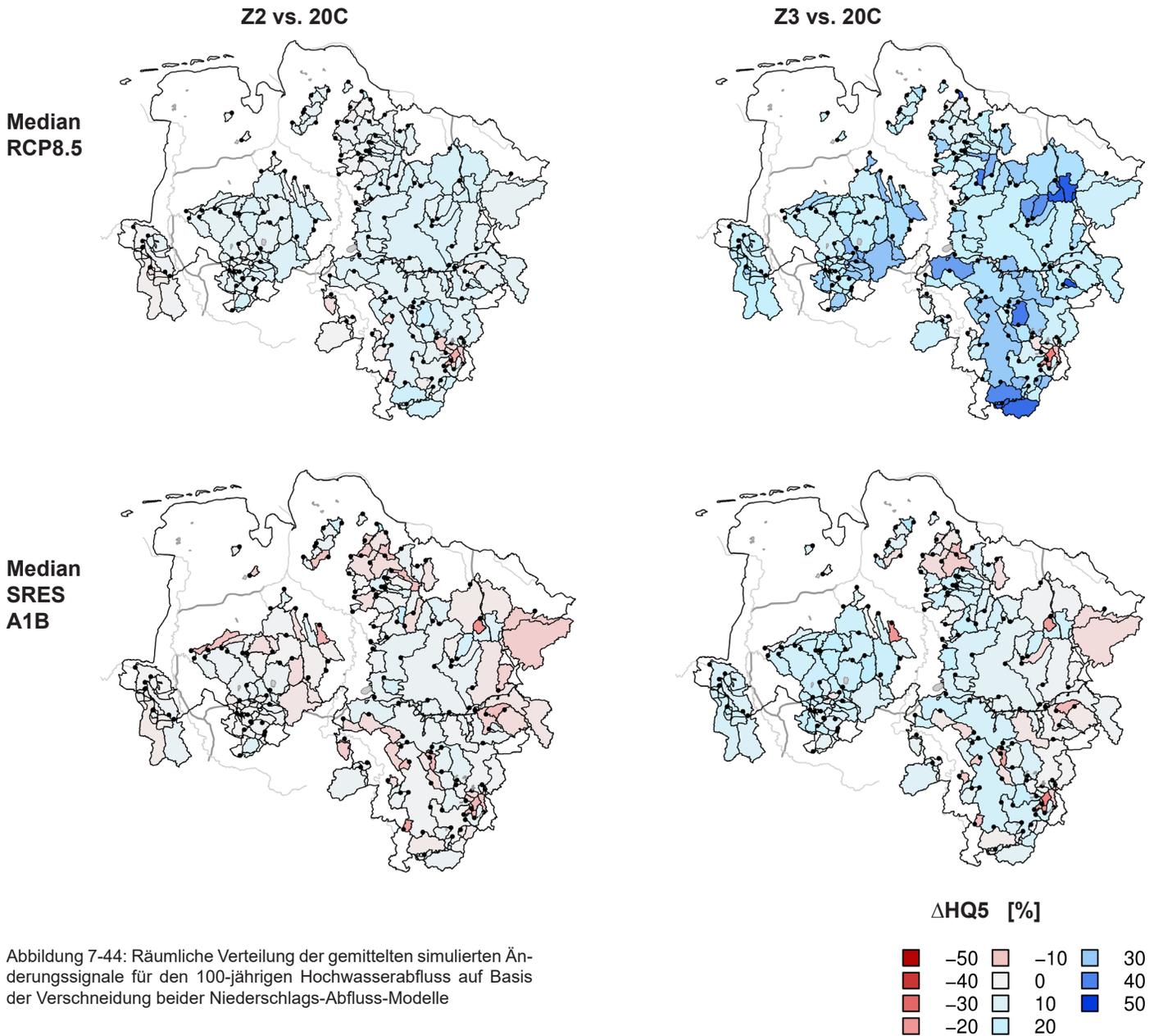


Abbildung 7-44: Räumliche Verteilung der gemittelten simulierten Änderungssignale für den 100-jährigen Hochwasserabfluss auf Basis der Verschneidung beider Niederschlags-Abfluss-Modelle

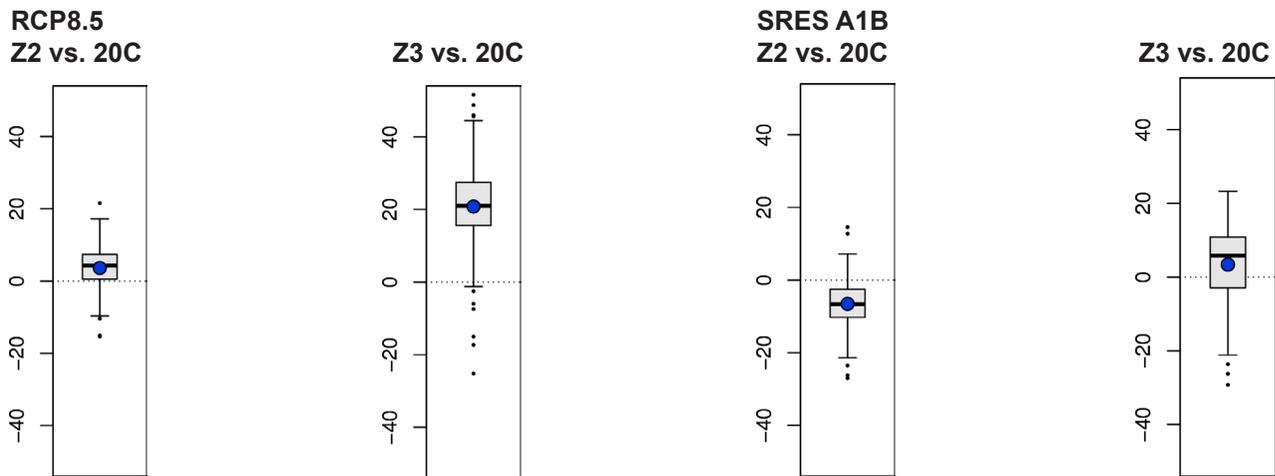


Abbildung 7-45: Boxplots basierend auf den Medianen aller ausgewählten Modellgebiete für den 100-jährigen Hochwasserabfluss. Die Box wird durch die 25% und 75%-Quantile begrenzt. Als schwarzer Querbalken ist der Median und als blauer Punkt der Mittelwert gekennzeichnet.

7.4.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das mittlere Änderungssignal des RCP8.5 Ensembles weist für alle untersuchten Jährlichkeiten und alle untersuchten Zeiträume stets auf eine stärkere Ausprägung der Veränderung in Richtung einer Zunahme der Hochwasserabflüsse hin als es für das SRES A1B Ensemble der Fall ist.

Für unterschiedliche Jährlichkeiten bei gleichem Szenario und Zeitraum zeigen sich ähnliche Größenordnungen der ermittelten Änderungsfaktoren für die Hochwasserabflüsse.

Für den Median des RCP8.5 Ensembles ist die Änderung bezüglich der fernen Zukunft an allen Pegeln stets stärker ausgeprägt als für die nahe Zukunft. Für den Median des SRES A1B Ensembles zeigt sich ein differenzierteres Bild. In der nahen Zukunft sind die Änderungsfaktoren bei kleineren Jährlichkeiten etwa um $\pm 0\%$ verteilt und zeigen kaum Veränderung. Je größer die Jährlichkeit, desto stärker ist das mittlere Verhalten in Richtung einer Abnahme der Hochwasserabflüsse verschoben. Für die ferne Zukunft zeigen sich leicht zunehmende Hochwasserabflüsse, wobei die Ausprägung mit größerer Jährlichkeit leicht abnimmt.

Die Bandbreiten der Mediane des SRES A1B Ensembles sind unempfindlicher gegenüber der untersuchten Jährlichkeit und betragen stets etwa 15% für die nahe Zukunft und 25% für die ferne Zukunft in 80% aller Modellgebiete. Die Bandbreiten der Mediane des RCP8.5 Ensembles verhalten sich insbesondere für die ferne Zukunft sensibler bezogen auf die zugrundeliegende Jährlichkeit. Sie betragen etwa 14% für die nahe Zukunft und zwischen 23% und 30% für die ferne Zukunft in 80% aller Modellgebiete. Je größer die betrachtete Jährlichkeit, desto größer wird die Bandbreite.

Für die Mediane des RCP8.5 Ensembles können unabhängig von der zugrundeliegenden Jährlichkeit für die nahe Zukunft keine bis kaum regionale Muster abgeleitet werden. Für die ferne Zukunft zeigt sich, dass im Harz tendenziell mit Abnahmen zurechnen ist, wohingegen im übrigen Niedersachsen Zunahmen vorherrschen, insbesondere im oberen Leineinzugsgebiet. Für die Mediane des SRES A1B Ensembles können unabhängig von der untersuchten Jährlichkeit für die nahe Zukunft keine regionalen Muster bestimmt werden. Für die ferne Zukunft deutet sich ein West-Ost-Gradient an mit tendenziell eher Zunahmen im Westen und eher Abnahmen im Osten Niedersachsens.

7.5 Regionalisierung der Änderungssignale von ausgewählten Hochwasser-Kennwerten

Ziel der Regionalisierung war es, die an den Pegeln mit den beiden hydrologischen Modellen simulierten Änderungsfaktoren der Hochwasserabflüsse in die Fläche zu überführen. Auf diese Weise sollte es möglich werden, räumlich differenzierte Aussagen für ganz Niedersachsen, auch für die nicht simulierten Gebiete bzw. Gewässerabschnitte, zu treffen. Als Ausgangsdaten standen die Änderungssignale der geschätzten Hochwasserquantile der simulierten Modellgebiete von HBV-IWW und PANTA RHEI zur Verfügung.

Für die Regionalisierung wurden die Methoden Multiple Lineare Regression (MLR), Ordinary Kriging (OK) und Kriging mit externer Drift (EDK) angewandt. Als Zusatzvariablen wurden analog dem Vorgehen zur Regionalisierung von Hochwasserabflüssen relevante Gebietscharakteristiken bestimmt (vgl. Kapitel 4.2 und Anhang 1).

Die Spannweite für die erzielte Güte aus der Kreuzvalidierung über alle drei Regionalisierungsmethoden, die



beiden Zukunftszeiträume und die beiden Ensembles lagen für den COD zwischen -0,21 und 0,43 mit einem Mittelwert von 0,18. Der optimale Wert des COD von 1 wird bei einer vollständigen Übereinstimmung erzielt. Ein Wert des COD von 0 bedeutet, dass der Mittelwert als Regionalisierung eine vergleichbare Güte erzielt. Die geringe Güte bei der Regionalisierung resultiert aus der hohen Zufälligkeit der Änderungsfaktoren in Niedersachsen mit geringer räumlichen Persistenz und mit nur sehr schwachem Zusammenhang mit Gebiets-eigenschaften.

Aus diesem Grund kann die Regionalisierung der Änderungsfaktoren für räumlich differenzierte Aussagen nicht empfohlen werden. Statt der flächendifferenzierten Regionalisierung von Änderungsfaktoren wird die Verwendung von landesweiten mittleren Änderungsfaktoren unter Angabe von Spannbreiten als eine praktikable Herangehensweise für die Anpassung an die möglichen Klimafolgen in der Wasserwirtschaft empfohlen (vgl. Kapitel 8).

7.6 Gegenüberstellung von beobachteten Trends und modellierten Änderungssignalen des Abflusses

Die Analysen in den Kapiteln 4 und 7 haben die beobachteten und zukünftigen möglichen Entwicklungen der hydrologischen Verhältnisse in Niedersachsen aufgezeigt. Aus Sicht der wasserwirtschaftlichen Praxis ist eine wichtige Erkenntnis, ob sich die Entwicklungen der Vergangenheit zukünftig fortsetzen, vielleicht sogar verstärken, und somit bestehende Maßnahmen zum Schutz und zur Anpassung ggf. erweitert werden müssen, oder ob es unter dem Einfluss des Klimawandels zukünftig zu Entwicklungen kommen kann, die bis heute noch nicht beobachtet werden konnten, was ggf. neue Anpassungsstrategien erfordert.

Die Analysen der gegenwärtigen Abflussverhältnisse haben gezeigt, dass der mittlere Jahresabfluss (MQ) über alle Pegel in Niedersachsen betrachtet zwischen 1966 und 2013 insgesamt leicht abgenommen hat (im Mittel um etwa -10%). Diese Entwicklung waren vor allem bedingt durch die Abnahmen des MQ während der Sommermonate (im Mittel um rund -30%). Unter beiden Szenarien (SRES A1B und RCP8.5) kommt es zukünftig beim mittleren Jahresabfluss zu Zunahmen, die in der nahen Zukunft je nach Region im Mittel zwischen +10 und +20% liegen und in der fernen Zukunft zwischen +10 und +25% betragen. Grund hierfür sind uneinheitliche Entwicklungen in den Sommermonaten bei gleichzeitig deutlicher Zunahme der Abflüsse im Winter.

Die Hochwasserabflüsse (HQ) haben sich seit 1951 bzgl. der Richtung saisonal ähnlich entwickelt wie die mittleren Abflussverhältnisse. Allerdings waren die Ab-

nahmen im Sommer etwas schwächer ausgeprägt (im Mittel über alle Pegel rund -23%), dafür gab es deutliche Zunahmen im Winter (im Mittel über alle Pegel rund +20%), vor allem im südlichen Niedersachsen. Die Szenarien für die Zukunft weisen auf eine Umkehr der Entwicklungstendenzen im Sommer hin (d.h. Zunahme), die sich sowohl in der nahen wie fernen Zukunft bemerkbar macht. Im Winter setzen sich die Zunahmen unter dem Szenario RCP8.5 durchgängig bis zum Ende des 21. Jahrhunderts weiter fort. Das Szenario SRES A1B deutet in dieser Jahreszeit auf weitere Zunahmen erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts hin. Zusammengefasst zeigt sich im Wesentlichen eine Veränderung der seit Mitte des 20. Jahrhunderts beobachteten Abflussverhältnisse bei Mittel- und Hochwasser bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Waren die Trends in der Vergangenheit stärker saisonal geprägt (Abnahmen im Sommer, Zunahmen im Herbst/Winter), so käme es zukünftig in allen Jahreszeiten zu mehr oder weniger ausgeprägten Zunahmen der Abflüsse. Aufgrund dieser Inkonsistenz in den Entwicklungen kann nicht beurteilt werden, ob sich der Klimawandel bereits heute im beobachteten Abflussgeschehen bemerkbar macht. Die fehlende Betrachtung der Veränderung weiterer Einflussfaktoren auf den Wasserhaushalt, wie etwa der Vegetation oder der Böden, erschweren eine abschließende Einschätzung in dieser Hinsicht zusätzlich.



8 Der Klimawandel und seine Folgen für die Wasserwirtschaft im niedersächsischen Binnenland

8.1 Zusammenfassende Bewertung

Zur abschließenden Bewertung der Wirkung des globalen Klimawandels auf die Entwicklung der Hochwasserabflüsse in Niedersachsen wurden im KliBiW-Projekt die zukünftigen Hochwasserkennwerte für 143 niedersächsische Pegel analysiert und bewertet. Diese Pegel erfüllen die in Kapitel 7.3.3 beschriebenen Qualitätskriterien.

Die Abbildung 8-1 zeigt die Änderungssignale für die HQ_{5-} , HQ_{20-} und HQ_{100-} Werte für die nahe Zukunft, d. h. den Zeitraum Z2 (2021 - 2050), und für die ferne Zukunft, den Zeitraum Z3 (2071 - 2100) in Form von Boxplots. Dargestellt sind in der Abbildung die prozentualen Änderungen der mit Klimamodell Daten und mit den im Projekt angewandten hydrologischen Modellen simulierten Hochwasserwerte für diese Zeiträume gegenüber denen des Zeitraumes 20C (1971 - 2000). In dieser Abbildung sind die Modellergebnisse für die beiden untersuchten Szenarien zur Treibhausgasentwicklung, RCP8.5 und SRES-A1B, getrennt dargestellt.

In Abbildung 8-1 sind als farbige Boxplots die mittleren 50% der Medianwerte der betrachteten Pegel und der Median aller Pegel (horizontale Linie) gekennzeichnet. Diese Werte werden für die folgenden Bewertungen als Änderungssignal verwendet. Die vertikale Linie gibt die Bandbreite über alle Pegel an; die Punkte zeigen die statistischen Ausreißerwerte.

Um den Einfluss der Einzugsgebietsgröße der Pegel auf die Ergebnisse aufzuzeigen und zu berücksichtigen, werden in der Abbildung unter a) zunächst alle 143 Pegel gemeinsam bewertet. Unter b) sind die Pegel mittlerer Einzugsgebiete (EZG) zusammengefasst und unter c) die Ergebnisse für Pegel großer EZG > 1.000 km².

Bei der gemeinsamen Auswertung aller 143 Pegel (Grafiken in a) zeigen die Änderungssignale bei Anwendung des RCP8.5-Ensembles für die HQ_{5-} , HQ_{20-} und HQ_{100-} Ereignisse in der nahen Zukunft (Z2) eine Zunahme des Hochwasserabflusses zwischen +1 und +8%. Der Median liegt für das HQ_{100} bei +4%, für das HQ_{20} bei +5% und für das HQ_5 bei +6%. Deutlich höher liegen die Änderungssignale für die ferne Zukunft (Z3). In diesen Zeitraum werden die Hochwasserabflüsse nach den Modellergebnissen insgesamt zwischen +16 und +28% zunehmen. Der Median liegt hier für das HQ_{100} und für das HQ_{20} bei +21% und für das HQ_5 bei +22%.

Bei Verwendung des SRES-A1B-Ensembles (rechtes Bild in a) sind die Änderungssignale für die ferne Zu-

kunft (Z3) wesentlich geringer ausgeprägt; für die nahe Zukunft (Z2) ergibt sich sogar eine entgegengesetzte Richtung der Entwicklung. Für die nahe Zukunft liegt der Median für das HQ_{100} bei -7%, für das HQ_{20} bei -4% und für das HQ_5 bei 0%, d.h. die Hochwasserabflüsse würden eher abnehmen. Für die ferne Zukunft liegt der Median für das HQ_{100} bei +6%, für das HQ_{20} bei +7% und für das HQ_5 bei +9% d.h. auch nach diesem Szenario würden die Hochwasserabflüsse zunehmen.

Aufgrund der Unsicherheiten der Klimamodell Daten, insbesondere für kleine Einzugsgebiete ($A < 100$ km²), sind für die kleinen Einzugsgebiete des Harzes, die zudem orographisch stark gegliedert sind, die Modellergebnisse mit äußerster Vorsicht einzuschätzen. Zum einen können maßgebliche extreme Hochwasser in solch kleinen Gebieten durch sehr kurze, intensive Niederschlagsereignisse hervorgerufen werden. 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., 2016). Die große Bandbreite der Medianwerte bei der Betrachtung aller 143 Pegel sowie die hohe Zahl der statistischen Ausreißer in der Grafik a) werden als Beleg für diese Unsicherheiten bewertet. In den Grafiken b) und c), die die Ergebnisse für mittlere und große Pegel einzugsgebiete darstellen, sind die Spannweiten und die Anzahl der Ausreißer deutlich reduziert.

Bei Auswertung der 70 Pegel mit mittleren Einzugsgebietsgrößen (100 - 1.000 km²) zeigen die Änderungssignale bei Anwendung des RCP8.5-Ensembles für die HQ_{5-} , HQ_{20-} und HQ_{100-} Ereignisse in der nahen Zukunft (Z2) Zunahmen der Hochwasserabflüsse zwischen +1 und +9%, vgl. Grafiken in b). Der Median liegt für das HQ_{100} und für das HQ_{20} bei +5% und für das HQ_5 bei +6%. Auch hier liegen die Änderungssignale für die ferne Zukunft (Z3) deutlich höher. In diesen Zeitraum werden die Hochwasserabflüsse danach insgesamt zwischen +16 und +29% zunehmen. Der Median liegt hier bei allen drei Hochwasserkennwerten bei +23%.

Bei Verwendung des SRES-A1B-Ensembles (rechtes Bild in b) sind die Änderungssignale für die ferne Zukunft (Z3) auch hier wesentlich geringer ausgeprägt; für die nahe Zukunft (Z2) ergibt sich teilweise ebenfalls eine entgegengesetzte Richtung der Entwicklung. Für die nahe Zukunft liegt der Median für das HQ_{100} bei -6%, für das HQ_{20} bei -4% und für das HQ_5 bei 0%, d.h. die Hochwasserabflüsse würden eher abnehmen. Für die ferne Zukunft liegt der Median für das HQ_{100} bei +6%, für das HQ_{20} bei 7% und für das HQ_5 bei +9%, d.h. auch nach diesem Szenario würden die Hochwasserabflüsse zunehmen.



Wenn die Auswertungen ausschließlich auf die großen Einzugsgebiete ($> 1.000 \text{ km}^2$) beschränkt werden, sind die Bandbreiten bei den Ergebnissen deutlich verringert, vgl. Graphiken c) in Abb. 8.1. Für das RCP8.5-Ensemble liegen in der nahen Zukunft die Mediane für das HQ_{100} und für das HQ_{20} bei +5% und für das HQ_5 bei +8%. In der fernen Zukunft liegen sie bei 22% (HQ_{100}) bzw. bei 20% (HQ_{20} und HQ_5). Für das A1B-Ensemble ergeben sich für die nahe Zukunft Mediane von -4% für das HQ_{100} , -2% für das HQ_{20} und +1% für das HQ_5 . In der fernen Zukunft werden die Abflüsse für das SRES-A1B-Ensemble um +12% für das HQ_{100} und für das HQ_{20} und um +14% für das HQ_5 zunehmen.

In Tabelle 8-1 sind die Mediane aller Änderungssignale für die verwendeten Klimaszenarios und die bewerteten Hochwasserbemessungswerte zusammengestellt. Insgesamt muss davon ausgegangen werden, dass die Hochwasserscheitelabflüsse in Niedersachsen, insbesondere in der fernen Zukunft, zunehmen werden.

Räumliche Muster oder Schwerpunkte sind kaum zu erkennen. Saisonal differenziert zeigen die Änderungen im Sommerhalbjahr insgesamt deutlichere Zunahmen als im Winterhalbjahr, vgl. Kap 7.2.

Insbesondere bei der Verwendung des RCP8.5-Ensembles zeigt der Median der berechneten Scheitelwerte für alle drei Hochwasserbemessungswerte einen Anstieg in der fernen Zukunft von über +20%. Bei Verwendung des SRES-A1B-Ensembles beträgt dieser Anstieg zwischen +5 und +15%. In der nahen Zukunft zeigen die Scheitelabflüsse unter dem RCP8.5-Szenario leicht zunehmende Tendenzen, während sie unter dem SRES-A1B-Ensemble nicht eindeutig ausfallen.

Aussagen für die zukünftige Entwicklung der Hochwässer in Einzugsgebieten kleiner als 100 km^2 erscheinen auf Basis der benutzten Daten bzw. Methoden nicht verlässlich.

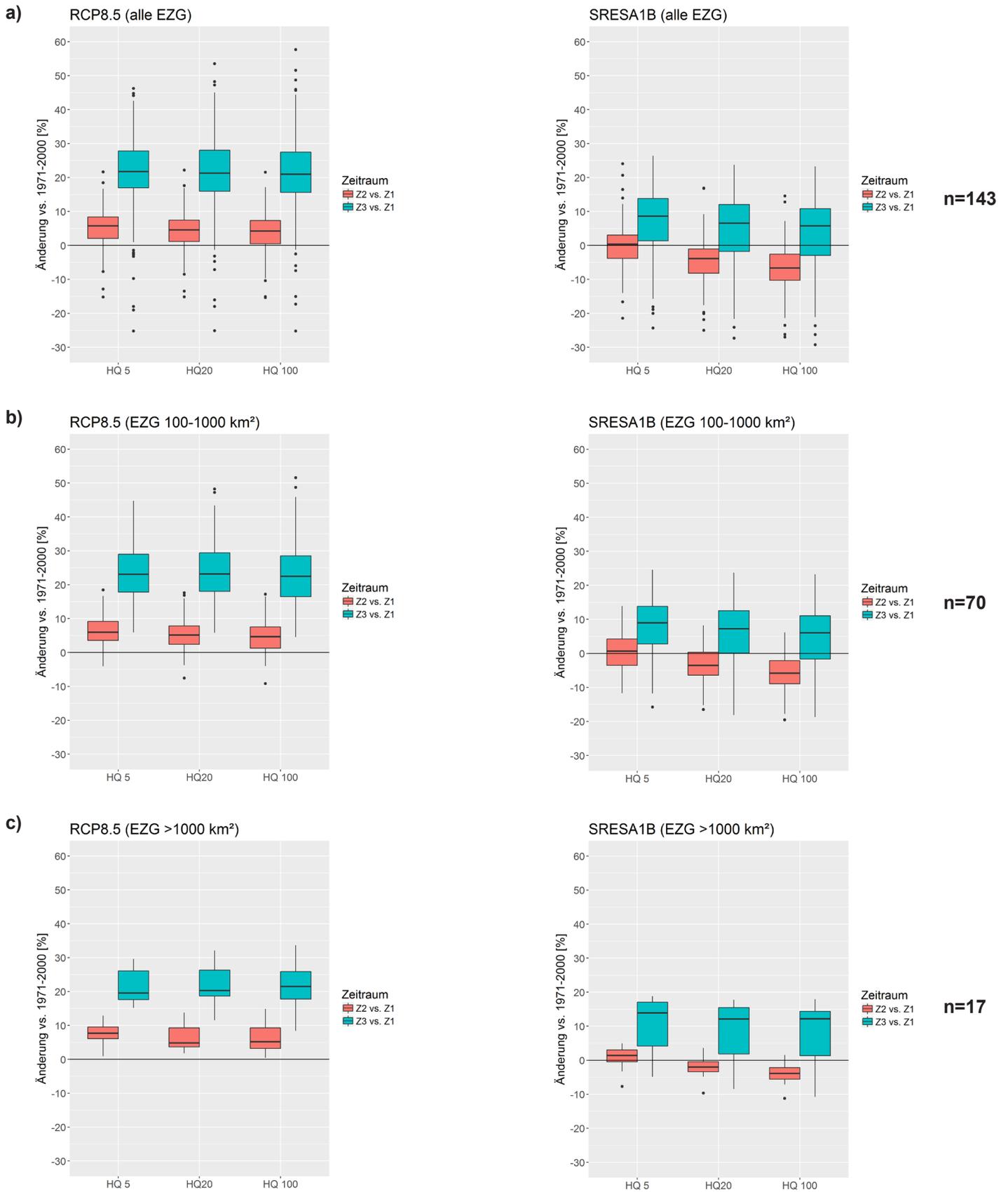


Abbildung 8-2: Änderungssignale verschiedener Hochwasserkennwerte an 143 ausgewählten Pegeln. Die Stichprobe stellt für jeden Pegel den Median der Änderungssignale aller Ensemblemitglieder dar.



Tabelle 8-1: Prozentuale Änderungen der Hochwasserscheitelwerte in der nahen Zukunft Z2 gegenüber 1971-2000 (Medianwerte der berechneten Änderungssignale)

Ereignis	RCP8.5			SRES-A1B		
	EZG (alle)	EZG [km ²] 100-1.000	EZG [km ²] >1.000	EZG alle	EZG [km ²] 100-1.000	EZG [km ²] >1.000
HQ ₅	+6	+6	+8	0	+1	+1
HQ ₂₀	+5	+5	+5	-4	-4	-2
HQ ₁₀₀	+4	+5	+5	-7	-6	-4

Tabelle 8-2: Prozentuale Änderungen der Hochwasserscheitelwerte in der fernen Zukunft Z3 gegenüber 1971-2000 (Medianwerte der berechneten Änderungssignale)

Ereignis	RCP8.5			SRES-A1B		
	EZG (alle)	EZG [km ²] 100-1.000	EZG [km ²] >1.000	EZG alle	EZG [km ²] 100-1.000	EZG [km ²] >1.000
HQ ₅	+22	+23	+20	+9	+9	+14
HQ ₂₀	+21	+23	+20	+7	+7	+12
HQ ₁₀₀	+21	+23	+22	+6	+6	+12

8.2 Handlungsempfehlungen

Die Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (Richtlinie 2007/60/EG) und die EG-Wasserrahmenrichtlinie sehen die Berücksichtigung der voraussichtlichen Auswirkungen des Klimawandels auf das Auftreten von Hochwasser, bei der Bewirtschaftung von Gewässern und in der wasserwirtschaftlichen Planung vor. Entsprechende Regelungen sind in den aktuellen Fassungen des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) und des Niedersächsischen Wassergesetzes umgesetzt. Ebenso sieht die Klimaschutzstrategie des Landes Niedersachsen neben Maßnahmen zum Klimaschutz Anpassungsstrategien vor, um die Gefahren des globalen Klimawandels zu mindern. Die Ergebnisse des KliBiW-Projektes lassen für die verwendeten Klimaszenarien den Schluss zu, dass Scheitelabflüsse von Hochwasserereignissen in Niedersachsen in der fernen Zukunft deutlich steigen werden. Diese Klimafolgen werden sich auf verschiedene Bereiche der wasserwirtschaftlichen Planung auswirken, wie z. B.:

- Ausweisung von Überschwemmungs- und Hochwasserrisikogebieten
- Bemessung von Hochwasserschutzanlagen
- Steuerung von Speicherbauwerken
- technischen Hochwasserschutzmaßnahmen mit flexiblen Gestaltungsoptionen
- Hochwasserrisikomanagement
- Hochwasservorsorge
- Hochwasservorhersage (kurze Vorwarnzeiten bei verstärkten Sommer-HW)
- Hochwasserretentionsraum-Entwicklung
- Generalentwässerungsplanung



Um die zukünftig verschärften Hochwassersituationen in Planungsprozessen vorausschauend und vorsorgend berücksichtigen zu können, sollten bereits heute Anpassungsstrategien entwickelt und umgesetzt werden. Dies hat besondere Bedeutung z. B. bei

- einer nachhaltigen Raumplanung, die ausreichend Kapazitäten für Anpassungsstrategien vorhalten kann und bei
- einem Katastrophenschutzmanagement, das auf veränderte Rahmenbedingungen vorbereitet ist.

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse erscheint die Entwicklung bzw. Einführung von Klimabeiwerten bei Planungs- und Bemessungsfragen sinnvoll und notwendig. Hierfür sollten die Resultate aus den beiden im Projekt verwendeten Klimamodell-Ensembles berücksichtigt werden. Die zu erwartenden Veränderungen sollten in Abhängigkeit des Planungshorizonts und von der Dauerhaftigkeit geplanter Maßnahmen beachtet werden.

Grundsätzlich sind Klimabeiwerte sowohl als feste Werte als auch als Wertebereiche, bezogen auf einzelne Regionen und/oder Jährlichkeiten, denkbar. Während erstere einen festen Orientierungsrahmen vorgeben, bieten letztere die Möglichkeit, je nach erforderlichem Sicherheitsaspekt flexibel vorzugehen. Da die Projektergebnisse kaum räumliche und statistische (Jährlichkeiten) Muster in Bezug auf die Veränderung von Hochwasserabflüssen zeigen, ist es sinnvoll, einen niedersachsenweit einheitlichen Beiwert anzusetzen. Dieser kann gegebenenfalls insbesondere in kleinen Einzugsgebieten in den Mittelgebirgslagen, individuell durch den GLD angepasst werden.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte sowie der Unsicherheiten, die den Klimamodellen der aktuellen Generation, aber auch den hydrologischen Modellen innewohnen, wird aus dem Projekt heraus empfohlen, zunächst einen niedersachsenweiten Klimabeiwert von 1,15 vorzusehen. Dieser Wert basiert auf den gemittelten Änderungssignalen beider Klimamodell-Ensembles (SRES-A1B und RCP8.5) für die ferne Zukunft (2071-2100). Eine regelmäßige Überprüfung und Fortschreibung der Klimabeiwerte unter Verwendung zukünftig weiterentwickelter Methoden und Erkenntnisse ist angeraten.

Empfohlen wird, Klimabeiwerte insbesondere bei kostenträchtigen Maßnahmen – wegen der noch bestehenden Modellunsicherheiten mit der gebotenen Umsicht anzuwenden. Die in den süddeutschen Bundesländern empfohlene Vorgehensweise des „no regret“ sollte auch in Niedersachsen berücksichtigt werden.

8.3 Ausblick

Die Ergebnisse von KliBiW 4 zeigen, dass auch in Niedersachsen Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft zu erwarten sind. Neben den mittleren Abflüssen im Winter werden die Scheitelabflüsse von Hochwasserereignissen in der Zukunft zunehmen, vor allem im Sommer und, je nach Klimaszenario, bereits zur Mitte bzw. gegen Ende des 21. Jahrhunderts. Diese Erkenntnisse machen es erforderlich, dass in Abhängigkeit von den Planungshorizonten von Vorhaben bereits heute eine Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel stattfindet. In seiner Klimapolitischen Umsetzungsstrategie (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 2013) sieht das Land Niedersachsen bereits diverse vorsorgende Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel vor. Unter Einbeziehung der in KliBiW gewonnenen Erkenntnisse müssen diese Empfehlungen nun konsequent in die Praxis umgesetzt werden.

Aufgrund der beständig fortschreitenden Entwicklungen in der Klimaforschung ist es notwendig, die Gültigkeit der in KliBiW ermittelten Ergebnisse in regelmäßigen Abständen im Hinblick auf neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu überprüfen. Zur Verbesserung der Verlässlichkeit der Analyseergebnisse ist außerdem die Identifikation von robusten Klimaänderungssignalen notwendig. Hierzu ist die Erweiterung des bisher verwendeten Klimamodellensembles anzustreben. Sollte in der Zukunft ein deutschlandweit einheitliches Ensemble eingeführt werden, muss überprüft werden, welche der vorgegebenen Klimamodelle bereits Teil der vorliegenden Untersuchung waren. Noch fehlende Ensemblemitglieder sollten nach Möglichkeit analysiert und in der Synthese der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Nicht zuletzt ist darauf hinzuweisen, dass sich die gezeigten Klimaveränderungen in Niedersachsen auch auf andere (wasserwirtschaftliche) Handlungsfelder auswirken werden. Dazu zählen die Niedrigwasserführung, die Grundwasserverhältnisse sowie die Gewässergüte. Durch Übertragung der in KliBiW gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Methoden bietet sich die Möglichkeit, die Auswirkungen des Klimawandels auch auf diese Bereiche näher zu untersuchen. Aus diesem Grund beschäftigt sich die aktuelle Projektphase KliBiW V mit dem Thema Niedrigwasser und wird die in Projektphase III (NLWKN, 2015) gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf weitere Klimaszenarien und weitere Einzugsgebiete ergänzen. Die Betrachtung von Klimafolgen auf zusätzliche Handlungsfelder ist derzeit in Vorbereitung.



9 Literaturverzeichnis

Ali G, Tetzlaff D, Soulsby C, McDonnell JJ, Capell R (2012): A comparison of similarity indices for catchment classification using a cross-regional dataset. *Advances in Water Resources* 40, 11–22. doi:10.1016/j.advwatres.2012.01.008.

Ångström A (1924): Solar and terrestrial radiation, *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 50, 121–125.

Beese F, Aspelsmeier S (Hrsg.) (2014): KLIFF - Klimafolgenforschung in Niedersachsen, Abschlussbericht, 2009 bis 2013, 196 Seiten.

Blöschl G (1996): *Scale and Scaling in Hydrology*. Eigenverlag.

Blöschl G, Sivapalan M (1995): Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes* 9, 251–290.

Blöschl G (1999): Prozessorientierte Regionalisierung von Hochwässern. In: Köhler, G. (Hrsg.): *Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete*. Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft. *Berichte* 9. 267-285. Kaiserslautern.

Breiman L (2001): Random forests. *Machine learning* 45, 5–32.

Brent RP (2002): *Algorithms for minimization without derivatives*. Dover Publications, Mineola, N.Y.

Burn DH (1990): Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resour. Res.* 26, 2257–2265. doi:10.1029/WR026i010p02257.

Collins M, Knutti R, Arblaster J, Dufresne J-L, Fichefet T, Friedlingstein P, Gao X, Gutowski WJ, Johns T, Krinner G, Shongwe M, Tebaldi C, Weaver AJ, Wehner M (2013): Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Dalrymple T (1960): *Flood-Frequency Analyses: Manual of Hydrology: Part 3. Flood-Flow Techniques*, Geological Survey Water-Supply. United States Government Printing Office.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2002): *ATV-DVWK-Regelwerk / Merkblatt*

504, Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Ges. zur Förderung der Abwassertechnik e.V., Hennef.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2012): *Merkblatt DWA-M 552: Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten*.

Dobler A, Feldmann H, Ulbrich U (2017): Grenzen und Herausforderungen der regionalen Klimamodellierung. In: *Klimawandel in Deutschland – Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* [Brasseur G., D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg.)]. Springer Spektrum, Heidelberg, Deutschland.

DVWK (1996): *DVWK-Merkblatt 238/1996: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen*.

Dyck S, Becker A, Flemming G, Glugla G, Golf W, Grünwald U, Gurtz J, Kluge C, Peschke, G (1978): *Angewandte Hydrologie. Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flußgebiete*. Verlag für Bauwesen, Berlin.

Dyck S, Grünwald U, Hansel N, Kluge C, Lauterbach D, Schramm M (1977): *Angewandte Hydrologie. Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse*, Auflage: 2. völlig überarbeitete Auflage 1980. ed. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin; München; Düsseldorf.

Dyck S, Peschke G (1995): *Grundlagen der Hydrologie*, 3. Auflage. ed. Verlag für Bauwesen, Berlin.

Efron B (1979): Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *The Annals of Statistics* 7, 1–26.

Ehret U, Zehe E, Wulfmeyer V, Warrach-Sagi K, Liebert J (2012): Should we apply bias correction to global and regional climate model data? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3391-3404, doi:10.5194/hess-16-3391-2012.

Elsholz M, Berger H (2003): Hochwasserbemessungswerte für die Fließgewässer in Niedersachsen - Abflüsse in Hydrologischen Landschaften über Regionalisierungsansätze.

Fangmann, A., Belli, A., Haberlandt, U. (2013): Trends in beobachteten Abflusszeitreihen in Niedersachsen. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 57 (5), 196-205, doi: 10.5675/HyWa_2013,5_1.

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.

Fraley C, Raftery AE (1998): How Many Clusters? Which Clustering Method? Answers Via Model-Based Cluster Analysis.



Gattermayr W, Kölbl C, Krammer C, Lorenz P, Maracek K, Mathis C, Moser J, Schatzl R, Wiesenegger H, Wimmer M (2011): Leitfaden: Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten.

Gelleszun, M., Kreye, P., Meon, G. (2015): Lexikografische Kalibrierungsstrategie für eine effiziente Parameterschätzung in hochaufgelösten Niederschlags-Abfluss-Modellen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 59 (3), 84-95.

Greenwood JA, Landwehr JM, Matalas N, Wallis JR (1979): Probability Weighted Moments: Definition and Relation to Parameters of Several Distributions Expressible in Inverse Form. *Water Resources Research* 15 (5), 1049-1054.

Haberlandt U, van der Heijden S, Verworn A, Berndt C, Dietrich J, Wallner M, Krause F (2015): Regionalisierung von Klimabeobachtungsdaten und WETT-REG-Szenarien für Niedersachsen. Hannover.

Haberlandt, U., Belli, A., Hölscher, J. (2010): Trends in beobachteten Zeitreihen von Temperatur und Niederschlag in Niedersachsen. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 54 (1), 28-36.

Hamburger Bildungsserver: Dieter Kasang: RCP-Szenarien <http://bildungsserver.hamburg.de/unsicherheiten-und-szenarien/4105604/rcp-szenarien/> (05.07.2017)

Haupt R (2000): Regionalisierung von Hochwasserkennwerten in Mecklenburg-Vorpommern. Univ. Rostock.

Hennegriff, W., Kolokotronis, V. (2007): Methodik zur Ableitung von Klimaänderungsfaktoren für Hochwasserkennwerte in Baden-Württemberg. *Wasserwirtschaft* 09/2007, 31-35.

Hosking JRM, Wallis JR (1997): *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge University Press.

Hosking JRM (1990): L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society Series B-Methodological* 52 (1), 105-124.

Institute Of Hydrology (1999): *Flood Estimation Handbook*. Institute of Hydrology. Wallingford. UK.

IPCC (2000): *IPCC Special Report Emissions Scenarios – Summary for Policy Makers*.

IPCC (2013): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: *Klimaänderung 2013: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I*

zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), 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 (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 Seiten. Deutsche Übersetzung durch ProClim, Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, Bern/Wien/Bonn, 2014.

IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Jacob D, Göttel H, Kotlarski S, Lorenz P, Sieck K (2008): *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland*. UBA Forschungsbericht 204 41 138, v. UBA-FB 000969, p. 1 – 159.

Jacob D, Bülow K, Kotova L, Moseley C, Petersen J, Rechid D (2012a): *Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung*, CSC Report 6, Climate Service Center, Germany.

Jacob, D; Petersen, J; Eggert, B; Alias, A; Christensen, OB; Bouwer, LM; Braun, A; Colette, A; Deque, M; Georgievski, G; Georgopoulou, E; Gobiet, A; Menut, L; Nikulin, G; Haensler, A; Hempelmann, N; Jones, C; Keuler, K; Kovats, S; Kroener, N; Kotlarski, S; Kriegsmann, A; Martin, E; van Meijgaard, E; Moseley, C; Pfeifer, S; Preuschmann, S; Radermacher, C; Radtke, K; Rechid, D; Rounsevell, M; Samuelsson, P; Somot, S; Soussana, J.-, F; Teichmann, C; Valentini, R; Vautard, R; Weber, B; Yiou, P; (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 14 (2). pp. 563-578.

Jacob D, Kottmeier C, Petersen J, Rechid D, Teichmann C (2017). *Regionale Klimamodellierung*. In: *Klimawandel in Deutschland*. Hrsg. G. Brasseur et al., 2017.

Jakob D, Reed DW, Robson AJ (1999): Selecting a pooling-group. In *Flood Estimation Handbook*, Vol. 3 Institute of Hydrology: Wallingford, UK

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.

Kaspar F, Mächel H (2017): *Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland*. In: *Klimawandel in Deutschland – Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*, Hrsg. Brasseur, Jacob, Schuck-Zöllner, 2017. Springer Open.



Kaufmann L, Rousseeuw PJ (2008): Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis.

Kendall MG (1975): Rank Correlation Methods. Charles Griffin, London.

Klimanavigator: Dynamische regionale Klimamodelle <http://www.klimanavigator.de/dossier/artikel/034114/index.php> (05.07.2017)

KLIWA (2006): Unser Klima verändert sich Folgen – Ausmaß – Strategien, Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft in Süddeutschland, Stuttgart.

Kohonen T (1990): The self-organizing map. Proceedings of the IEEE 78, 1464–1480. doi:10.1109/5.58325

Kreienkamp F, Spekat A, Enke W (2010): Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. Technical report, Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Kreye P. (2015): Mesoskalige Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit Nutzung von Grundwassermessungen und satellitenbasierten Bodenfeuchtedaten. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.

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.

Maraun D (2012): Nonstationarities of regional climate model biases in European seasonal mean temperature and precipitation sums. Geophys. Res. Lett., 39, L06706, doi:10.1029/2012GL051210.

Lauterbach D, Glos E (1965): Ein Beitrag zur Berechnung von Hochwasserscheitelwerten unter Berücksichtigung der Häufigkeit des Auftretens. Be. Mitt. z. Gewässerkundl. JB d. DDR. Berlin. 3. 7-40.

Lindström G, Johansson B, Persson M, Gardelin M, Bergström S (1997): Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. Journal of Hydrology 201.1-4, S. 272-288

Linke, C. et al, 2015: Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder- Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Hannover Okt. 2015.

Lutz W (1984): Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Diss. Universität Karlsruhe, Mitt. d. Inst. f. Hydrol. u. Wasserwirt-

schaft. Heft 24. Karlsruhe.

LWI-HYWAG, IFW (2012): PANTA RHEI Benutzerhandbuch – Programmdokumentation zur hydrologischen Modellsoftware (unveröffentlicht).

MacQueen, J (1967): Some methods for classification and analysis of multivariate observations.

Maniak (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Springer Verlag: Berlin, Heidelberg.

Mann HB (1945): Non-parametric test against trend. Econometrica, Vol. 13.

Merz R, Blöschl G (2005): Flood Frequency regionalisation - spatial proximity vs. catchment attributes. Water Resources Research 39 (12). article number 1340.

Merz R, Blöschl G, Humer G. (2008): Hochwasserabflüsse in Österreich - das HORA Projekt. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. 60. (9-10).

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.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology 10.

Nelder JA, Mead R (1965): A simplex method for function minimization. The computer journal 7 (4).

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

NLWKN (2012): Globaler Klimawandel. Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Abschlussbericht Phasen 1 + 2. In: Oberirdische Gewässer, Band 33. Norden: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.

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.

Piöck-Elena U, Pfaundler M, Blöschl G, Burlando P, Merz R (2000): Saisonalitätsanalyse als Basis für die Regionalisierung von Hochwassern. wasser, energie, luft, 92.



Rao AR, Srinivas VV (2006): Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis. *Journal of Hydrology* 318, 57–79. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.004

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

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

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).

Rockel B, Will A & Hense A (2008): The Regionale Climate Model COSMO-CLM. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 17, No. 4.

Roeckner E, Bäuml G, Bonaventura L, Brokopf R, Esch M, Giorgetta M, Hagemann S, Kirchner I, Kornblüeh L, Manzini E, Rhodin A, Schlese U, Schulzweida U, Tompkins, A (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description, ISSN 0937 – 1060.

Schumann A, Pfützner B (2002): Regionalized Flood Estimation at ungauged sites supported by GIS. *Proceedings of an International Conference on Flood Estimation*, Berne. März 6-8, 2002. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin. CHR Report II-17. Swiss Federal Office for Water and Geology. 2-669-677.

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

Skøien JO, Merz R, Blöschl G (2006): Top-kriging - geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2, 2253–2286.

Skøien JO, Blöschl G (2007): Spatiotemporal topological kriging of runoff time series. *Water Resources Research* 43, n/a-n/a. doi:10.1029/2006WR005760.

SMHI (2008): *Integrated Hydrological Modelling System – Manual Version 6.0*, Techn. Ber. Swedish Meteorological and Hydrological Institute.

Spekat A, Enke W, Kreienkamp F (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM

T63L31 2010 bis 2100 für die SRES Szenarios B1, A1B und A2. UBA Forschungsbericht 204 41 138, p. 1-149.

Suzuki R, Shimodaira H (2006): Pvclust: an R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering. *Bioinformatics* 22, 1540–1542. doi:10.1093/bioinformatics/btl117

Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA (2012): An Overview of CMIP5 and the experiment design." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485-498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

Tebaldi C, Arblaster JM, Knutti R 2011: Mapping model agreement on future climate projections. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L23701.

Teutschbein T, Seibert J (2013): Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 5061-5077, doi:10.5194/hess-17-5061-2013.

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.

Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG), (2014): *Hochwasserabflüsse in Thüringen*, Schriftenreihe 108. Jena. 289 Seiten.

Umweltbundesamt (2011): *CORINE Land Cover Aktualisierung 2006 für Deutschland*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

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

van der Linden P, Mitchell JFB (eds.) 2009: *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp.

Vrugt JA, Robinson BA (2007): Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104, 708–711. doi:10.1073/pnas.0610471104

Wallis JR, Schaefer MG, Barker BL, Taylor GH (2007): Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington State. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11, 415–442.

Wallner M, Haberlandt U, Krause F, van der Heijden S, Maier N, Dietrich J, Fangmann A, Gellsezun M, Förster K, Gocht M, Stein K, Meon G, Herold M, Ptak T, Sauter M, Sperring V, Verworn F, Rosenwinkel KH, Heuer A,



Lange S, Forberg C, Haas A, Restemeyer B, Gerkenmeyer B, Anhalt M, Hölscher J (2013): KLIFF – Klimafolgenforschung in Niedersachsen. Abschlussbericht – Forschungsthema 6: Binnengewässer: Auswirkungen von Klimaänderungen auf Wasserdargebot, Hochwasserrisiko und Gewässerbelastung in Niedersachsen (KLIFWA).

Wallner M (2015): Räumlicher und zeitlicher Transfer von hydrologischen Modellparametern und deren Anwendung in der Klimawandelforschung, Leibniz Universität Hannover, Hannover.

Wallner M, Haberlandt U (2015): Klimabedingte Änderung von Hochwasserabflüssen im Aller-Leine-Einzugsgebiet - eine Fallstudie mit HBV-IWW. Hydrologie und Wasserwirtschaft.

Walther J, Fischer B, Horn S, Merz R (2012): Flächenhafte Bestimmung von Hochwasserspenden. Schriftenreihe Heft 3/2012.

Ward JH Jr. (1963): Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. Journal of the American Statistical Association.

Wasserhaushaltsgesetz (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz WHG) in der Fassung vom 31.07.2009 (BGBl. I S. 2585).

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



10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Projektpartner mit Arbeitsschwerpunkten in KliBiW 4	2	Analysen verwendeten Abflusspegeln	16
Abbildung 2-2: Naturräumliche Gliederung Niedersachsens (NLWKN, 2015)	3	Abbildung 4-3: Mittlerer Abfluss am Pegel Rethem (Einzugsgebiet ~ 14.730 km ²) im Sommer (links) und die Häufigkeit von größeren Abflussereignissen im Herbst (rechts); blaue Balken stellen die saisonale Abflussmenge bzw. Häufigkeit dar, die schwarze Gerade zeigt die geschätzte Trendgerade (im Sommer eine signifikante Abnahme, im Herbst eine schwach signifikante Zunahme).....	17
Abbildung 2-3: Untersuchungsgebiete in KliBiW 4.....	4	Abbildung 4-4: Richtung und Signifikanz der Trends der Abfluss-Kenngrößen im Zeitraum 1966 bis 2013 (die Richtung der Balken kennzeichnet die Richtung des Trends; blaue Balken kennzeichnen den Anteil der signifikanten Trends).....	18
Abbildung 2-4: Ablaufschema von KliBiW 4.....	5	Abbildung 4-5: Räumliche Verteilung der Trends für alle Abfluss-Kenngrößen und Saisons über den Zeitraum 1966-2013 (blaue Pfeile = Zunahmen, rote Pfeile = Abnahmen).....	19
Abbildung 3-1: Untersuchungsgebiet mit den für die Analysen verwendeten Niederschlags- und Klimastationen.....	6	Abbildung 4-6: Räumliche Verteilung der 338 verfügbaren Pegel (links) und der auf Basis von mittleren Anforderungskriterien für die Hochwasserregionalisierung ausgewählten 157 Pegel (rechts).....	22
Abbildung 3-2: Untersuchungsgebiet mit allen verfügbaren Niederschlags- und Klimastationen.....	6	Abbildung 4-7: Index-Flood Schrittfolge modifiziert nach Hosking & Wallis (1997).....	24
Abbildung 3-3: Niederschlagssummen im Sommer (links) und Winter (rechts) in Niedersachsen; blaue Balken stellen die Niederschlagssummen gemittelt für Niedersachsen dar, die schwarze Gerade zeigt die geschätzte Trendgerade (im Sommer eine nicht signifikante Abnahme, im Winter eine schwach signifikante Zunahme).....	7	Abbildung 4-8: Saisonalität der Jahreshochwasser und daraus abgeleitetes mittleres Eintrittsdatum in Anlehnung an Haupt (2000) beispielhaft für den Pegel Peine: a) Lage und b) Eintrittsdatum der Jahreshochwasser, die Punktgröße ist relativ zur Größe des Hochwasserabflusses, der Pfeil zeigt das mittlere Eintrittsdatum an, der grau hinterlegte Bereich im Inneren des Kreises visualisiert die Bandbreite um das mittlere Eintrittsdatum auf Basis der Standardabweichung des Eintrittsdatums, der grau hinterlegte Bereich am äußeren Rand des Kreises visualisiert die relative Häufigkeitsverteilung auf Wochenbasis; sowie für ganz Niedersachsen: c) Kartendarstellung des mittleren Eintrittsdatums der ausgewählten Pegel und d) mittleres Eintrittsdatum der Jahreshochwasser an den ausgewählten Pegeln, die Punktgröße und der Abstand vom Zentrum sind relativ zur Ausprägung der Saisonalität, wobei je größer der Punkt ist und je weiter entfernt er vom Zentrum ist, desto stärker ist die Saisonalität ausgeprägt, d.h. desto geringer ist die Variabilität in der Eintrittszeit der Jahreshochwasser, der Pfeil zeigt das mittlere Eintrittsdatum für alle ausgewählten Pegel an, der grau hinterlegte Bereich visualisiert die mittlere Bandbreite um das mittlere Eintrittsdatum.....	25
Abbildung 3-4: Richtung und Signifikanz der Trends der Temperatur-Kenngrößen im Zeitraum 1951 bis 2015 (die Richtung der Balken kennzeichnet die Richtung des Trends; blaue Balken kennzeichnen den Anteil der signifikanten Trends).....	8	Abbildung 4-9: Vergleich der ausgewählten Klassifizierungsmethode hinsichtlich der erreichten relativen Anteile von als homogen eingestuftem Pegeln an der gesamten Auswahl von Pegeln unter Verwendung des	
Abbildung 3-5: Räumliche Verteilung der Trends für alle Temperatur-Kenngrößen und Saisons über den Zeitraum 1951-2015 (blaue Pfeile = Abnahmen, rote Pfeile = Zunahmen).....	9		
Abbildung 3-6: Richtung und Signifikanz der Trends der Niederschlags-Kenngrößen im Zeitraum 1951 bis 2015 (die Richtung der Balken kennzeichnet die Richtung des Trends; blaue Balken kennzeichnen den Anteil der signifikanten Trends).....	11		
Abbildung 3-7: Räumliche Verteilung der Trends für ausgewählte Niederschlags-Kenngrößen und Saisons über den Zeitraum 1951-2015 (blaue Pfeile = Zunahmen, rote Pfeile = Abnahmen).....	12		
Abbildung 3-8: Lage der verfügbaren Niederschlags- und Klimastationen.....	13		
Abbildung 3-9: Mittel der interpolierten Klimavariablen für den Zeitraum 1950 bis 2015.....	15		



H1 \leq 1 Kriteriums (links) und des H1 \leq 3 Kriteriums (rechts)..... 26

Abbildung 4-10: Klassifizierung der ausgewählten Pegel in 24 homogene Regionen mittels Self-Organizing Maps..... 27

Abbildung 4-11: Räumliche Verteilung der zu Region 9 zugehörigen Pegel (links), die Größe der Punkte ist relativ zur Einzugsgebietsgröße der Pegel; Angepasste, regionale Verteilungsfunktion (rechts), die Jahreshochwasser aller Pegel der Region sind als Punkte dargestellt, der graue Bereich zeigt die Unsicherheitsbänder..... 27

Abbildung 4-12: Lokale Schätzung der 100-jährigen Hochwasserabflussspende für die Referenzpegel (a), räumliche Verteilung der Kreuzvalidierungsergebnisse für das ausgewählte Hochwasserregionalisierungsverfahren Index-Flood unter Verwendung der globalen Multiplen Linearen Regression für die Regionalisierung des Skalierungsparameters MHQ für die Referenzpegel (b) und deren relativen Abweichungen (c)..... 30

Abbildung 4-13: Vergleich der Hochwasserregionalisierungsmethoden für die ausgewählten Stationen und die gegebenen Jährlichkeiten auf Basis des RRMSE der Kreuzvalidierung für die Hochwasserabflüsse 33

Abbildung 4-14: Räumliche Verteilung der hydrologischen Längsschnitte und der dafür ausgewählten Pegel (links), räumliche Verteilung der für den hydrologischen Längsschnitt des übergeordneten Gewässers der Aller verwendeten Pegel (rechts)..... 34

Abbildung 4-15: Hydrologischer Längsschnitt des übergeordneten Gewässers der Aller für die 100-jährige Hochwasserabflussspende HQ₁₀₀. Der graue Bereich markiert die Unsicherheitsbänder durch das 10% und das 90% Quantil. Die schwarzen, unterbrochenen Linien stellen ausgewählte Einzelereignisse dar..... 36

Abbildung 5-1: Modellkette der regionalen Klimamodellierung (ergänzt nach Klimanavigator, 2017) 37

Abbildung 5-2: Die Szenarien der THG-Entwicklung im Vergleich (Hamburger Bildungsserver, 2017) 38

Abbildung 5-3: Lage der Stationen mit Zeitreihendaten des Niederschlags (RR) bzw. verschiedener Klimagrößen (KL) vor der Regionalisierung (links: WETTREG2006, rechts: WETTREG2010)..... 36

Abbildung 5-4: Lage der Gitterpunkte der regionalen dynamischen Klimamodelle (oben links: ECHAM5/REMO auf rotiertem 10x10 km Raster, oben rechts: ECHAM5/CLM auf nicht-rotiertem 18x18 km Raster, unten links: EURO-CORDEX Modellläufe auf rotiertem 12,5x12,5 km Raster, unten rechts: Lage der Gitterpunkte aller

Modellläufe nach der Interpolation auf 10x10 km Raster)..... 42

Abbildung 5-5: Plausibilisierung der interpolierten Klimamolldaten am Beispiel der Modellkette ECHAM5-Lauf1_CLM (SRES); alle Klimagrößen gemittelt über den Zeitraum 1971-2000..... 43

Abbildung 5-6: Auswahl einer tendenziell nassen, mittleren und trockenen Realisation von WETTREG2006 anhand der Änderungssignale gegenüber dem 30jährigen Mittel des Zeitraumes 1971-2000 für den Jahresniederschlag aus allen 20 Realisationen, jeweils gemittelt für die Einzugsgebiete von Aller, Leine, Hase und Hunte 45

Abbildung 5-7: Auswahl einer tendenziell nassen, mittleren und trockenen Realisation von WETTREG2010 anhand der Änderungssignale gegenüber dem 30jährigen Mittel des Zeitraumes 1971-2000 für den Jahresniederschlag aus allen 10 Realisationen, jeweils gemittelt für die Einzugsgebiete von Aller, Leine, Hase und Hunte 46

Abbildung 5-8: Abweichung der Tagesmitteltemperatur (Tav) zwischen regionalen Klimamodellen (SRES-A1B) und Beobachtungsdaten (alle Daten auf ein 10x10 km Raster interpoliert), gemittelt über den Zeitraum 1971-2000; weiße Bereiche zeigen (basierend auf dem U-Test mit $\alpha=0,05$) keine signifikanten Unterschiede 49

Abbildung 5-9: Abweichung der Tagesmitteltemperatur (Tav) zwischen regionalen Klimamodellen (RCP8.5) und Beobachtungsdaten (alle Daten auf ein 10x10 km Raster interpoliert), gemittelt über den Zeitraum 1971-2000; weiße Bereiche zeigen (basierend auf dem U-Test mit $\alpha=0,05$) keine signifikanten Unterschiede 50

Abbildung 5-10: Abweichung des Niederschlages (Psum) zwischen regionalen Klimamodellen (SRES-A1B) und Beobachtungsdaten (alle Daten auf ein 10x10 km Raster interpoliert), gemittelt über den Zeitraum 1971-2000; weiße Bereiche zeigen (basierend auf dem U-Test mit $\alpha=0,05$) keine signifikanten Unterschiede 51

Abbildung 5-11: Abweichung des Niederschlages (Psum) zwischen regionalen Klimamodellen (RCP8.5) und Beobachtungsdaten (alle Daten auf ein 10x10 km Raster interpoliert), gemittelt über den Zeitraum 1971-2000; weiße Bereiche zeigen (basierend auf dem U-Test mit $\alpha=0,05$) keine signifikanten Unterschiede 52

Abbildung 5-12: Abweichungen zwischen Klimamolldaten und Beobachtung beim 90%-Quantil des Niederschlages auf Basis der jeweiligen Gebietsmittel



der 7 Einzugsgebiete, gemittelt für den Zeitraum 1971-2000 53

Abbildung 5-13: Abweichungen zwischen Klimamodell-
daten und Beobachtung bei der max. Anzahl aufein-
ander folgender Trockentage auf Basis der jeweiligen
Gebietsmittel der 7 Einzugsgebiete, gemittelt für den
Zeitraum 1971-2000 53

Abbildung 5-14: Abweichung der Klimamodell-
daten (RCP-Modelle) gegenüber der Beobachtung für die
vier Klimakenngrößen mittlere Tagestemperatur (Tav),
Tagesniederschlagssumme (Psum), 90 %-Quantil der
Tagesniederschläge (Pq90) und maximale Dauer von
Trockenphasen (Pxcd), basierend auf den Gebiets-
mitteln der sieben betrachteten Flusseinzugsgebiete,
gemittelt über den Zeitraum 1971-2000; links: ohne Bi-
as-Adjustierung, rechts: mit Bias-Adjustierung (Linear
Scaling)..... 57

Abbildung 5-15: Abweichungen zwischen Klima-
modell-
daten (blau: EC-EARTH_RACMO22E, rot: MPI-
ESM_RCA4) und Beobachtung für ausgewählte Kli-
magrößen im Einzugsgebiet der Hase jeweils ohne
Bias-Adjustierung (ohne BA) und mit Bias-Adjustierung
(mit BA)..... 58

Abbildung 5-16: Abweichungen zwischen mittels Klima-
modell-
daten (blau: EC-EARTH_RACMO22E, rot: MPI-
ESM_RCA4) und gemessenen Klimadaten simulierten
Abflüssen in einem Wasserhaushaltsmodell für den
Pegel Haselünne im Einzugsgebiet der Hase, jeweils
ohne adjustierte Klimamodell-
daten (ohne BA) und mit
adjustierten Klimamodell-
daten (mit BA) 59

Abbildung 5-17: Klimatische Änderungssignale von
zwei Klimamodellläufen (blau: EC-EARTH_RAC-
MO22E, rot: MPI-ESM_RCA4) für die ferne Zukunft
(2071-2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1971-
2000) im Einzugsgebiet der Hase, jeweils ohne Bi-
as-Adjustierung (ohne BA) und mit Bias-Adjustierung
(mit BA)..... 59

Abbildung 5-18: Änderungssignale der Abflüsse am
Pegel Haselünne im Einzugsgebiet der Hase, basie-
rend auf zwei Klimamodellläufen (blau: EC-EARTH_
RACMO22E, rot: MPI-ESM_RCA4), für die ferne Zu-
kunft (2071-2100) gegenüber dem Referenzzeitraum
(1971-2000), jeweils ohne adjustierte Klimamodell-
daten (ohne BA) und mit adjustierten Klimamodell-
daten (mit BA)..... 60

Abbildung 6-1: Signifikanztests (eigene Darstellung ba-
sierend auf: Leitlinien zur Interpretation v. Klimamodell-
daten, Linke et al., 2016) 61

Abbildung 6-2: Schema zur Klassifizierung der Robus-
theit von Klimaänderungssignalen (eigene Darstel-
lung) 61

Abbildung 6-3: Projizierte Änderung der mittleren Ta-
gesmitteltemperatur (Tav) der Ensembles SRES A1B
und RCP8.5 64

Abbildung 6-4: Projizierte Änderung der Nieder-
schlags-
summe für Tage mit $N \geq 1 \text{ mm/d}$ (Psum) der En-
sembles SRES A1B und RCP8.5 65

Abbildung 6-5: Projizierte Änderung des 90 %-Quantils
der Tagesniederschlagsmenge für Tage mit $N \geq 1 \text{ mm/d}$
(Pq90) der Ensembles SRES A1B und RCP8.5 66

Abbildung 6-6: Projizierte Änderung der größten 3-Ta-
ges-Niederschlagssumme (Px3d) der Ensembles
SRES A1B und RCP8.5 67

Abbildung 6-7: Projizierte Änderung der maximalen An-
zahl aufeinanderfolgender Trockentage mit $N \leq 1 \text{ mm/d}$
(Pxcd) der Ensembles SRES A1B und RCP8.5 68

Abbildung 6-8: Projizierte Änderung der mittleren Tem-
peratur (Tav) in der fernen Zukunft (2071-2100) gegen-
über dem Kontrollzeitraum (1971-2000) für die Ensem-
bles SRES A1B (linke Spalte) sowie RCP8.5 (rechte
Spalte), getrennt nach Jahreszeit. Die Boxplots zeigen
die Änderungssignale für die betrachteten Einzugsge-
biete. 69

Abbildung 6-9: Projizierte Änderung der Niederschlags-
summe (Psum) in der fernen Zukunft (2071-2100) ge-
genüber dem Kontrollzeitraum (1971-2000) für die
Ensembles SRES A1B (linke Spalte) sowie RCP8.5
(rechte Spalte), getrennt nach Jahreszeit. Die Boxplots
zeigen die Änderungssignale für die betrachteten Ein-
zugsgebiete..... 70

Abbildung 6-10: Projizierte Änderung des 90%-Quan-
tils des Niederschlags (Pq90) in der fernen Zukunft
(2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum (1971-
2000) für die Ensembles SRES A1B (linke Spalte) so-
wie RCP8.5 (rechte Spalte), getrennt nach Jahreszeit.
Die Boxplots zeigen die Änderungssignale für die be-
trachteten Einzugsgebiete. 71

Abbildung 7-1: Schematische Darstellung der Überla-
gerung von Teileinzugsgebiets-, Landnutzungs- und
Bodenkarte zur Erstellung einer Hydrotopkarte am Bei-
spiel des Pegel-einzugsgebiets Lauenbrück B75 inner-
halb des Einzugsgebiets der Wümmen..... 75

Abbildung 7-2: Schematische Darstellung der hydrolo-
gischen Prozesse in PANTA RHEI. Es wird zwischen
vertikalen Teilprozessen (Abflussbildung) und lateralen
Abflussprozessen (Abflusskonzentration und Wellen-
ablauf) unterschieden..... 76

Abbildung 7-3: Lage der Referenzpegel in den sieben
untersuchten Einzugsgebieten in Niedersachsen..... 78



Abbildung 7-4: Ganglinien und Summenlinien der simulierten und beobachteten Abflüsse (Tagesmittelwerte) für den Pegel Emlichheim (Vechte) für die Kalibrierungsperiode 1971-1991..... 81

Abbildung 7-5: Ganglinien und Summenlinien der simulierten und beobachteten Abflüsse (Tagesmittelwerte) für den Pegel Emlichheim (Vechte) für den Zeitraum 11/2004 - 10/2008..... 81

Abbildung 7-6: Hochwasserstatistik für den Pegel Emlichheim für den Zeitraum 1971-2011. Zugrunde gelegt wurde die Gumbel-Verteilungsfunktion..... 81

Abbildung 7-7: Simulierte und beobachtete Jahreshöchstwerte des Abflusses (JahresHQ) aus Tagesmittelwerten für den Pegel Emlichheim für den Zeitraum 1971-2011..... 81

Abbildung 7-8: HQ₅-Kennwerte als Abflussspenden für Simulation und Beobachtung für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum für die Referenzpegel. Zugrunde gelegt wurde die Gumbel-Verteilungsfunktion..... 82

Abbildung 7-9: HQ₁₀₀-Kennwerte als Abflussspenden für Simulation und Beobachtung für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum für die Referenzpegel. Zugrunde gelegt wurde die Gumbel-Verteilungsfunktion..... 82

Abbildung 7-10: Vergleich der langjährigen Monatsmittelwerte des Abflusses aus den Modellläufen und der Beobachtung für den Zeitraum 1971-2000 für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) für den Pegel Rethem. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5. 83

Abbildung 7-11: Vergleich der langjährigen Monatsmittelwerte des Abflusses aus den Modellläufen und der Beobachtung für den Zeitraum 1971-2000 für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) für den Pegel Haselünne. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5. 83

Abbildung 7-12: Hochwasserstatistik für den Pegel Rethem für den Zeitraum 1971-2000 basierend auf Tagesmittelwerten des SRES A1B-Ensembles (links) und des RCP8.5-Ensembles (rechts) sowie der Beobachtung. Zugrunde gelegt wurde die Gumbel-Verteilungsfunktion. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5..... 84

Abbildung 7-13: Hochwasserstatistik für den Pegel Haselünne für den Zeitraum 1971-2000 basierend auf Tagesmittelwerten des SRES A1B-Ensembles (links) und des RCP8.5-Ensembles (rechts) sowie der Beobachtung. Zugrunde gelegt wurde die Gumbel-Verteilungsfunktion. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5..... 84

funktion. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5..... 84

Abbildung 7-14: Änderungssignale für die Jahresmittelwerte des Abfluss (MQ) für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles. 86

Abbildung 7-15: Änderungssignale für Jahresmittelwerte des Abfluss (MQ) für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Große Aue, Hunte, Hase und Vechte für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles..... 86

Abbildung 7-16: Änderungssignale für Jahresmittelwerte des Abfluss (MQ) für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles..... 87

Abbildung 7-17: Änderungssignale für Jahresmittelwerte des Abfluss (MQ) für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Große Aue, Hunte, Hase und Vechte für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles..... 87

Abbildung 7-18: Änderungssignale für die Jahresmittelwerte des Abflusses (MQ) für den Pegel Rethem für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) mit dem jeweiligen Ensemble-Median für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5. 88

Abbildung 7-19: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwertes des Abflusses (MQ) für die einzelnen Mitglieder des SRES A1B- und des RCP8.5-Ensembles sowie für die Ensemble-Mediane für den Zeitraum 1971-2100 (Mittelwert 1971-2000 entspricht 100 %) für den Pegel Rethem. Die transparenten Flächen geben die Spannweiten des jeweiligen Ensembles an..... 88

Abbildung 7-20: Änderungssignale für die mittleren Quartalsabflüsse (MQ) für den Pegel Rethem für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000..... 89

Abbildung 7-21: Median der langjährigen Monatsmittelwerte für den Pegel Rethem für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts). 98

Abbildung 7-22: Änderungssignale für die gemittelten Jahreshöchstwerte des Abflusses (MHQ) für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) mit dem jeweiligen Ensemble-Median für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzpe-



riode 1971-2000 für den Pegel Rethem. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5. 90

Abbildung 7-23: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwertes aus den Jahreshöchstwerten des Abflusses (MHQ) für die einzelnen Mitglieder des SRES A1B- und des RCP8.5-Ensembles sowie die Ensemble-Mediane für den Zeitraum 1971-2100 (Mittelwert 1971-2000 entspricht 100 %) für den Pegel Rethem. Die transparenten Flächen geben die Spannweite des jeweiligen Ensembles an. 90

Abbildung 7-24: Änderungssignale für HQ_5 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles 92

Abbildung 7-25: Änderungssignale für HQ_5 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Große Aue, Hunte, Hase und Ilmenau für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles 92

Abbildung 7-26: Änderungssignale für HQ_5 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles. 93

Abbildung 7-27: Änderungssignale für HQ_5 für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Grosse Aue, Hunte, Hase und Ilmenau für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles. 93

Abbildung 7-28: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für HQ_5 aus den 6 Mitgliedern des SRES A1B-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. 94

Abbildung 7-29: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für HQ_5 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. 95

Abbildung 7-30: Änderungssignale für HQ_{100} für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles. 96

Abbildung 7-31: Änderungssignale für HQ_{100} für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Große Aue, Hunte, Hase und Ilmenau für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles. 96

renzpegel der Einzugsgebiete Große Aue, Hunte, Hase und Ilmenau für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles. 96

Abbildung 7-32: Änderungssignale für HQ_{100} für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Aller-Leine-Oker, Wümme und Ilmenau für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles. 97

Abbildung 7-33: Änderungssignale für HQ_{100} für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für die Referenzpegel der Einzugsgebiete Grosse Aue, Hunte, Hase und Vechte für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles. 97

Abbildung 7-34: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für HQ_{100} für die 6 Modellketten des SRES A1B-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. 98

Abbildung 7-35: Mediane der Änderungssignale aller Referenzpegel für HQ_{100} für die 8 Modellketten 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. 99

Abbildung 7-36: Struktogramm des konzeptionellen Niederschlag-Abfluss-Modells HBV-IWW modifiziert nach Wallner (2015) 101

Abbildung 7-37: Räumliche Verteilung der Modellgüte für die Kalibrierung (links) und Validierung (rechts); eine stärkere Ausprägung des Farbtönen signalisiert jeweils eine höhere Modellgüte 102

Abbildung 7-38: Räumliche Verteilung der 178 aufgebauten Modellgebiete (links) und der entsprechend der Modellgüte ausgewählten 108 Modellgebiete (rechts). Grau eingefärbte Gebiete wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt. 103

Abbildung 7-39: Häufigkeitsverteilung der erzielten Modellgüte der ausgewählten 108 Modellgebiete für die verwendeten Auswahlkriterien. Die Box wird durch die 25 % und 75 %-Quantile begrenzt. Als schwarzer Querbalken ist der Median und als blauer Punkt der Mittelwert gekennzeichnet. 103

Abbildung 7-40: Entsprechend der Modellgüte ausgewählte Modelleinzugsgebiete für HBV-IWW (a) und PANTA RHEI (b) sowie die Verschneidung beider Niederschlag-Abfluss-Modelle (c) und die Referenzgebiete, für welche beide Modelle vorliegen (d); blaue Punkte symbolisieren die Pegel mit modellierten Abflussänderungssignalen 105



Abbildung 7-41: Räumliche Verteilung der gemittelten simulierten Änderungssignale für den 5-jährigen Hochwasserabfluss auf Basis der Verschneidung beider Niederschlags-Abfluss-Modelle107

Abbildung 7-42: Boxplots basierend auf den Medianen aller ausgewählten Modellgebiete für den 5-jährigen Hochwasserabfluss. Die Box wird durch die 25 % und 75 %-Quantile begrenzt. Als schwarzer Querbalken ist der Median und als blauer Punkt der Mittelwert gekennzeichnet.....108

Abbildung 7-43: Boxplots basierend auf den Medianen aller ausgewählten Modellgebiete für den 20-jährigen Hochwasserabfluss. Die Box wird durch die 25 % und 75 %-Quantile begrenzt. Als schwarzer Querbalken ist der Median und als blauer Punkt der Mittelwert gekennzeichnet108

Abbildung 7-44: Räumliche Verteilung der gemittelten simulierten Änderungssignale für den 100-jährigen Hochwasserabfluss auf Basis der Verschneidung beider Niederschlags-Abfluss-Modelle109

Abbildung 7-45: Boxplots basierend auf den Medianen aller ausgewählten Modellgebiete für den 100-jährigen Hochwasserabfluss. Die Box wird durch die 25 % und 75 %-Quantile begrenzt. Als schwarzer Querbalken ist der Median und als blauer Punkt der Mittelwert gekennzeichnet.....110

Abbildung 8-2: Änderungssignale verschiedener Hochwasserkennwerte an 143 ausgewählten Pegeln. Die Stichprobe stellt für jeden Pegel den Median der Änderungssignale aller Ensemblemitglieder dar.....114



11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Betrachtete Einzugsgebiete.....	3
Tabelle 2-2: Datenbasis für KliBiW 4.....	4
Tabelle 3-1: Betrachtete Kenngrößen des Niederschlags und der Temperatur bei der Trendanalyse.....	7
Tabelle 3-2: Veränderungen der Temperatur-Kenngrößen als Mittel über alle analysierten Stationen (20) in Niedersachsen für den Zeitraum von 1951-2015, geschätzt nach Theil-Sen.....	8
Tabelle 3-3: Veränderungen der Niederschlags-Kenngrößen als Mittel über alle analysierten Stationen (175) in Niedersachsen für den Zeitraum von 1951 bis 2015, geschätzt nach Theil-Sen.....	10
Tabelle 4-1: Betrachtete Kenngrößen des Abflusses bei der Trendanalyse.....	17
Tabelle 4-2: Kriterien für die Stationswahlen mit niedrigen, mittleren und hohen Anforderungen sowie zur Bestimmung der Referenzpegel für den Vergleich von lokaler und regionaler Hochwasserstatistik	22
Tabelle 4-3: Übersicht der Regionen, deren Stichprobenumfang, die gewählte regionale Verteilungsfunktion (VF) sowie deren Parameter, Homogenität und RRM-SE des 100-jährigen Hochwasserabflusses	28
Tabelle 4-4: Kreuzvalidierungsergebnisse der Regionalisierung des Skalierungsparameters auf Basis der Referenzpegel.....	29
Tabelle 4-5: Koeffizienten der globalen Multiplen Linearen Regression	29
Tabelle 4-6: Güte der Kreuzvalidierung der Regionalisierung der 100-jährigen Hochwasserabflüsse auf Basis der Referenzpegel	32
Tabelle 5-1: Übersicht über die in KliBiW 4 verwendeten Klimamodelldaten	39
Tabelle 5-2: Klimagrößen von WETTREG und Interpolationsverfahren, die für die Umrechnung der Daten auf ein regelmäßiges Raster verwendet wurden (OK: Ordinary Kriging, EDK: External Drift Kriging mit digitalem Höhenmodell als Zusatzinformation)	41
Tabelle 5-3: Auswahl einer tendenziell jeweils nassen, mittleren und trockenen Realisation der beiden WETTREG-Modelle für die Impaktmodellierung im Wasserhaushaltsmodell.....	44
Tabelle 5-4: Betrachtete Klima-Kenngrößen bei der Validierung der Klimamodelldaten.....	47
Tabelle 5-5: Betrachtete Klima-Kenngrößen bei der Bias-Adjustierung der Klimamodelldaten	55
Tabelle 6-1: Ausgewählte Kenngrößen für die Analyse der klimatischen Änderungssignale	63
Tabelle 7-1: Für den Modellaufbau verwendete räumliche Eingangsdaten der Gebietsanteile in Niedersachsen.....	77
Tabelle 7-2: 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). *Flächengröße nach der Umleitung des Bornbachs.....	80
Tabelle 8-1: Prozentuale Änderungen der Hochwasserscheitelwerte in der nahen Zukunft Z2 (Medianwerte der berechneten Änderungssignale).....	115
Tabelle 8-2: Prozentuale Änderungen der Hochwasserscheitelwerte in der fernen Zukunft Z3 (Medianwerte der berechneten Änderungssignale).....	115



12 Glossar und Abkürzungsverzeichnis

20C (=Z1): Referenzperiode: 1971-2000. (20C ist abgeleitet vom englischen Begriff „20th Century“)

ALO: Aller-Leine-Oker

ATKIS: Amtliches Topografisch-Kartographisches Informationssystem (Landnutzungsdaten)

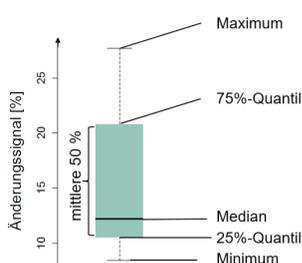
Bias: systematische Abweichung der Klimamodelldaten von der Beobachtung.

Bias-Adjustierung (=Bias-Korrektur): Empirisch-statistisches Verfahren zur Korrektur des systematischen Fehlers von Klimamodelldaten (→ Bias). Die Bias-Adjustierung wird auf einen oder mehrere Ausgabeparameter eines regionalen Klimamodells angewendet, so dass dieses die beobachtete Größe besser wiedergibt.

BMVI: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Bootstrapping: Verfahren zur Generierung von künstlichen Stichproben. Bei der Bootstrap-Variante nach Efron (1979) wird eine Verteilungsfunktion an eine gegebene Stichprobe angepasst. Aus dieser Verteilungsfunktion werden zufällig Elemente gezogen, wobei die Wahrscheinlichkeit durch die Verteilungsfunktion selbst vorgegeben ist und die Anzahl der gezogenen Stichprobenelemente jener der ursprünglichen Stichprobe entspricht. Im Anschluss wird an die generierte Stichprobe ebenfalls eine Verteilungsfunktion angepasst. Zur Erzeugung von n Stichproben bedarf es einer n-fachen Wiederholung. Durch die n angepassten Verteilungsfunktionen ist es möglich, auf die Unsicherheit der Schätzung zu schließen.

Boxplot: Diagramm zur Darstellung der Verteilung der Änderungssignale der einzelnen Modellketten eines Klimamodellensembles. Der Boxplot gibt Auskunft über die Bandbreite der projizierten Änderungssignale. Die untenstehende Abbildung zeigt die verschiedenen, im Boxplot enthaltenen statistischen Kennwerte der Daten. Die Whisker haben häufig eine maximale Länge des 1,5-fachen der Box (= 1,5-facher Interquartilsabstands). Liegen Punkte außerhalb dieses Bereichs, werden sie als „Ausreißer“ bezeichnet und als einzelne Punkte oberhalb bzw. unterhalb der Whisker dargestellt.



CDO (= Climate Data Operators): Programme zur Aufbereitung der rasterbasierten Ergebnisse der Klimamodelle

Coefficient-Of-Determination (COD): entspricht der weit bekannten → Modelleffizienz nach Nash & Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970)

D90: Mittlere Dauer der Ereignisse mit einem Tageswert größer als das 90 %-Quantil der Jahresmaxima (d)

DGM: Digitales Geländemodell

Diskordanz: Maß für die Ähnlichkeit hinsichtlich der Hochwassercharakteristik eines Pegels mit einer Region. Als diskordant eingestufte Pegel unterscheiden sich dabei stark von der Region. Je nach Größe der Region wird ein kritischer Wert vorgegeben, ab welchem ein Pegel als diskordant eingestuft wird. Eine detaillierte Beschreibung kann Hosking & Wallis (1997) oder TLUG (2014) entnommen werden.

DKRZ: Deutsches Klimarechenzentrum

Downscaling: Prozess der räumlichen Verfeinerung der Ergebnisse grobskaliger globaler Klimamodelle mittels regionaler Klimamodelle (dynamisches Downscaling) oder statistischer Verfahren (statistisches Downscaling).

DWD: Deutscher Wetterdienst

EG-HWRM-RL: Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (kurz: Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie)

(Klimamodell-)Ensemble: Die Abschätzung zukünftiger klimatischer Entwicklungen basiert auf Modellrechnungen. Diese sind bestimmten Unsicherheiten unterworfen, da jedes Modell nur ein vereinfachtes Abbild der Realität darstellt. Verschiedene Modelle kommen mit gleichen Startbedingungen zu mehr oder weniger unterschiedlichen Ergebnissen. Um diese Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen zu verdeutlichen, wird ein Szenario, welches eine Entwicklung der atmosphärischen Treibhausgase beschreibt (z. B. SRES A1B oder RCP8.5), mit mehreren → Klimamodellketten gerechnet. In diesem Bericht umfasst ein Ensemble alle Klimaprojektionen, welche auf einem der beiden → THG-Szenarien basieren.

EZG: Einzugsgebiet

GERICS: Climate Service Center Germany

GLD: Gewässerkundlicher Landesdienst



glo: Globalstrahlung in W/m^2

Gütekriterien: Als Gütekriterien werden der Coefficient-Of-Determination (COD), der Mean Relative Error (MRE) und der Relative Root Mean Squared Error (RRMSE) gewählt. Der COD entspricht der weit bekannten Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970). Die Optima liegen bei 1 für den COD und bei 0 für MRE und RRMSE. Die Gleichungen können den Formel 4-1 bis Formel 4-3 entnommen werden.

Hochwasserquantile: Auf Basis von extrahierten Abflussscheitelwerten kann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung angepasst werden. Mittels dieser können für gegebene Jährlichkeiten die Hochwasserabflüsse geschätzt werden. Diese werden als Hochwasserquantile bezeichnet. Eine weitere Beschreibung kann DWA (2012) entnommen werden.

HQa: Jahreshochwasser

HQx: aus Abflusszeitreihen durch Anpassung von Extremwert-Verteilungsfunktionen ermittelter Wert für ein Hochwasserereignis mit x-jährigem Wiederkehrintervall

hum: relative Luftfeuchte (%)

Impakt- / Wirkmodell: Modelle, welche die Ausgabedaten der Klimamodelle als Eingangsdaten verwenden und die Auswirkungen des Klimas auf verschiedene Bereiche aus Umwelt, Technik, Wirtschaft etc. untersuchen.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (deutsch: Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)

Klimamodell: Ein Computermodell, das klimatische Prozesse und deren Wechselwirkungen im Bereich der Atmosphäre, der Landflächen und der Ozeane auf Basis bestimmter Randbedingungen (Treibhausgase, Sonnenaktivität) simuliert

Klimaprojektion: Siehe → (Klima)Modelllauf

korrigierter Niederschlag: → Richter-Korrektur

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.

LUH: Leibniz Universität Hannover

LWI: Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Techni-

schen Universität Braunschweig

meso-skaliges Einzugsgebiet: Gebiet mit einer Größe zwischen 1 ha und 1000 km^2 , wobei der Schwerpunkt zwischen 1 und mehreren 100 km^2 liegt (Dyck & Peschke, 1995)

MHQ: Mittelwert aus den Jahreshöchstwerten des Abflusses in einer bestimmten Zeitspanne (m^3/s)

MHq: mittlere Jahreshochwasserspende ($m^3/(s \cdot km^2)$)

Modelleffizienz nach Nash & Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1979): Ein in der Hydrologie häufig verwendetes Gütemaß für die Übereinstimmung von Modellergebnis und Beobachtung. 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.

(Klima-)Modellkette: Um von angenommenen Klimaszenarien (THG-Entwicklungen) auf mögliche Klimafolgen zu kommen, werden Computermodelle zur Berechnung der Prozesse des Klimasystems benutzt. Globale Klimamodelle simulieren die Prozesse und Wechselwirkungen auf globaler Ebene in relativ grober räumlicher Auflösung. Um Aussagen auf regionaler Ebene zu erhalten und z. B. topographische Effekte besser zu berücksichtigen, werden diese Ergebnisse mittels regionaler Klimamodelle für einen Ausschnitt der Erdoberfläche mit einer höheren räumlichen Auflösung heruntergerechnet (downscaling). Das hintereinander Schalten von Modellen, um die Ergebnisse des einen Modells als Eingangsdaten für das nächste zu benutzen (Globalmodell → Regionalmodell → Impaktmodell), wird als (Klima-)Modellkette bezeichnet.

(Klima-)Modelllauf: Simulationsergebnis eines Klimamodells auf Basis eines → Szenarios der THG-Entwicklung. Siehe → (Klima-)Modellkette

MQ: Mittlerer Abfluss in einer bestimmten Zeitspanne (m^3/s)

NLWKN: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

pcp: korrigierte Niederschlagshöhe (mm)

pcu: unkorrigierte Niederschlagshöhe (mm)

PnI90: Anzahl der (Tages-)Ereignisse mit $N > \text{Langzeit-90 \% -Quantil}$ (d)

POT90: Anzahl der Tage mit einem Abflusswert größer als das 90 %-Quantil der Jahresmaxima



Pq90: 90 %-Quantil der Tagesniederschläge (für Tage mit $N \geq 1$ mm/d) (mm/d)

Psum: Summe der Niederschläge für Tage mit $N \geq 1$ mm/d (mm)

Pxcd: Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Tage mit $N < 1$ mm/d) (d)

Px3d: Größte 3-Tages-Niederschlagssumme (mm/d)

Random Forest: Methode zur Klassifizierung von Datenkollektiven. Ein Random Forest besteht aus einer Vielzahl an Entscheidungsbäumen. Ein einzelner Entscheidungsbaum gruppiert das Datenkollektiv aufgrund von nacheinander geschalteten Entscheidungsfragen. Die Reihenfolge der Entscheidungsfragen ist dabei entscheidend und wird entsprechend eines Entropiekriteriums bestimmt. Entscheidungsfragen, welche einen möglichst großen Anteil der Entropie erklären können und somit einen großen Informationsgewinn darstellen, werden zuerst gestellt. Um der Unsicherheit der Stichprobe gerecht zu werden, werden mittels Bootstrapping künstliche Stichproben generiert. Jeder Entscheidungsbaum wird anhand einer eigenen, individuellen, künstlichen Stichprobe trainiert. Um eine noch größere Variabilität der Entscheidungsbäume zu gewährleisten, wird die erste Entscheidungsfrage nur für eine zufällige Auswahl der möglichen Variablen gestellt. Eine Anwendung des Random Forest ist, dass die Einflussstärke der einzelnen Variablen auf die gegebene Zielgröße in eine Rangfolge gebracht werden können. Eine weitere Beschreibung kann Breiman (2001) entnommen werden.

Richter-Korrektur: Verfahren zur Korrektur des systematischen Messfehlers von beobachteten Niederschlagswerten. Aufgrund von Benetzungs- und Verdunstungsverlusten sowie des Windfehlers sind die gemessenen Stationsdaten zu niedrig (Richter, 1995).

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).

sun: Sonnenscheindauer (h)

Szenario der THG-Entwicklung/ THG-Szenario: Die Entwicklung von Treibhausgasemissionen bzw. -konzentrationen auf Basis von Annahmen bzgl. der möglichen zukünftigen Entwicklung anthropogener Wirkfaktoren wie z. B. Bevölkerungszahl, Landnutzung, Energieträger, Technologien, politische Konflikte usw.

In diesem Bericht finden zwei verschiedene THG-Szenarien Anwendung: das gemäßigte Emissionsszenario SRES A1B und das RCP-Szenario RCP8.5, welches eine „weiter-wie-bisher“-Entwicklung annimmt.

Tav: Tagesmitteltemperatur ($^{\circ}C$)

THG: Treibhausgas

tma: Temperaturmaximum ($^{\circ}C$)

Tmav: Mittelwert der Tagesmittel-Temperaturen ($^{\circ}C$)

tmi: Temperaturminimum ($^{\circ}C$)

Tnq10: 10 %-Quantil der Tagesminimum-Temperaturen ($^{\circ}C$)

TUBS: Technische Universität Braunschweig

Txq90: 90 %-Quantil der Tagesmaximum-Temperaturen ($^{\circ}C$)

UNEP: United Nations Environment Programme (deutsch: Umweltprogramm der Vereinten Nationen)

unkorrigierter Niederschlag: → Richter-Korrektur

WAWI: Institut für Wasserwirtschaft der Leibniz Universität Hannover

win: Windgeschwindigkeit (m/s)

WMO: World Meteorological Organization (deutsch: Weltorganisation für Meteorologie)

Z2: Zeitraum der nahen Zukunft (2021-2050)

Z3: Zeitraum der fernen Zukunft (2071-2100)



13 Anhang

Anhang 1: Ausgewählte Gebietscharakteristiken für die Hochwasserregionalisierung und die Regionalisierung der Änderungsfaktoren der Hochwasserquantile

Anhang 2: Projizierte Änderung des Maximalen 3-Tages-Niederschlags (Px3d) in der fernen Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum (1971-2000) für die Ensembles SRES A1B (linke Spalte) sowie RCP8.5 (rechte Spalte), getrennt nach Jahreszeit. Die Boxplots zeigen die Änderungssignale für die betrachteten Einzugsgebiete

Anhang 3: Projizierte Änderung der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Pxcdd) in der fernen Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum (1971-2000) für die Ensembles SRES A1B (linke Spalte) sowie RCP8.5 (rechte Spalte), getrennt nach Jahreszeit. Die Boxplots zeigen die Änderungssignale für die betrachteten Einzugsgebiete

Anhang 4: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwertes des Abflusses (MQ) für die einzelnen Modellketten des SRES A1B- und des RCP8.5-Ensembles sowie die Ensemble-Mediane für den Zeitraum 1971-2100 (Mittelwert 1971-2000 entspricht 100 %) für die Gebietsauslasspegel Bienenbüttel, Hellwege, Heide OP, Huntlosen, Hase und Emlichheim. Die transparenten Flächen geben die Spannweite des jeweiligen Ensembles an

Anhang 5: Änderungssignale für mittlere Quartalsabflüsse für die Gebietsauslasspegel Bienenbüttel, Hellwege, Heide OP, Huntlosen, Hase und Emlichheim für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000

Anhang 6: Median der langjährigen Monatsmittelwerte für die Gebietsauslasspegel Bienenbüttel, Hellwege, Heide OP, Huntlosen, Hase und Emlichheim für das A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts)

Anhang 7: Änderungssignale für die gemittelten Jahreshöchstwerte des Abflusses (MHQ) für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) mit dem jeweiligen Ensemble-Median für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 für Gebietsauslasspegel Bienenbüttel, Hellwege, Heide OP, Huntlosen, Hase und Emlichheim. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5

Anhang 8: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwertes aus den Jahreshöchstwerten des Abflusses (MHQ) für die einzelnen Modellketten des SRES A1B-

und des RCP8.5-Ensembles sowie die Ensemble-Mediane für den Zeitraum 1971-2100 (Mittelwert 1971-2000 entspricht 100 %) für die Gebietsauslasspegel Bienenbüttel, Hellwege, Heide OP, Huntlosen, Hase und Emlichheim. Die transparenten Flächen geben die Spannweite des jeweiligen Ensembles an

Anhang 9: Änderungssignale für HQ₅ für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) mit dem jeweiligen Ensemble-Median für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 für alle Gebietsauslasspegel. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5

Anhang 10: Änderungssignale für HQ₁₀₀ für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) mit dem jeweiligen Ensemble-Median für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 für alle Gebietsauslasspegel. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5

Anhang 11: Median der Änderungssignale aller Referenzpegel für MHQ für die 6 Modellketten des SRES A1B-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

Anhang 12: Median der Änderungssignale aller Referenzpegel für MHQ für die 8 Modellketten 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

Anhang 13: Median der Änderungssignale aller Referenzpegel für HQ₂₀ für die 6 Modellketten des SRES A1B-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

Anhang 14: Median der Änderungssignale aller Referenzpegel für HQ₂₀ für die 8 Modellketten 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



Anhang 1: Ausgewählte Gebietscharakteristiken für die Hochwasserregionalisierung und die Regionalisierung der Änderungsfaktoren der Hochwasserquantile

Typ	Gebietscharakteristik	HQ-Regio	ΔHQ-Regio	
			SRES A1B	RCP8.5
Topo. aus DGM10 resampled DGM100	Einzugsgebietsfläche			
	X-Lagekoordinaten Pegel			
	Y-Lagekoordinaten Pegel			
	X-Lagekoordinaten Gebietsschwerpunkt			
	Y-Lagekoordinaten Gebietsschwerpunkt			
	Umfang			
	Höhe, Mittelwert			
	Höhe, Minimum			
	Höhe, Maximum			
	Höhe, Standardabweichung			
	Hangneigung, Mittelwert			
	Hangneigung, Standardabweichung			
	Hangausrichtung, Mittelwert, Nord = 1, Süd = 0			
	Hangausrichtung, Standardabweichung, Nord = 1, Süd = 0			
	Gewässernetzlänge basierend auf Tiefenlinien des Höhenmodells mit einem Einzugsgebiet größer als 10 km ²			
	Längster Fließweg			
	Verhältnis Längster Fließweg zu Fläche			
	Kreisförmigkeitsverhältnis			
Streckungsverhältnis				
Umfangsentwicklung				
Gewässernetzdichte basierend auf Tiefenlinien des Höhenmodells mit einem Einzugsgebiet größer als 10 km ²				
Landnutzung aus CLC2006	Rel. Flächenanteil von Siedlungsflächen			
	Rel. Flächenanteil von landwirtschaftlichen Flächen			
	Rel. Flächenanteil von forstwirtschaftlichen Flächen			
	Rel. Flächenanteil von Feuchtgebieten			
	Rel. Flächenanteil von Wasserkörpern			
Boden aus BÜK1000	Effektive Wurzelzone			
	Nutzbare Feldkapazität in der effektiven Wurzelzone			
	Feldkapazität in der effektiven Wurzelzone			
	Luftkapazität in der effektiven Wurzelzone			
	Gesamtporenvolumen in der effektiven Wurzelzone			
	Mittlerer Grundwasserabstand			
	Tonanteil			
	Schluffanteil			
	Sandanteil			
	Humusgehalt			

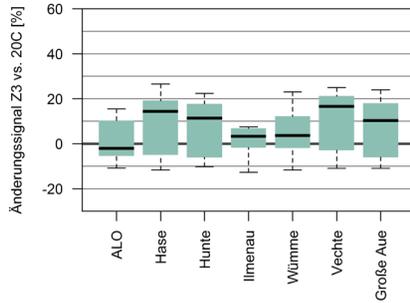


	Sandanteil			
	Humusgehalt			
	Gesamtkohlenstoffgehalt			
	Gesamtstickstoffgehalt			
	Karbonatgehalt			
	pH-Wert			
	Trockenrohdichte			
	Lagerungsdichte			
	Nutzbare Feldkapazität			
	Luftkapazität			
	Feldkapazität			
	Gesamtporenvolumen			
Klima aus Interp. Beob. Tageswerte 1950-2013	Gebietsmittel der Globalstrahlung basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Gebietsmittel der relativen Luftfeuchte basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Gebietsmittel der korrigierten Niederschlagshöhe basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Gebietsmittel der unkorrigierten Niederschlagshöhe basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Gebietsmittel der Sonnenscheindauer basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Gebietsmittel der Tagesmitteltemperatur basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Gebietsmittel der Tagesmaximumtemperatur basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Gebietsmittel der Tagesminimumtemperatur basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Gebietsmittel der Windgeschwindigkeit basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Maximale Niederschlagssumme über 1 Tag der Gebietsmittel der korrigierten Niederschlagshöhe basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Maximale Niederschlagssumme über 2 Tage der Gebietsmittel der korrigierten Niederschlagshöhe basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Maximale Niederschlagssumme über 3 Tage der Gebietsmittel der korrigierten Niederschlagshöhe basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Maximale Niederschlagssumme über 7 Tage der Gebietsmittel der korrigierten Niederschlagshöhe basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Maximale Niederschlagssumme über 14 Tage der Gebietsmittel der korrigierten Niederschlagshöhe basierend auf Tageswerten von 1950-2013			
	Maximale Niederschlagssumme über 31 Tage der Gebietsmittel der korrigierten Niederschlagshöhe basierend auf Tageswerten von 1950-2013			

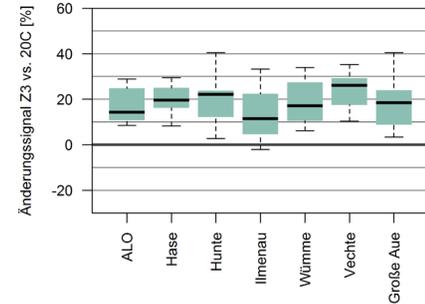


Anhang 2: Projizierte Änderung des Maximalen 3-Tages-Niederschlags (Px3d) in der fernen Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum (1971-2000) für die Ensembles SRES A1B (linke Spalte) sowie RCP8.5 (rechte Spalte), getrennt nach Jahreszeit. Die Boxplots zeigen die Änderungssignale für die betrachteten Einzugsgebiete.

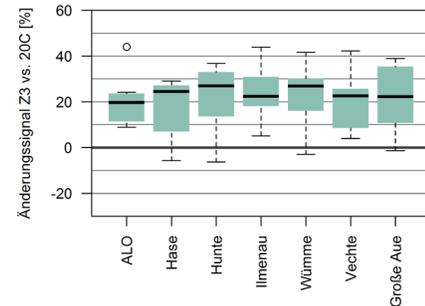
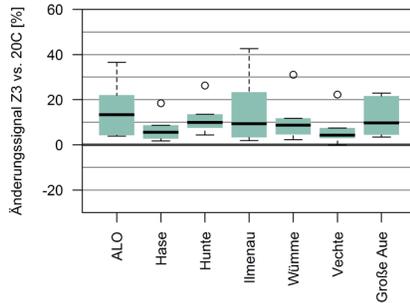
SRES A1B
Gesamtjahr



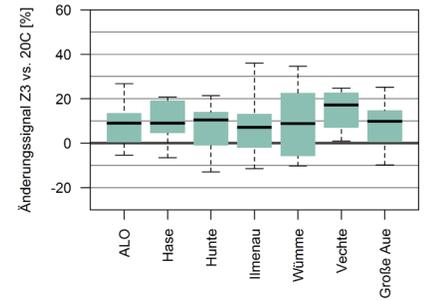
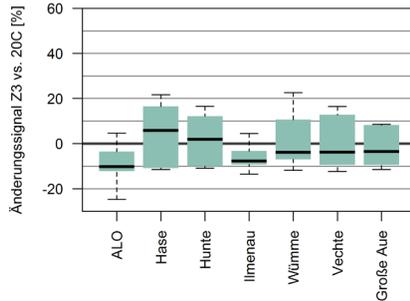
RCP8.5



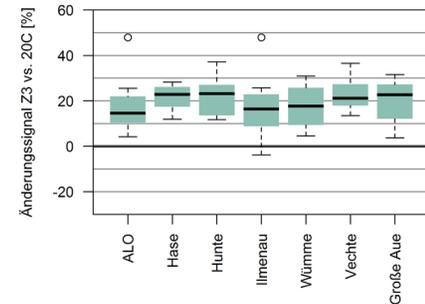
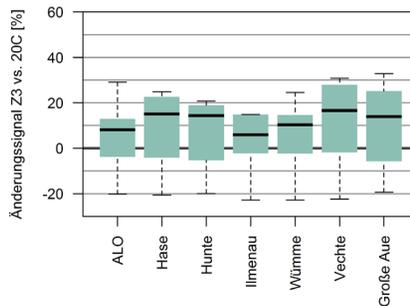
Frühling



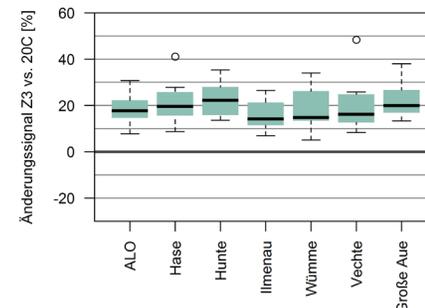
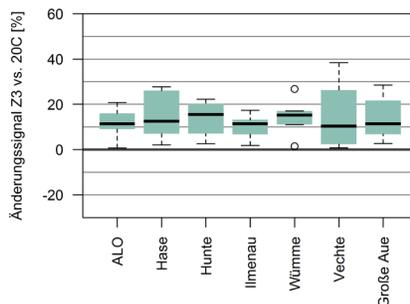
Sommer



Herbst



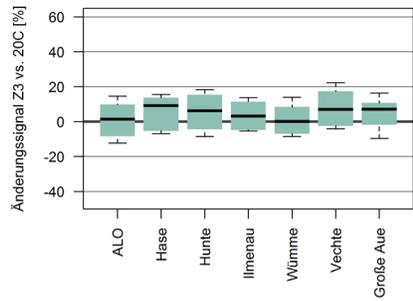
Winter



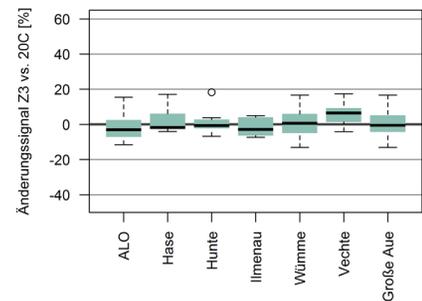


Anhang 3: Projizierte Änderung der maximalen Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Pxcdd) in der fernen Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrollzeitraum (1971-2000) für die Ensembles SRES A1B (linke Spalte) sowie RCP8.5 (rechte Spalte), getrennt nach Jahreszeit. Die Boxplots zeigen die Änderungssignale für die betrachteten Einzugsgebiete.

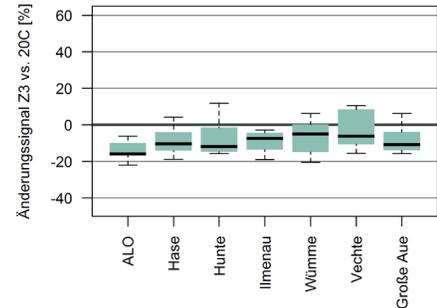
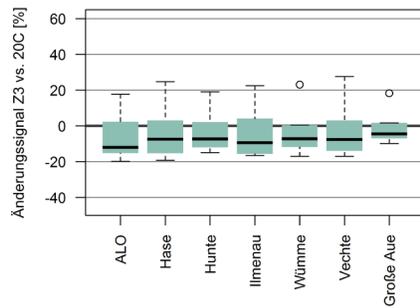
SRES A1B
Gesamtjahr



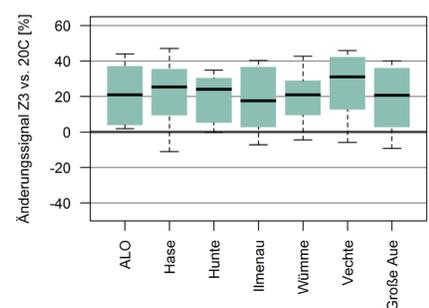
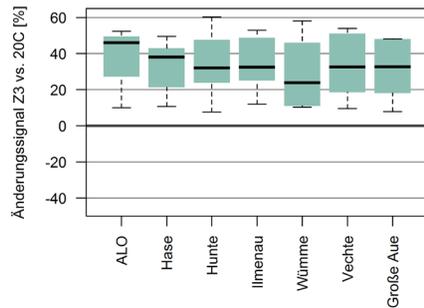
RCP8.5



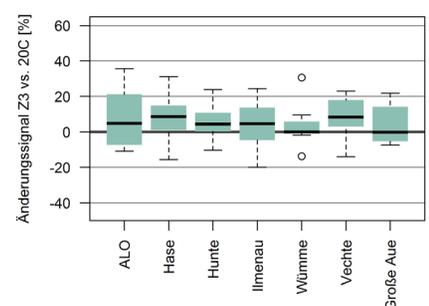
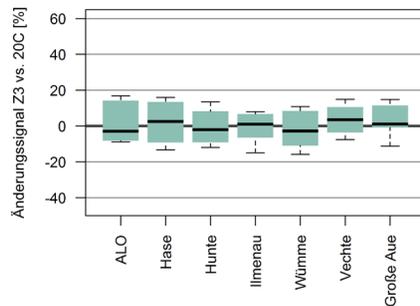
Frühling



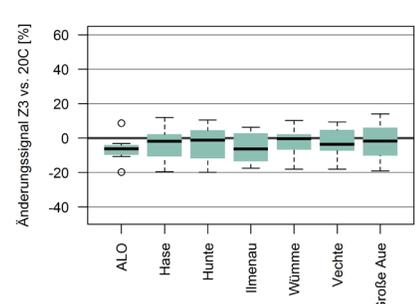
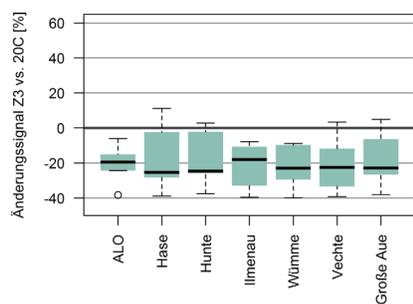
Sommer



Herbst



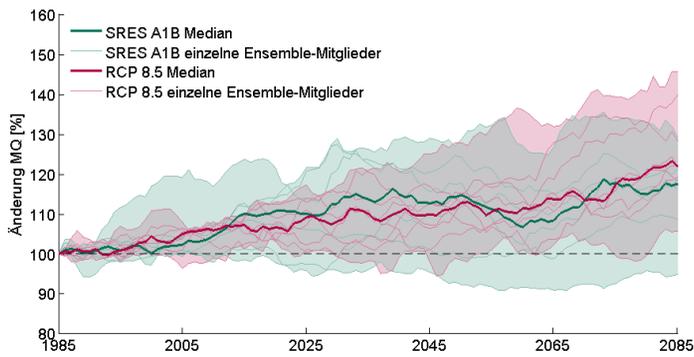
Winter



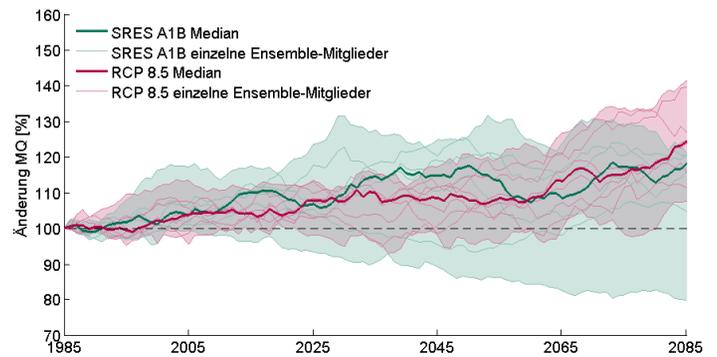


Anhang 4: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwertes des Abflusses (MQ) für die einzelnen Modellketten des SRES A1B- und des RCP8.5-Ensembles sowie die Ensemble-Mediane für den Zeitraum 1971-2100 (Mittelwert 1971-2000 entspricht 100 %) für die Gebietsauslasspegel Bienenbüttel, Hellwege, Heide OP, Huntlosen, Haselünne und Emlichheim. Die transparenten Flächen geben die Spannweite des jeweiligen Ensembles an.

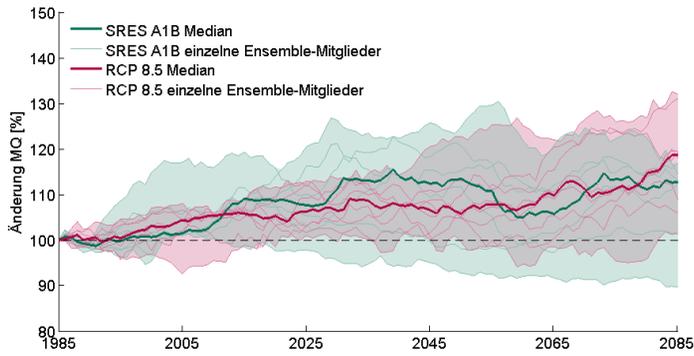
Bienenbüttel



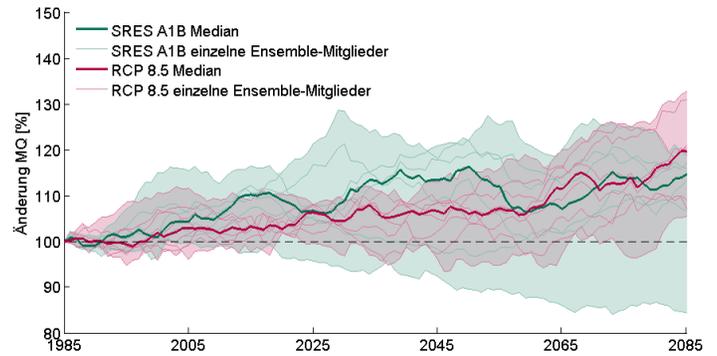
Huntlosen



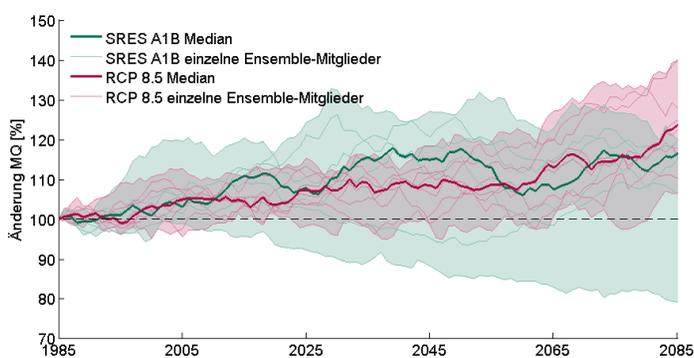
Hellwege



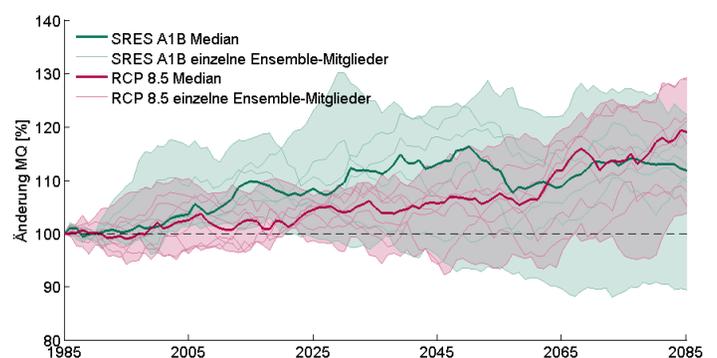
Haselünne



Heide OP



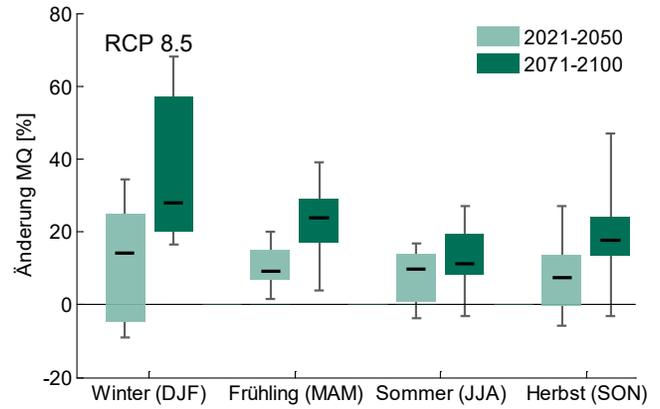
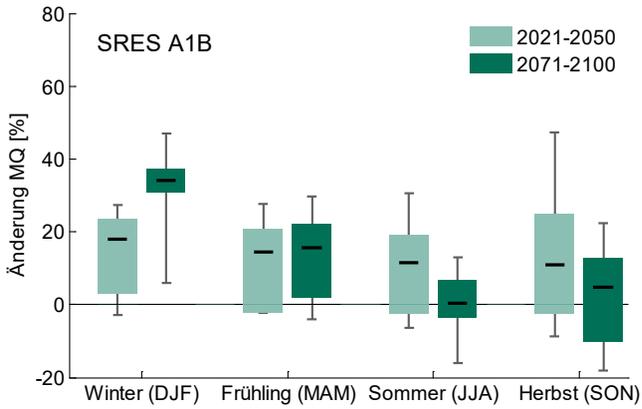
Emlichheim



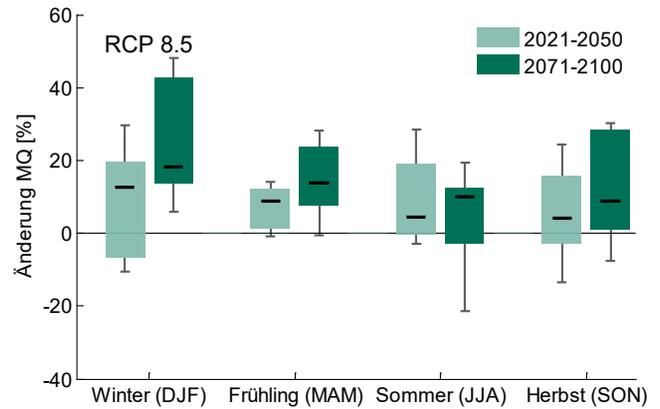
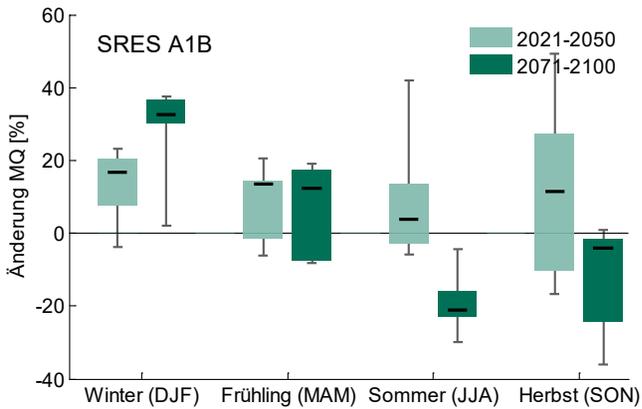


Anhang 5: Änderungssignale für mittlere Quartalsabflüsse für die Gebietsauslasspegel Bienenbüttel, Hellwege, Heide OP, Huntlosen, Haselünne und Emlichheim für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000.

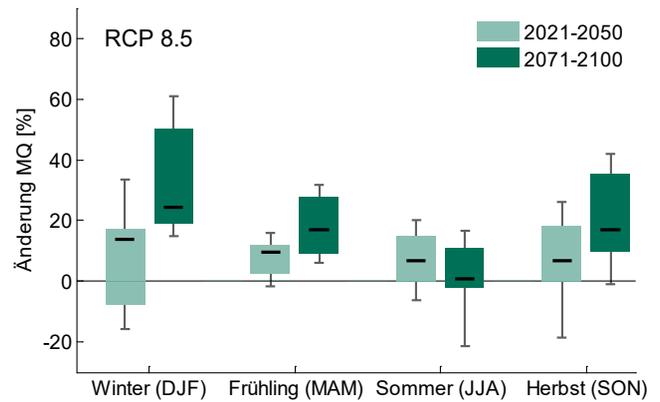
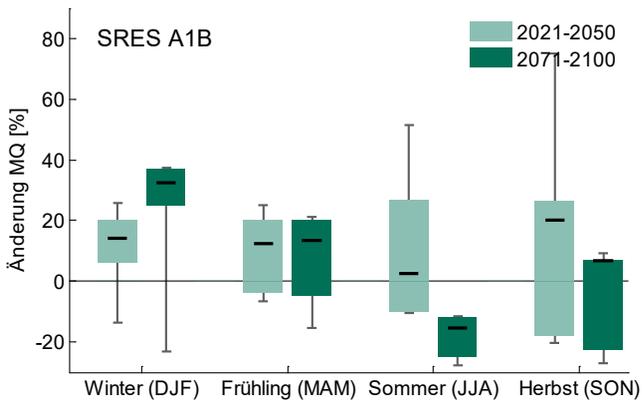
Bienenbüttel



Hellwege

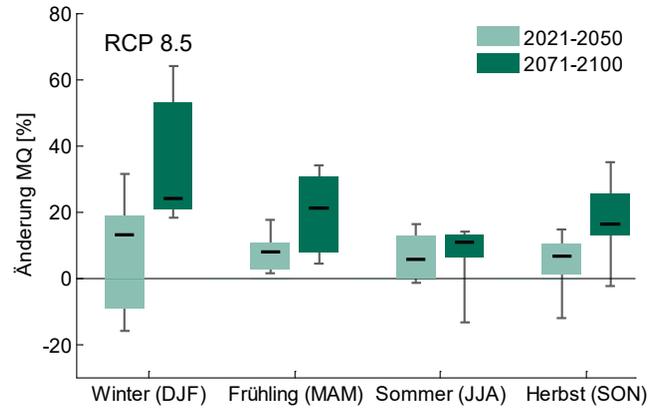
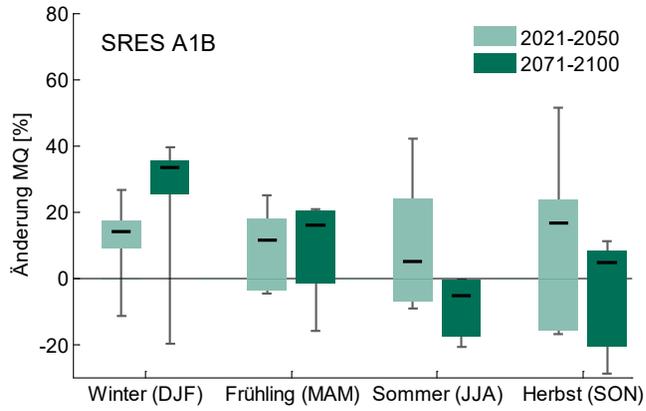


Heide OP

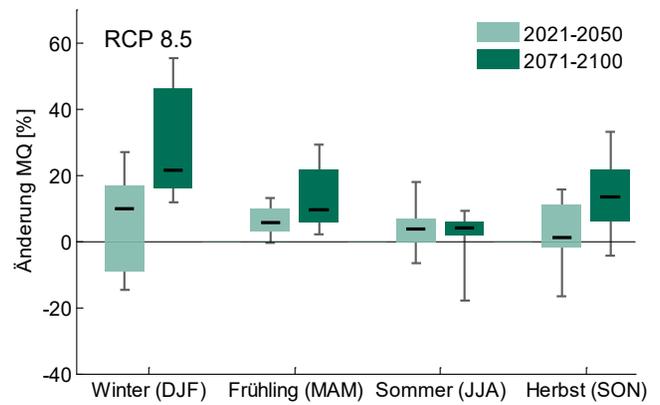
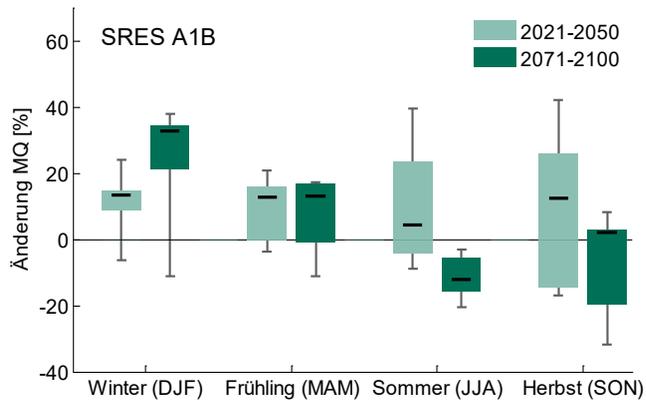




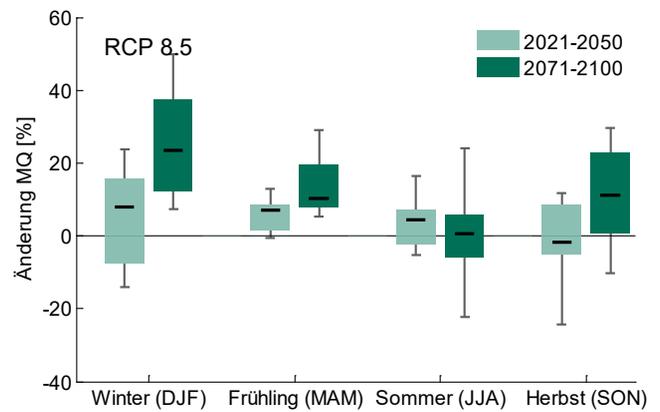
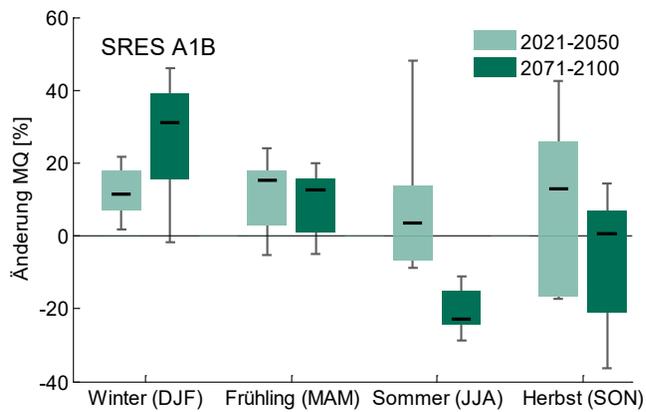
Huntlosen



Haselünne



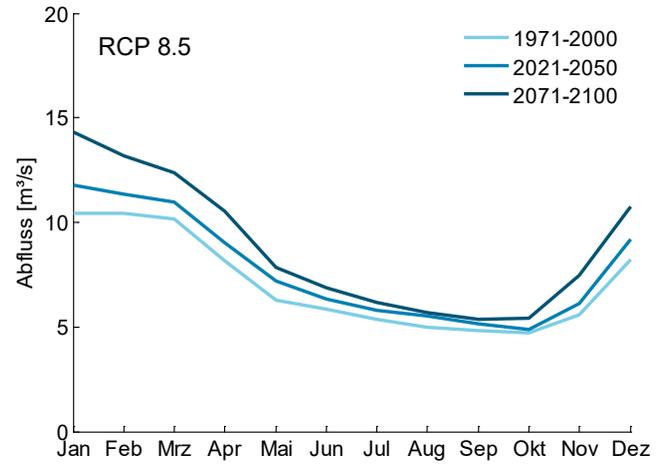
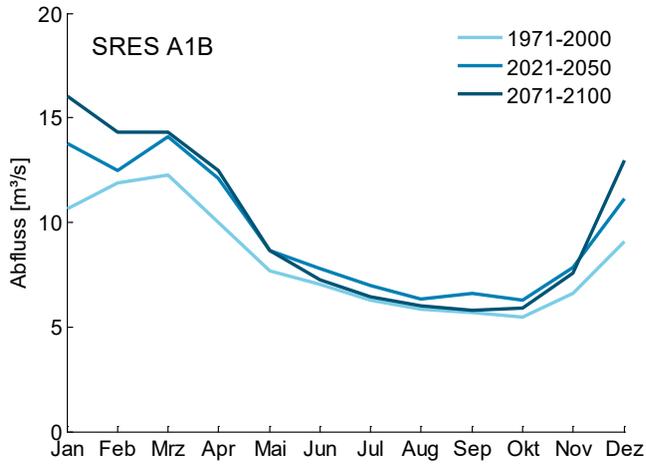
Emlichheim



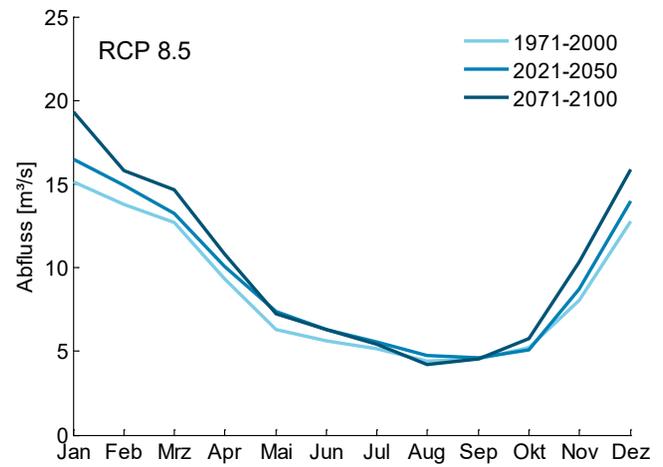
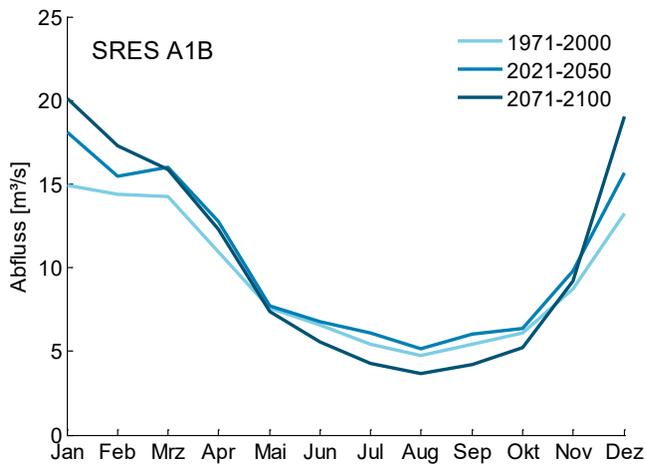


Anhang 6: Median der langjährigen Monatsmittelwerte für die Gebietsauslasspegel Bienenbüttel, Hellwege, Heide OP, Huntlosen, Haselünne und Emlicheim für das A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts).

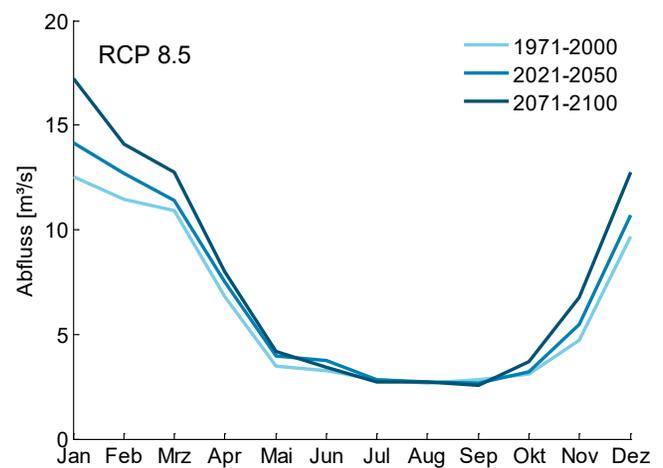
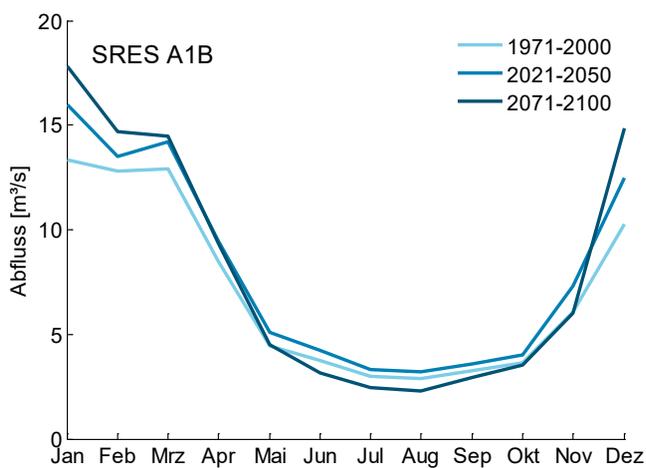
Bienenbüttel



Hellwege

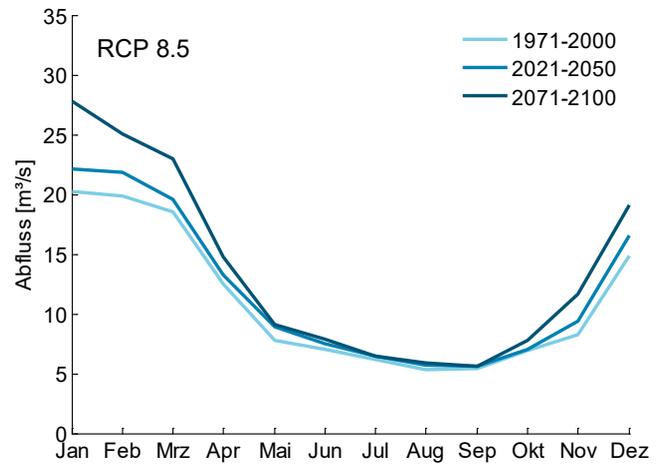
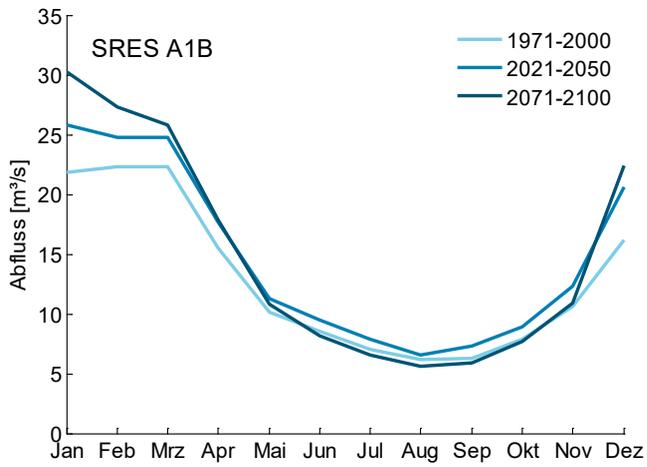


Heide OP

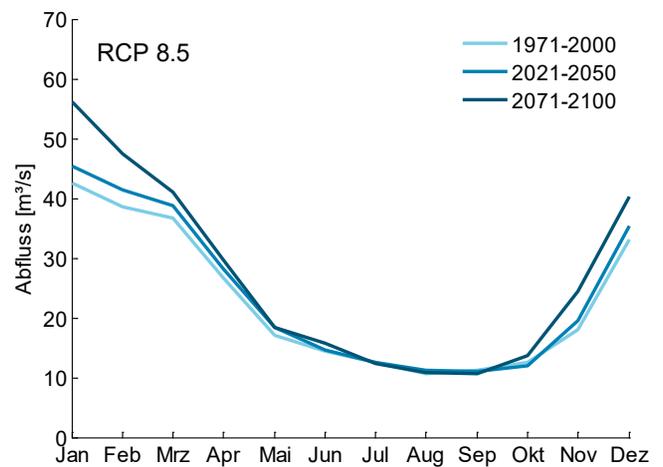
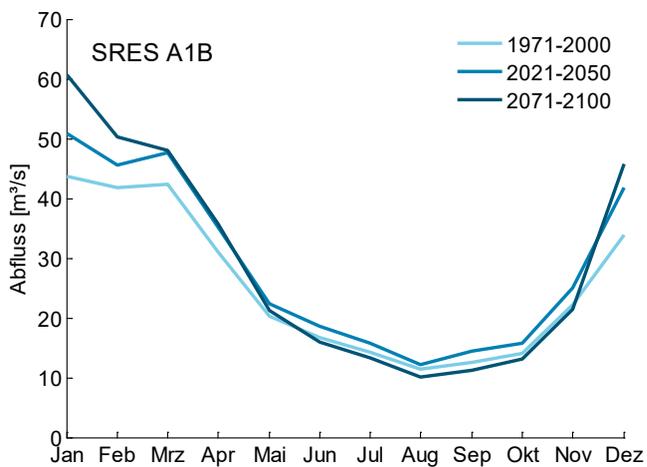




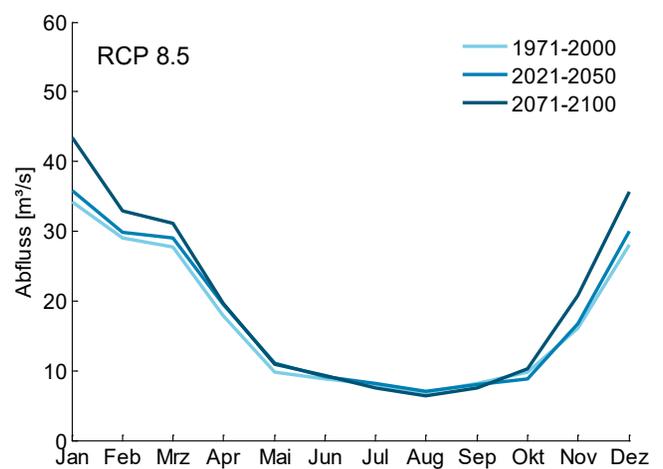
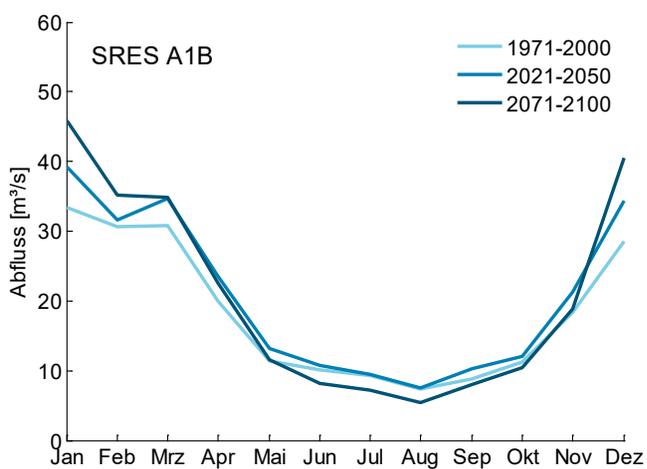
Huntlosen



Haselünne



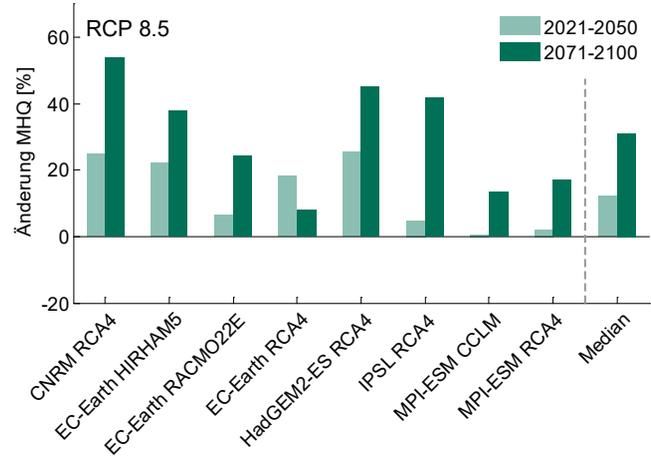
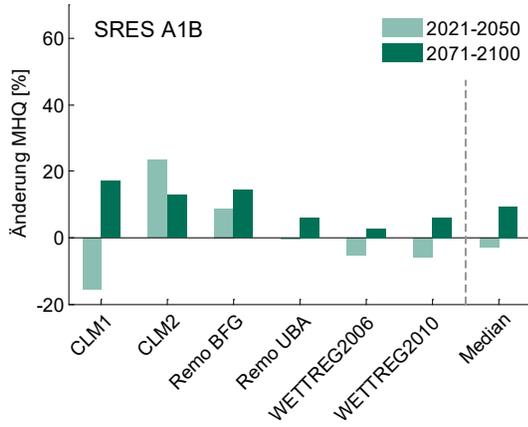
Emlichheim



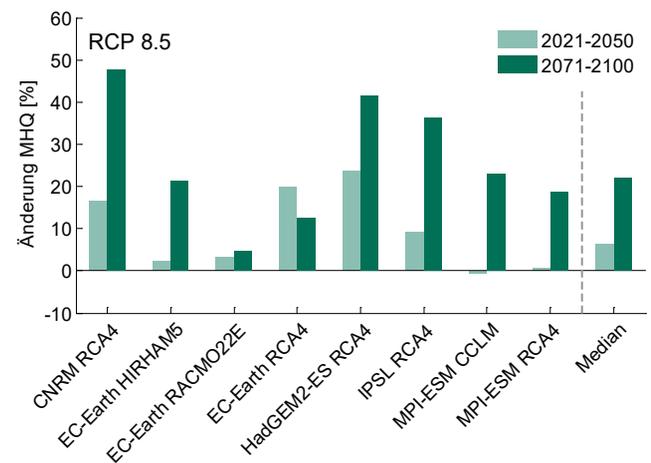
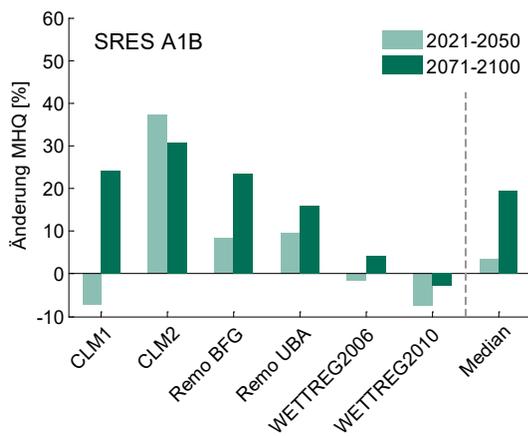


Anhang 7: Änderungssignale für die gemittelten Jahreshöchstwerte des Abflusses (MHQ) für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) mit dem jeweiligen Ensemble-Median für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 für Gebietsauslasspegel Bienenbüttel, Hellwege, Heide OP, Huntlosen, Haselünne und Emlichheim. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5.

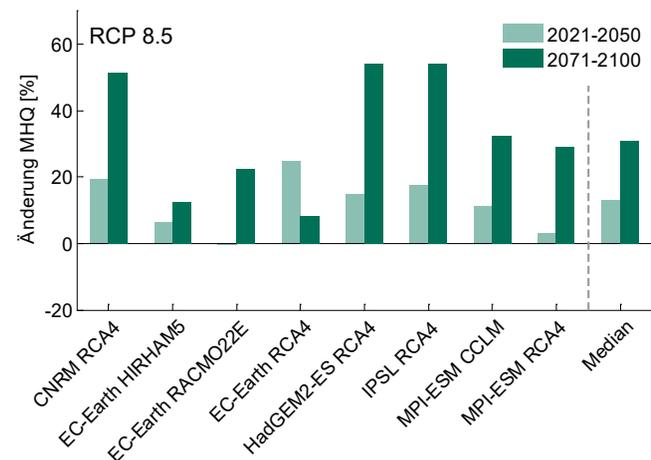
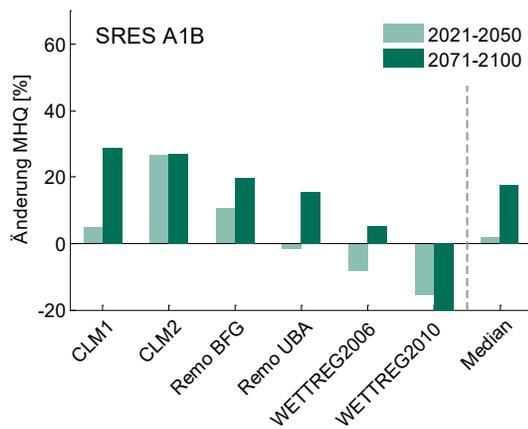
Bienenbüttel



Hellwege

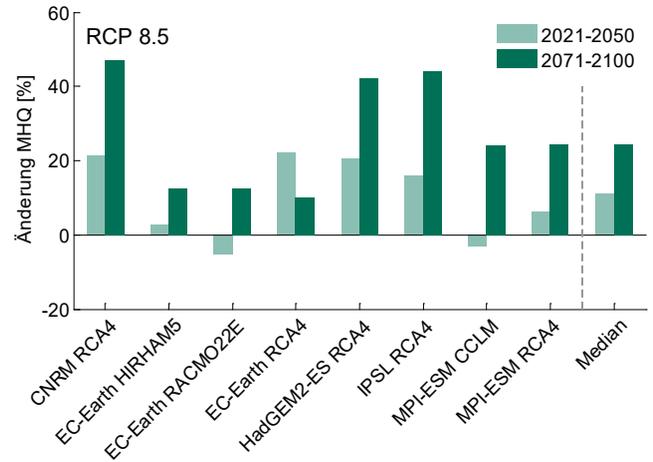
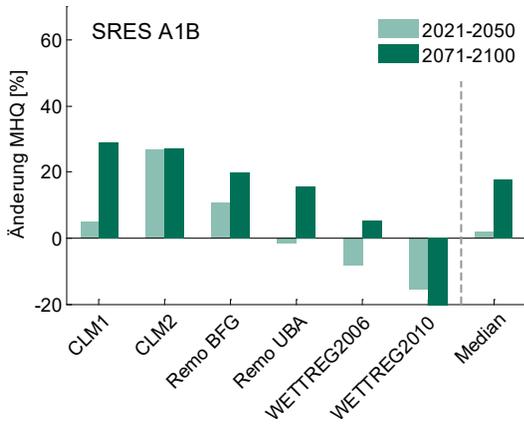


Heide OP

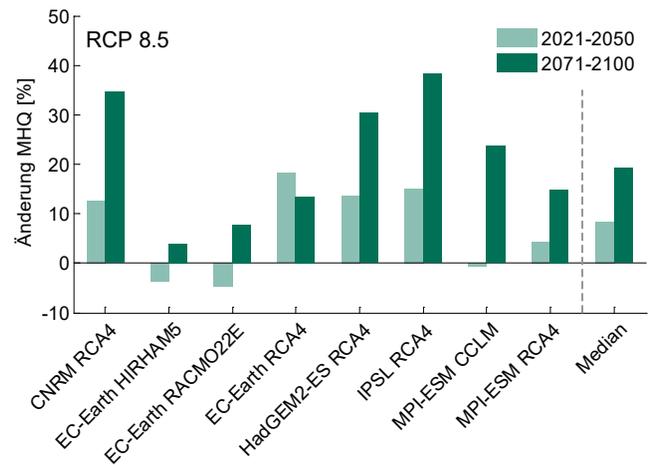
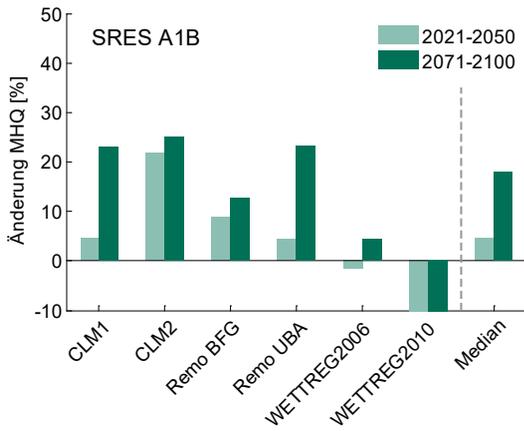




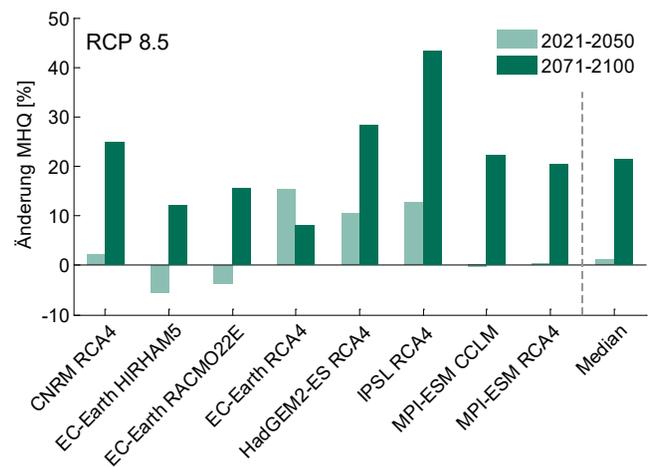
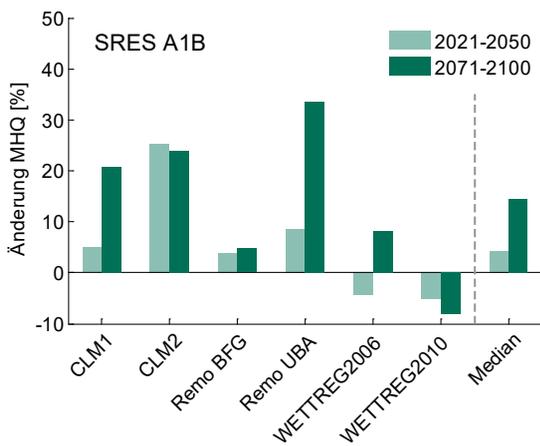
Huntlosen



Haselünne



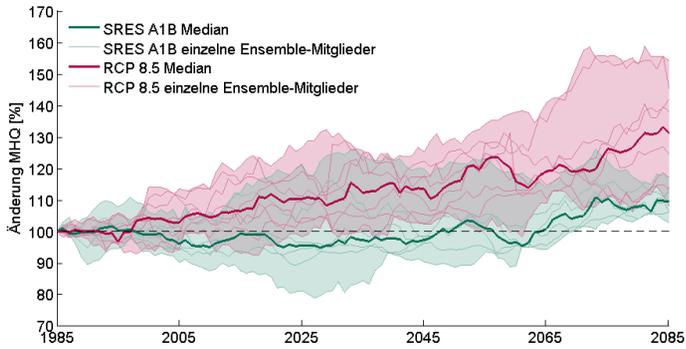
Emlichheim



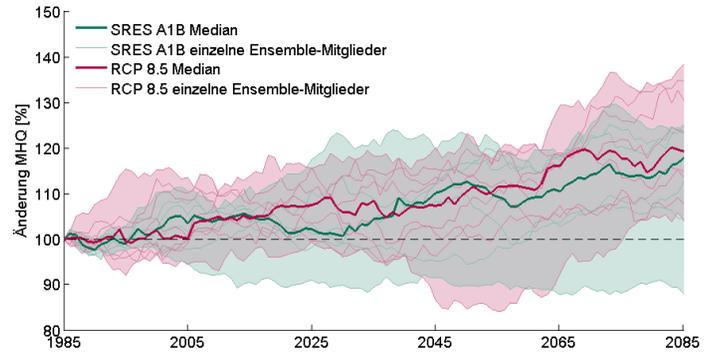


Anhang 8: Entwicklung des gleitenden 30-jährigen Mittelwertes aus den Jahreshöchstwerten des Abflusses (MHQ) für die einzelnen Modellketten des SRES A1B- und des RCP8.5-Ensembles sowie die Ensemble-Mediane für den Zeitraum 1971-2100 (Mittelwert 1971-2000 entspricht 100%) für die Gebietsauslasspegel Bienenbüttel, Hellwege, Heide OP, Huntlosen, Haselünne und Emlichheim. Die transparenten Flächen geben die Spannweite des jeweiligen Ensembles an.

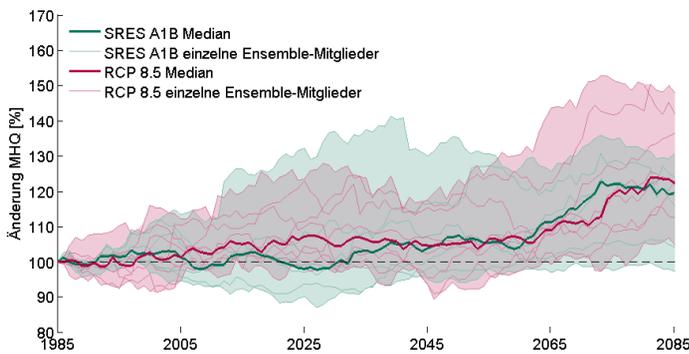
Bienenbüttel



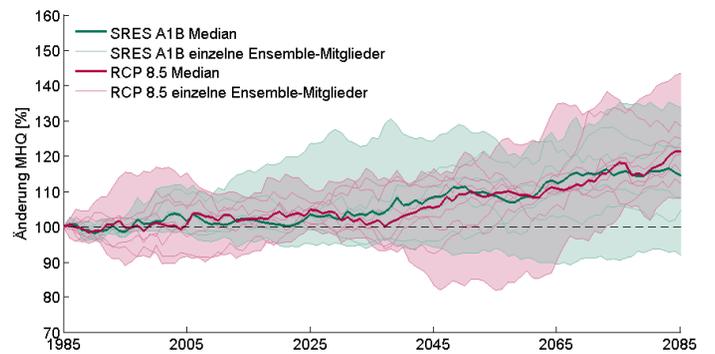
Haselünne



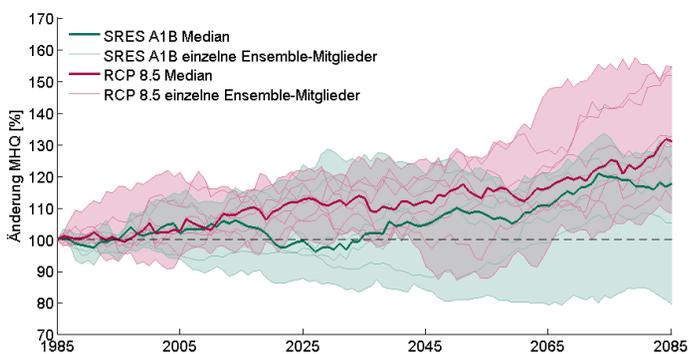
Hellwege



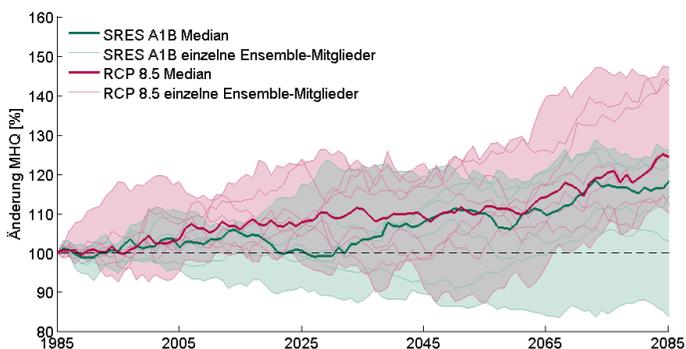
Emlichheim



Heide OP



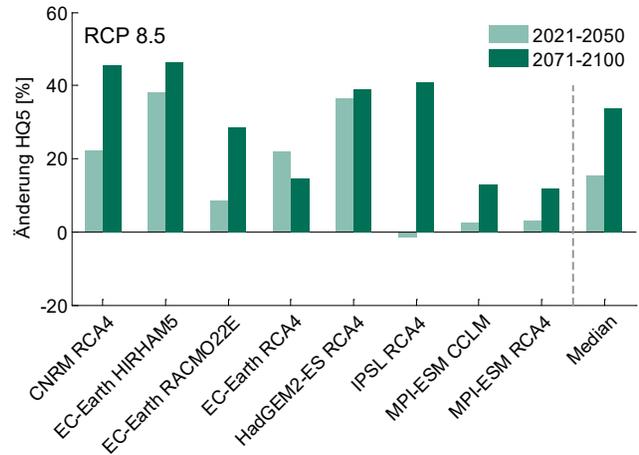
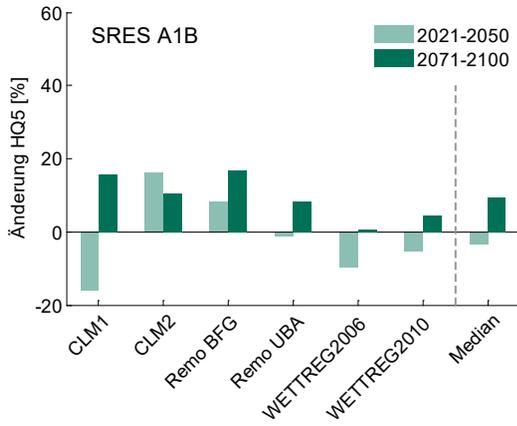
Huntlosen



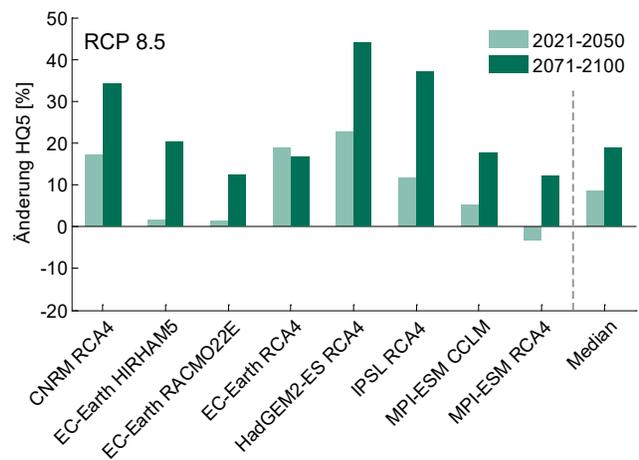
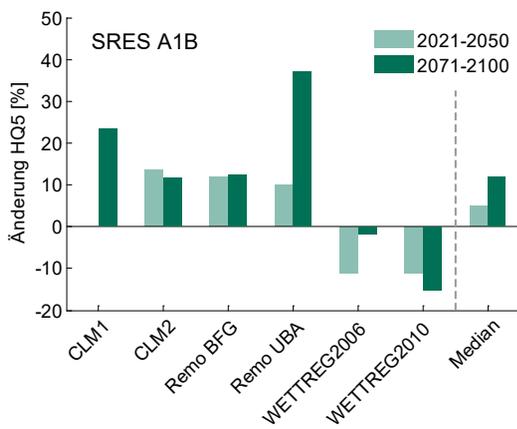


Anhang 9: Änderungssignale für HQ5 für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) mit dem jeweiligen Ensemble-Median für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 für alle Gebietsauslasspegel. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5.

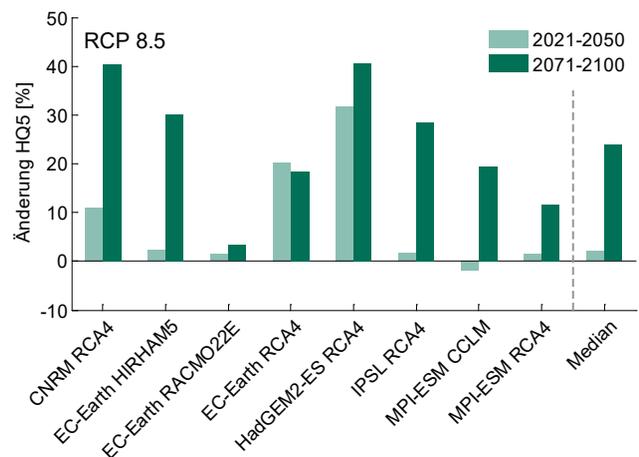
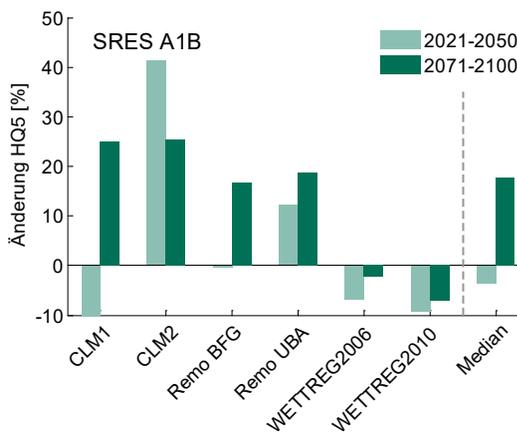
Bienenbüttel



Rethem

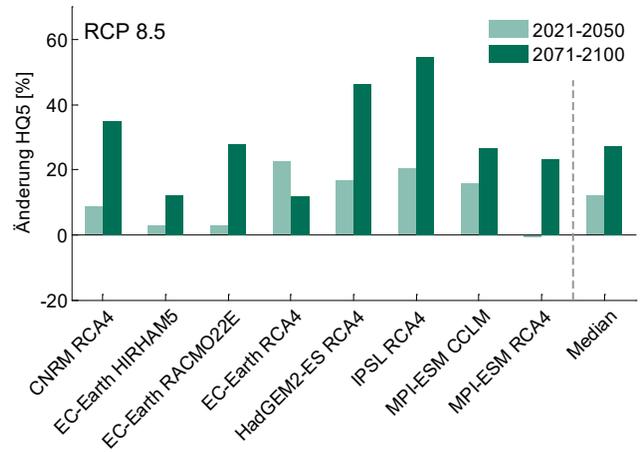
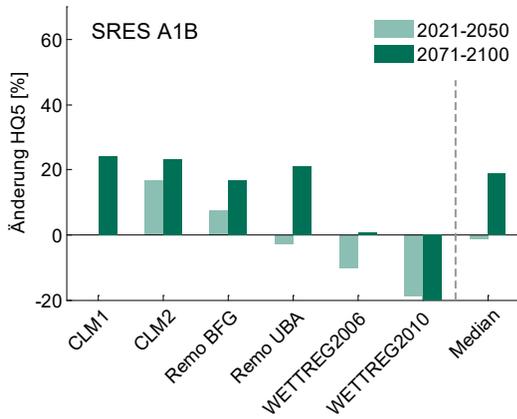


Hellwege

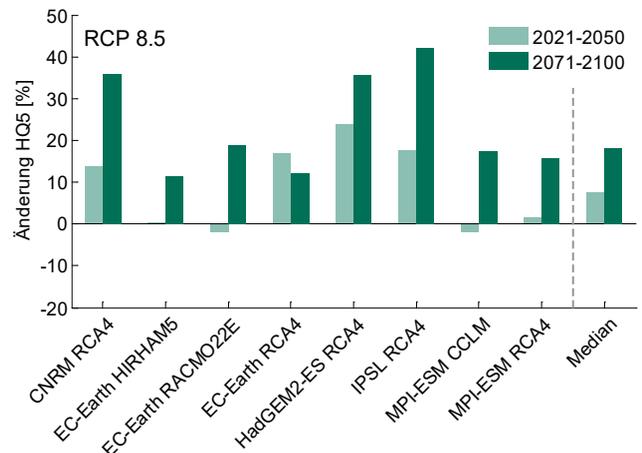
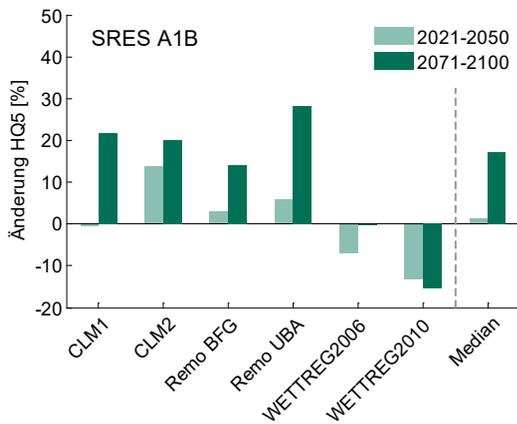




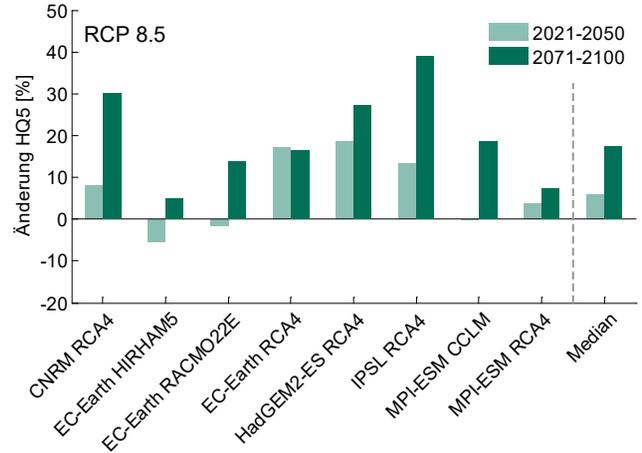
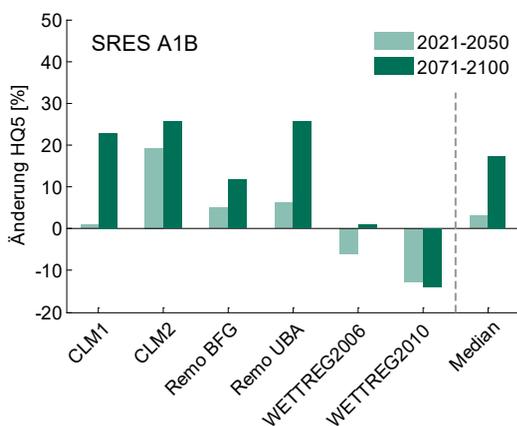
Heide OP



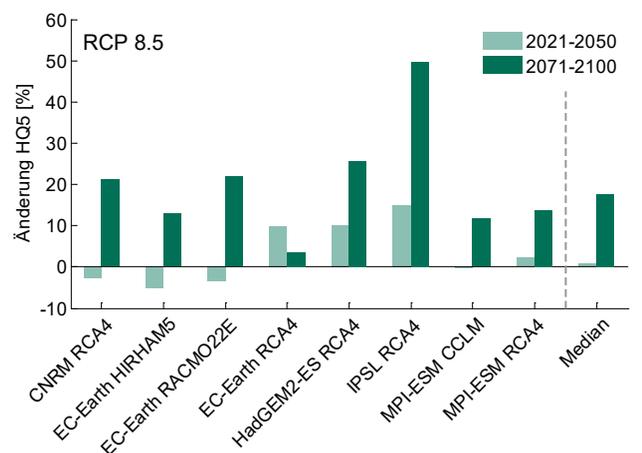
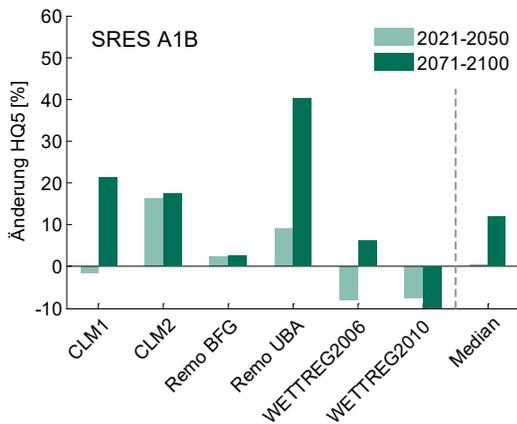
Huntlosen



Haselünne



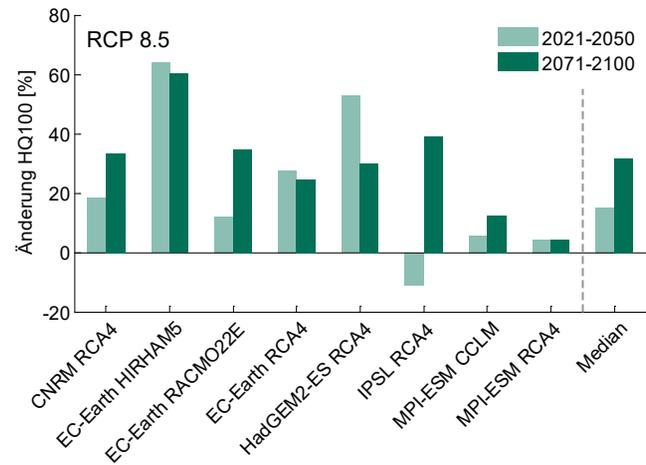
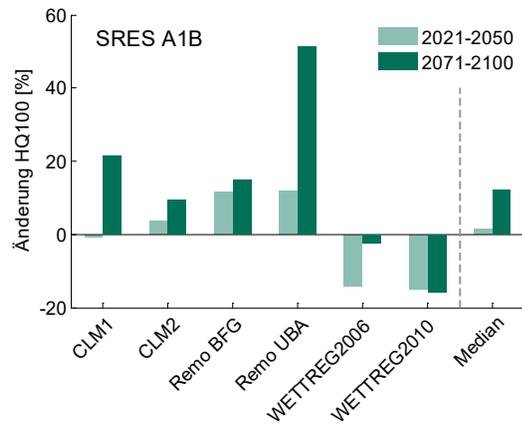
Emlichheim



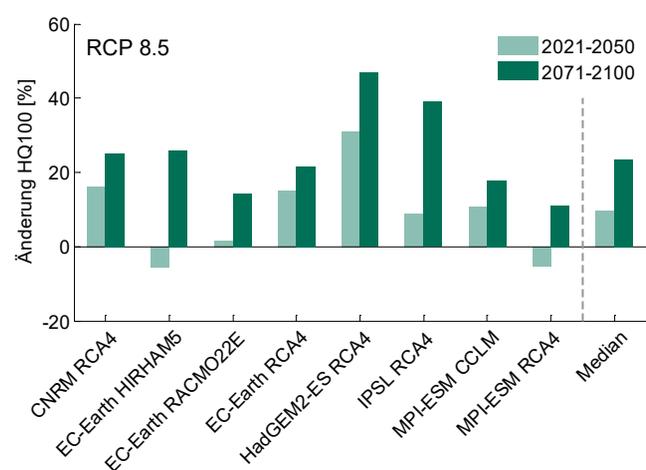
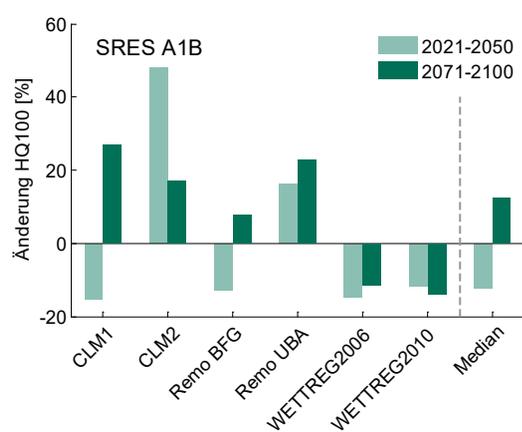


Anhang 10: Änderungssignale für HQ100 für das SRES A1B-Ensemble (links) und das RCP8.5-Ensemble (rechts) mit dem jeweiligen Ensemble-Median für die nahe und die ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 für alle Gebietsauslasspegel. Die Modellketten des SRES A1B-Ensembles basieren alle auf dem Globalmodell ECHAM5.

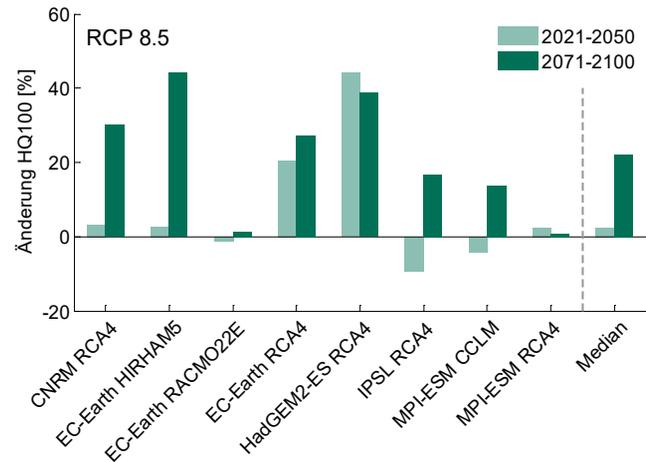
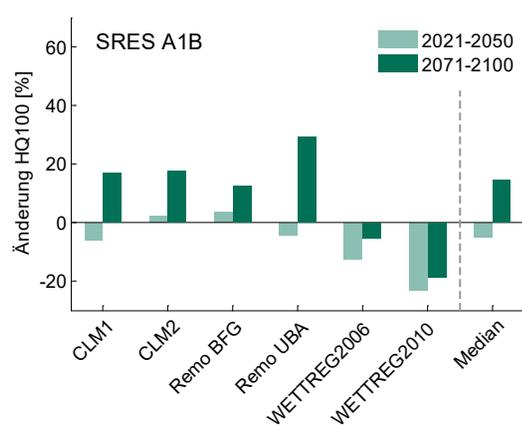
Bienenbüttel



Rethem

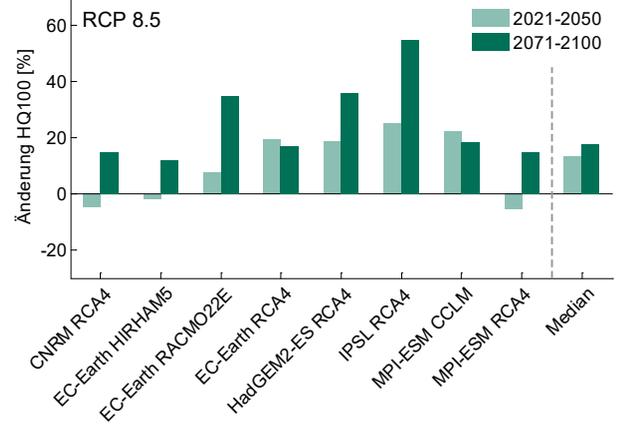
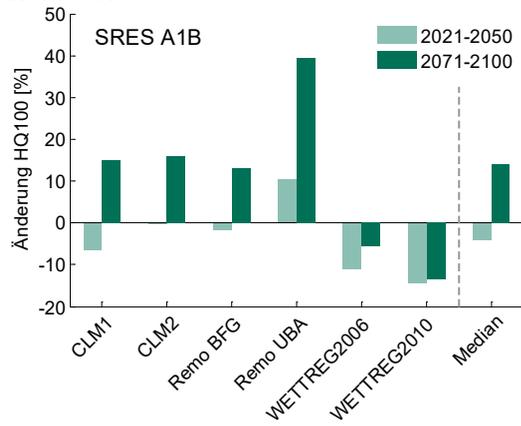


Hellwege

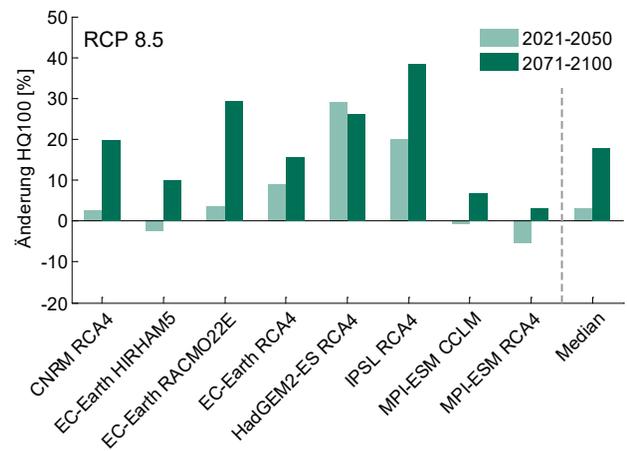
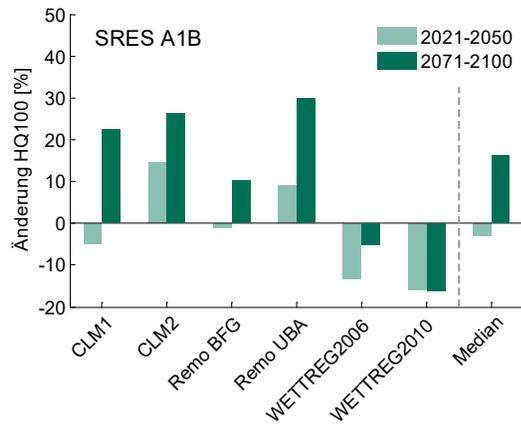




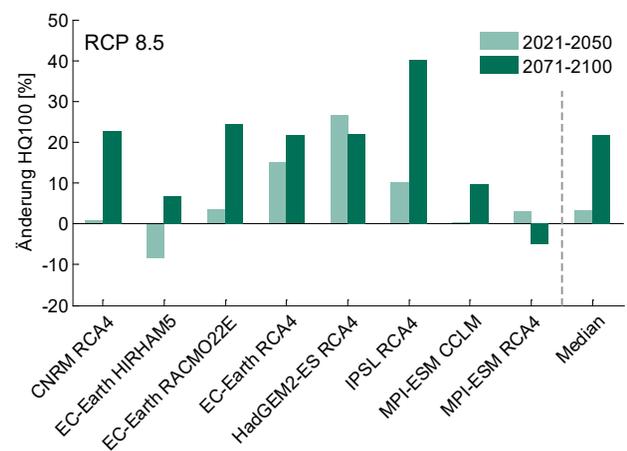
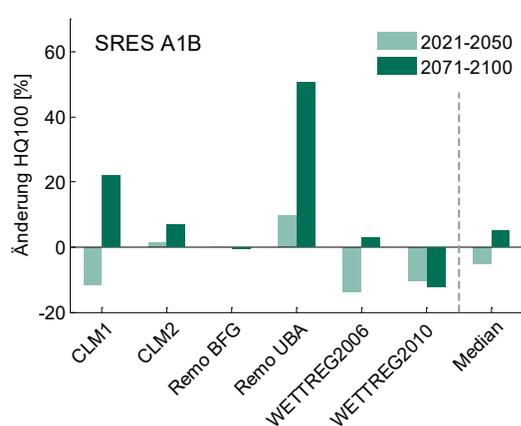
Heide OP



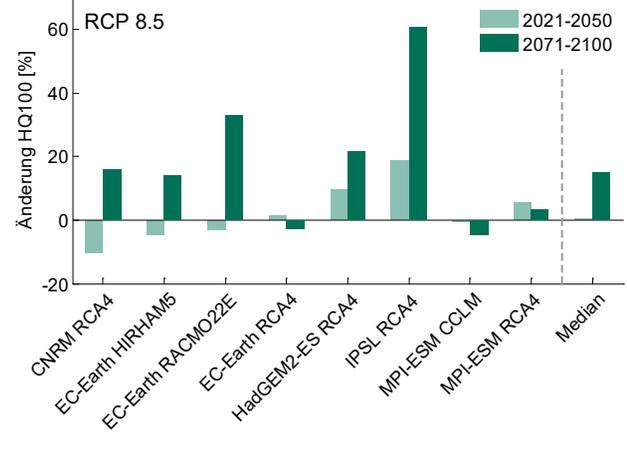
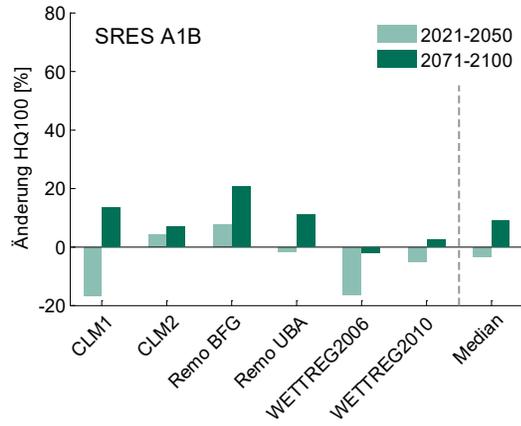
Huntlosen



Haselünne

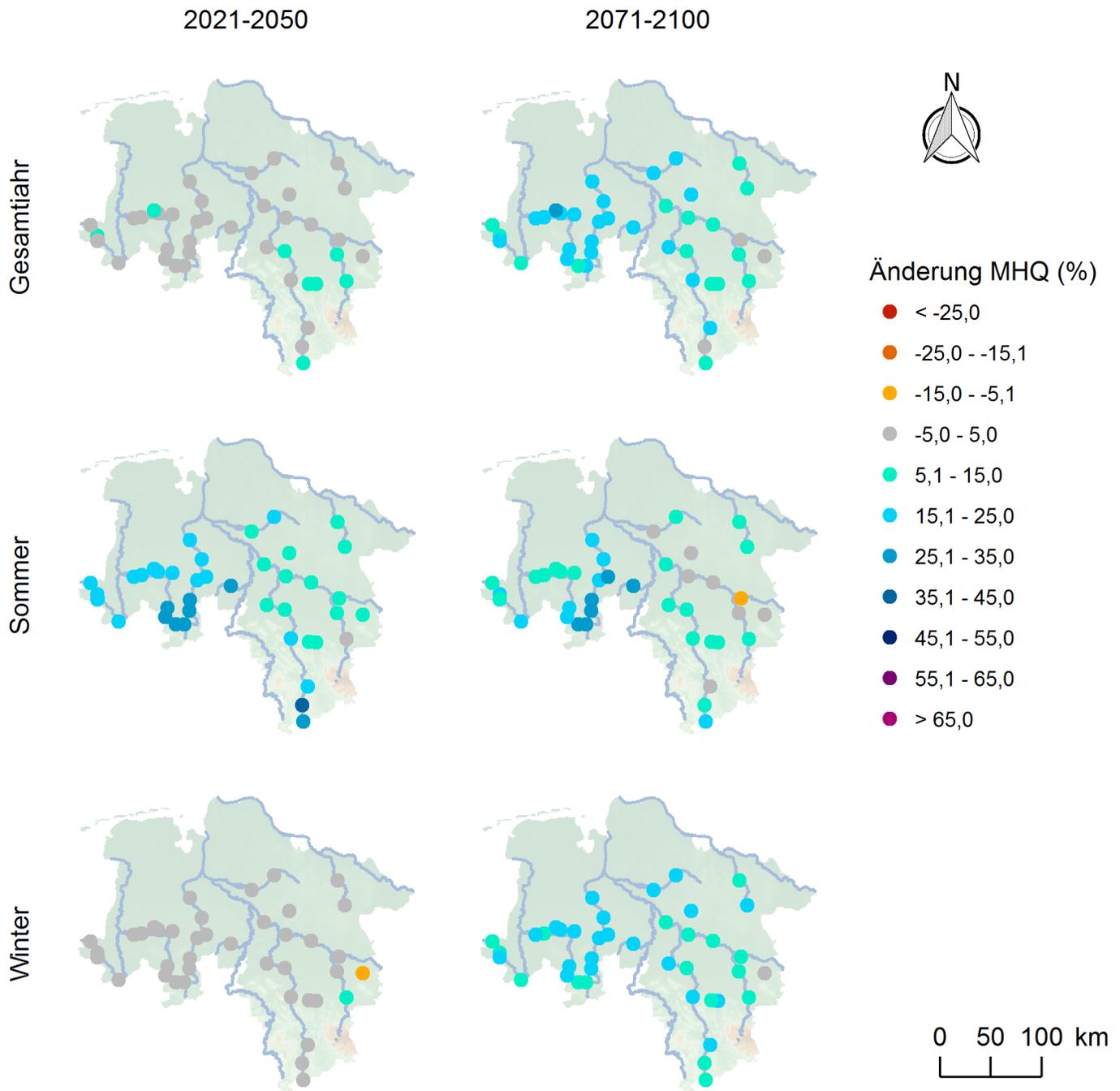


Emlichheim



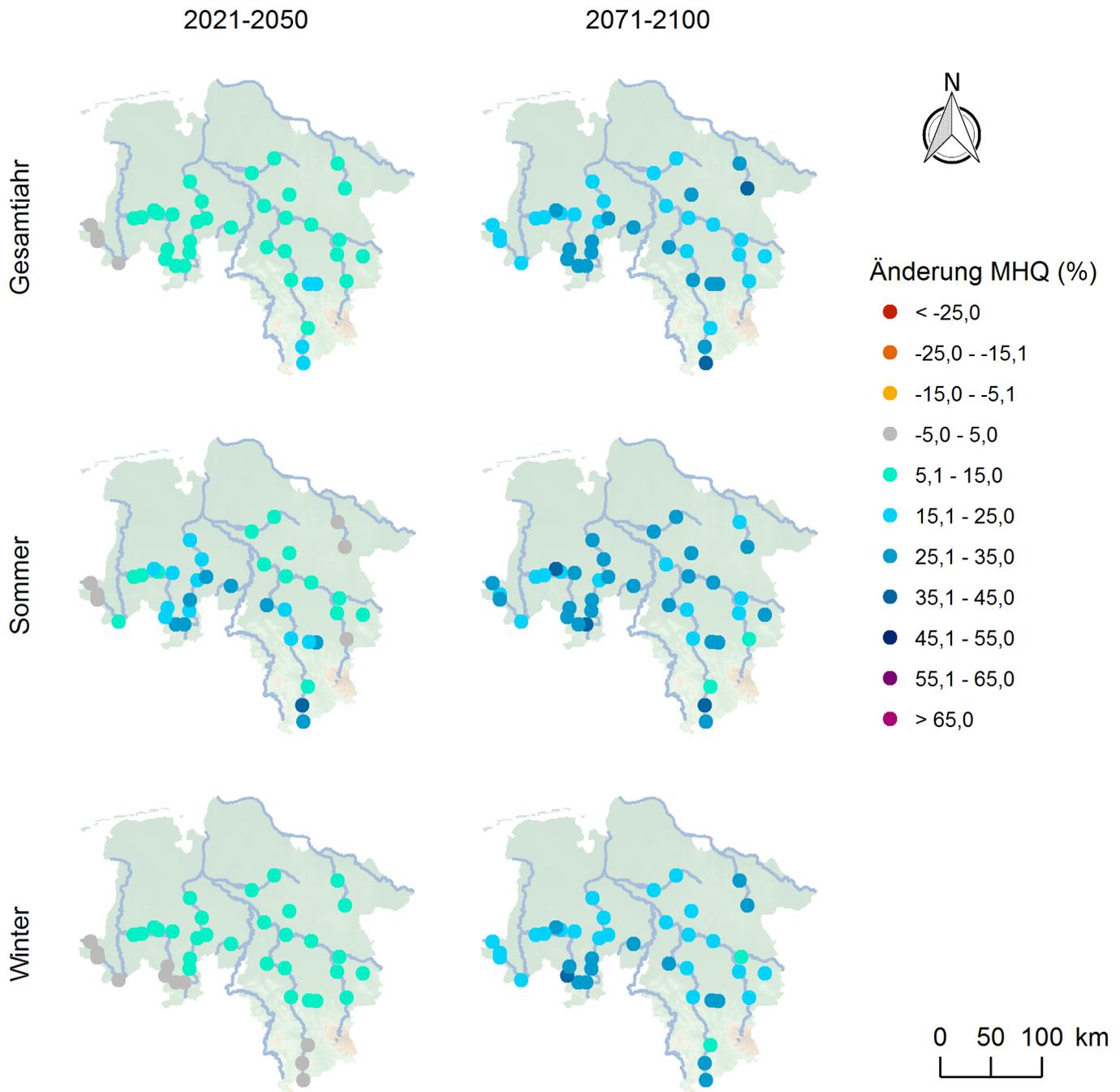


Anhang 11: Median der Änderungssignale aller Referenzpegel für MHQ für die 6 Modellketten des SRES A1B-Ensembles für das Gesamtjahr sowie das Sommerhalbjahr (01.05.-31.10.) und das Winterhalbjahr (01.11.-30.04.) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.



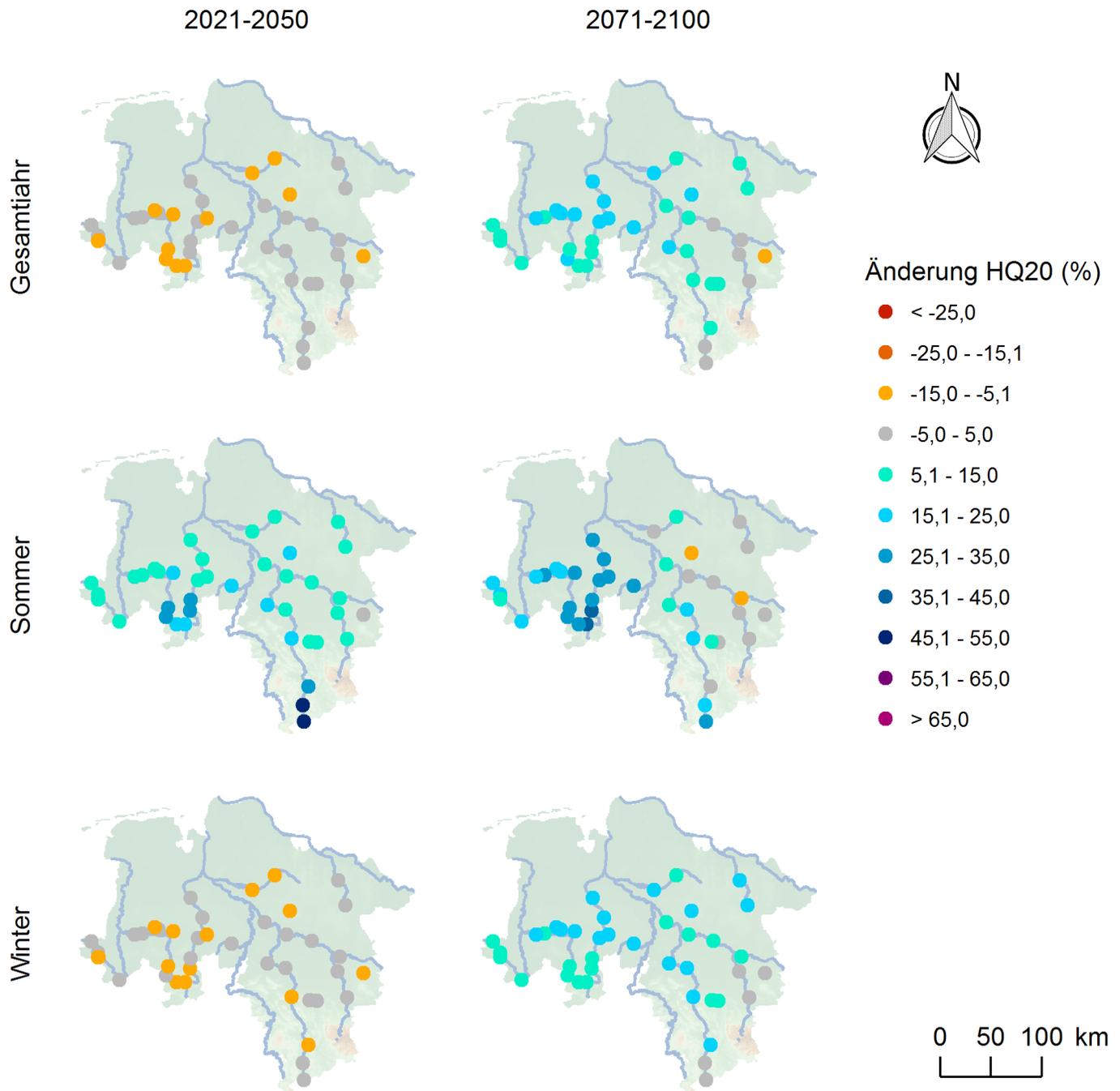


Anhang 12: Median der Änderungssignale aller Referenzpegel für MHQ für die 8 Modellketten des RCP8.5-Ensembles für das Gesamtjahr sowie das Sommerhalbjahr (01.05.-31.10.) und das Winterhalbjahr (01.11.-30.04.) für die nahe und ferne Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1971-2000.





Anhang 13: Median der Änderungssignale aller Referenzpegel für HQ20 für die 6 Modellketten des SRES A1B-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.





Anhang 14: Median der Änderungssignale aller Referenzpegel für HQ20 für die 8 Modellketten 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.

